

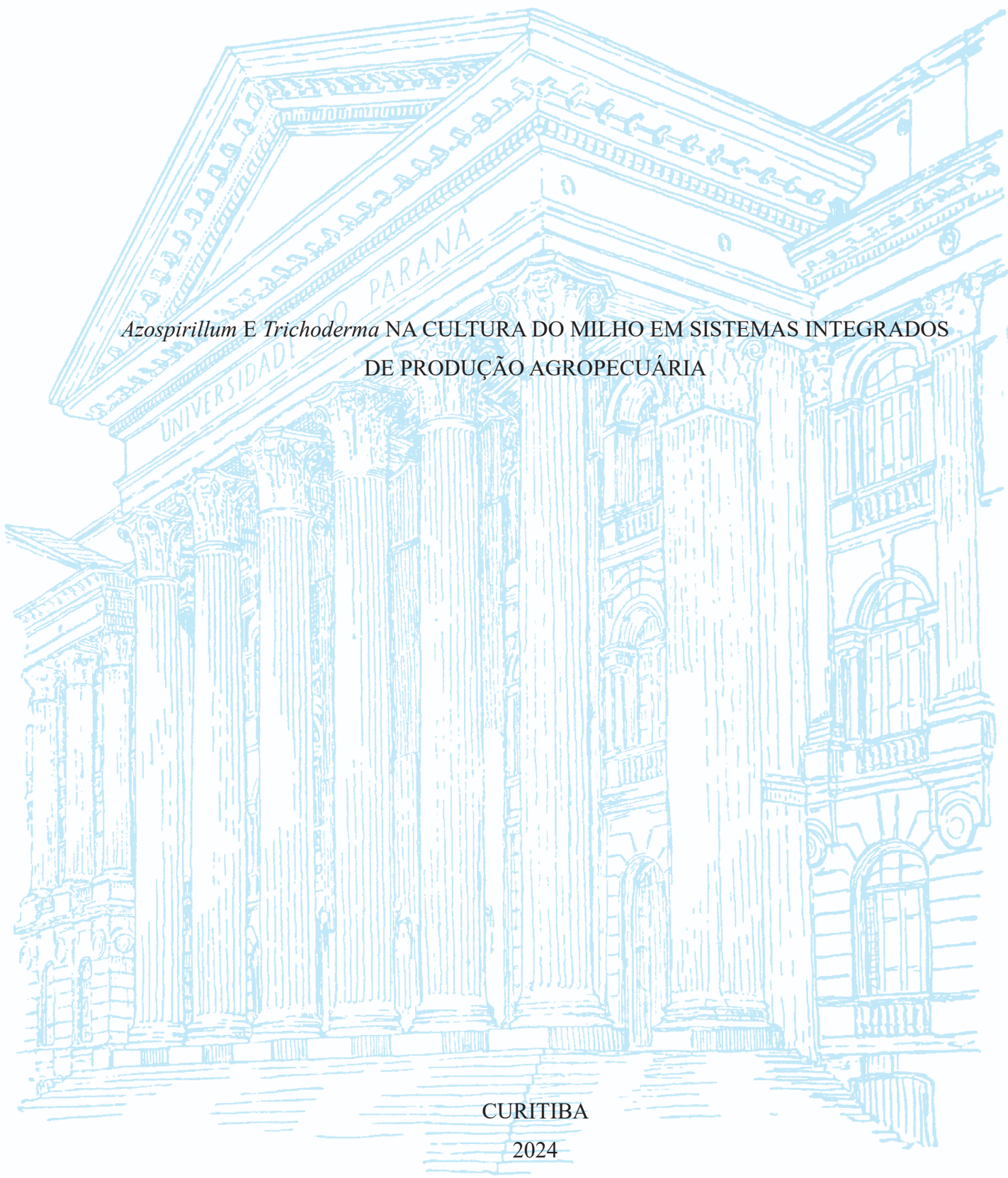
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO PEDRO TAVARES FERNANDES

*Azospirillum* E *Trichoderma* NA CULTURA DO MILHO EM SISTEMAS INTEGRADOS  
DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

CURITIBA

2024



JOÃO PEDRO TAVARES FERNANDES

*Azospirillum* E *Trichoderma* NA CULTURA DO MILHO EM SISTEMAS INTEGRADOS  
DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do  
Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa  
de Pós-Graduação em Agronomia (Produção  
Vegetal)

Orientador: Prof. Dr. Paulo César de Faccio  
Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Anibal de Moraes

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Fernandes, João Pedro Tavares

*Azospirillum e Trichoderma* na cultura do milho em sistemas integrados de produção agropecuária/ João Pedro Tavares Fernandes. – Curitiba, 2024.

1 recurso online: PDF.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal).

Orientador: Prof. Dr. Paulo César de Faccio Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Anibal de Moraes

1. Milho. 2. Produção vegetal. 3. Sustentabilidade. I. Carvalho, Paulo César de Faccio. II. Moraes, Anibal de. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal). IV. Título.

Bibliotecária: Telma Terezinha Stresser de Assis CRB-9/944



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO AGRONOMIA  
(PRODUÇÃO VEGETAL) - 40001016031P6

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL) da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **JOÃO PEDRO TAVARES FERNANDES** intitulada: ***Azospirillum E Trichoderma NA CULTURA DO MILHO EM SISTEMAS INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA***, sob orientação do Prof. Dr. PAULO CÉSAR DE FACCIÓ CARVALHO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 07 de Março de 2024.

Assinatura Eletrônica  
07/03/2024 12:11:39.0  
PAULO CÉSAR DE FACCIÓ CARVALHO  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
07/03/2024 11:45:03.0  
ANIBAL DE MORAES  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
07/03/2024 12:15:51.0  
ADRIANO STEPHAN NASCENTE  
Avaliador Externo (EMBRAPA)

Assinatura Eletrônica  
07/03/2024 14:26:21.0  
FENELON LOURENÇO DE SOUSA SANTOS  
Avaliador Externo (CENTRO UNIVERSITÁRIO DE GOIAS)

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço sinceramente a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, deixando registrada minha profunda gratidão:*

*A Deus pelo dom da vida.*

*Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFPR, pela oportunidade e estrutura oferecida durante este percurso acadêmico;*

*À Capes, pelo suporte financeiro concedido por meio da bolsa de estudos, que foi fundamental para a realização desta pesquisa;*

*Aos meus queridos pais, João e Patrícia, pela incessante dedicação e incentivo ao longo desta jornada acadêmica;*

*Com carinho aos meus queridos filhos, Luís Gabriel e Davi, pelo entendimento e apoio durante os momentos de estudo e pesquisa;*

*À minha irmã Larissa, pela constante motivação e estímulo;*

*À Fernanda, pelo apoio e incentivos que foram essenciais para a superação de diferentes desafios;*

*Em especial à Dra. Teresa, pelos aconselhamentos e incentivos constante ao longo desta trajetória;*

*Ao meu orientador, Prof. Paulo, pela acolhida no programa de pós-graduação, orientações e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho;*

*Ao coorientador, Prof. Anibal, pela acolhida no programa de pós-graduação, auxílio nas atividades de campo e orientações;*

*Ao Prof. Adriano, pelas suas orientações conferindo melhoria na discussão dos dados, além de sua participação como membro na defesa de tese;*

*À Prof. Kátia, pelo apoio e incentivo;*

*Ao amigo Prof. Vanderley, por sua disposição em auxiliar na discussão dos dados da tese.*

*Ao Prof. Fenelon, pelas colaborações e por integrar a banca de defesa de tese;*

*À amiga Clarissa, cujo apoio e ajuda foram de grande valia para a conclusão desta tese;*

*À Rubia, por sua disposição em auxiliar no desenvolvimento da tese, contribuindo de forma significativa para seu êxito;*

*Ao Prof. Leandro, pelas contribuições valiosas durante a banca de qualificação e, em especial, pela orientação no estágio docência;*

*À Prof. Claudete, pela colaboração e assistência no desenvolvimento das atividades de campo;*

*Ao amigo Daniel, pelas inúmeras ajudas nos trabalhos de campo e contribuições na discussão dos dados;*

*À Prof. Camila, pela colaboração e assistência na análise de dados;*

*Ao Francisco, pela prontidão em ajudar e auxiliar na discussão dos dados;*

*Ao Vicente, pela disposição em contribuir como membro na banca de pré-defesa;*

*Ao Prof. Ricardo, pelas orientações valiosas durante a etapa de qualificação;*

*Aos estagiários do NITA que colaboraram significativamente, em especial aos colegas Charles, Barbara, Sabir, Ana Paula e Camila;*

*Às secretárias da Pós-Graduação, Tatiana e Lucimara, pelo suporte ao longo do processo acadêmico;*

*A Maria Emília, do Laboratório de Fitotecnia da UFPR, pelo auxílio prestado durante a pesquisa;*

*Agradeço aos colegas Zico e Ivan da fazenda Canguiri pelas valiosas colaborações com os trabalhos em campo.*

*Às empresas Dinamiza e GAAS, pelo apoio na pesquisa, disponibilizando insumos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.*

*Meu sincero agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso desta jornada acadêmica.*

*Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento; porque é melhor a sua mercadoria do que artigos de prata, e maior o seu lucro que o ouro mais fino,  
Provérbios 3:13,14.*

## RESUMO

Com o aumento da população global e a crescente demanda por alimentos, torna-se imperativo adotar práticas agrícolas que assegurem a segurança alimentar e a preservação dos recursos ambientais. Nesse contexto, os microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCPs) e os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) surgem como estratégias promissoras para uma intensificação produtiva sustentável. Esta tese investigou o papel dos microrganismos *Azospirillum* e *Trichoderma* no desempenho da cultura do milho em SIPA, combinando uma revisão bibliográfica qualitativa com pesquisas de campo quantitativas. No Capítulo I, objetivou-se determinar as principais informações sobre os MPCPs, com foco em *Azospirillum* e *Trichoderma* e sua aplicação na cultura do milho em SIPA. A pesquisa consistiu em uma revisão narrativa de literatura com abordagem qualitativa. Os resultados indicaram que os MPCPs têm efeitos positivos nas plantas, mas a literatura técnico-científica ainda apresenta uma lacuna significativa, destacando a necessidade de estudos adicionais sobre o tema. No Capítulo II, o objetivo foi determinar os efeitos da coinoculação de *A. brasilense* e *T. asperellum* na cultura do milho, cultivado em monocultivo e em SIPA. Utilizou-se um delineamento em blocos ao acaso (DBC), em fatorial duplo (4 x 2) com três repetições. O fator "Sistemas de Cultivo" incluiu os níveis: i. lavoura (L), ii. lavoura-pecuária (LP), iii. lavoura-floresta (LF) e iv. lavoura-pecuária-floresta (LPF). O fator "Manejo" abrangeu os níveis: i. coinoculação (*A. brasilense* + *T. asperellum*) e ii. controle (sem utilização de MPCPs). Os sistemas LP e L com coinoculação apresentaram os maiores rendimentos, enquanto os sistemas LF e LPF, que incluem o componente arbóreo, apresentaram menores rendimentos, devido ao sombreamento. O tratamento LP + coinoculação foi o mais expressivo, com aumentos de 17,14% na MSPA, 43% no M1000 e 9,56% na produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) em comparação ao tratamento L + controle. Além disso, o tratamento LP + coinoculação superou o LPF + controle em 136,63% na produtividade. Os resultados indicam que a coinoculação de MPCPs no milho em sistema LP é uma estratégia eficaz para otimizar a produção. No Capítulo III, objetivou-se determinar o efeito do uso de MPCPs, inoculados ou coinoculados, no desempenho morfológico e no rendimento de grãos da cultura do milho em diferentes sistemas de produção. O método utilizado foi um delineamento em blocos ao acaso (DBC), com três repetições, em fatorial duplo (2 x 4), considerando como fatores: (A) i. monocultivo L; e ii. LP; e (B) i. *A. brasilense*; ii. *T. asperellum*; iii. *T.* coinoculação (*asperellum* + *A. brasilense*); e iv. controle (sem aplicação de MPCPs). O sistema LP com coinoculação foi o mais eficaz, com incrementos significativos nos componentes NFO, M1000 e produtividade. Em comparação ao tratamento monocultural L +

controle, o tratamento LP + coinoculação aumentou NFO em 66% e 77%, M1000 em 18% e 29%, e produtividade em 60% e 63% nas duas safras avaliadas. Portanto, a coinoculação no sistema LP demonstra ser o tratamento mais eficiente para otimizar a produção de milho, melhorando tanto os componentes morfológicos quanto o rendimento de grãos.

**Palavras-chave:** bioinsumos; produção vegetal; lavoura-pecuária-floresta; agrossilvipastoris.

## ABSTRACT

With the growing global population and increasing demand for food, it has become imperative to adopt agricultural practices that ensure food security and the preservation of environmental resources. In this context, plant growth-promoting microorganisms (PGPMs) and Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS) have emerged as promising strategies for sustainable productive intensification. This thesis investigated the role of the microorganisms *Azospirillum* and *Trichoderma* in the performance of maize cultivation in ICLS, combining a qualitative literature review with quantitative field research. In Chapter I, the objective was to identify key information about PGPMs, focusing on *Azospirillum* and *Trichoderma* and their application in maize cultivation within ICLS. The research consisted of a narrative literature review with a qualitative approach. The results indicated that PGPMs have positive effects on plants, but the scientific literature still presents a significant gap, highlighting the need for additional studies on the subject. In Chapter II, the goal was to determine the effects of co-inoculation with *A. brasilense* and *T. asperellum* on maize cultivation, grown both in monoculture and in ICLS. A randomized block design (RBD) was used in a double factorial arrangement (4 x 2) with three replications. The "Cultivation Systems" factor included the following levels: i. crop (L), ii. crop-livestock (LP), iii. crop-forest (LF), and iv. crop-livestock-forest (LPF). The "Management" factor comprised the levels: i. co-inoculation (*A. brasilense* + *T. asperellum*) and ii. control (without PGPMs). The LP and L systems with co-inoculation showed the highest yields, while the LF and LPF systems, which include the arboreal component, showed lower yields due to shading effects. The LP + co-inoculation treatment was the most effective, with increases of 17.14% in shoot dry matter (SDM), 43% in thousand-grain weight (TGW), and 9.56% in yield ( $\text{t ha}^{-1}$ ) compared to the L + control treatment. Additionally, the LP + co-inoculation treatment outperformed the LPF + control treatment by 136.63% in yield. The results suggest that co-inoculation of PGPMs in maize under the LP system is an effective strategy to optimize production. In Chapter III, the objective was to determine the effect of using PGPMs, either inoculated or co-inoculated, on the morphological performance and grain yield of maize in different production systems. The method used was a randomized complete block design (RCBD), with three replications, in a two-factor factorial arrangement (2 x 4), considering the following factors: (A) i. L monoculture; and ii. LP; and (B) i. *A. brasilense*; ii. *T. asperellum*; iii. coinoculation (*T. asperellum* + *A. brasilense*); and iv. control (no application of PGPMs). The LP system with co-inoculation was the most effective, with significant increases in the components of ear number per plant (ENP), thousand-grain weight (TGW), and

yield. Compared to the L + control monoculture treatment, the LP + co-inoculation treatment increased ENP by 66% and 77%, TGW by 18% and 29%, and yield by 60% and 63% in the two evaluated seasons. Therefore, co-inoculation in the LP system proves to be the most efficient treatment for optimizing maize production, improving both morphological components and grain yield.

**Keywords:** bioinputs; plant production; crop–livestock–forest systems; agrosilvopastoral.

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo II

- Figura 1. Área experimental do NITA para o experimento de longa duração, Pinhais, PR. Adaptada .....73
- Figura 2. Imagem adaptada - tratamento PF, NITA, 2018.....75
- Figura 3: A- Semeadura de milho área experimental do NITA; B- Cobertura vegetal com aveia preta; C- Vista dos talhões LP e L (blocos 1 e 2) após semeadura; Adaptado. ....76
- Figura 4: Médias das alturas de plantas (AP) e da altura de inserção da espiga (AIE) do milho em função dos fatores Sistema (S) e Manejo (M). Níveis de S: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF); e níveis de M: Coinoculação (*Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum*) e Controle (sem microrganismos). Tukey a 5% de significância. Letras maiúsculas sobre as barras indicam diferenças significativas entre os níveis de S, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de M.....81
- Figura 5: Médias de número de folhas (NFO) e diâmetro de colmo (DC) do milho em função dos fatores Sistema (S) e Manejo (M). Níveis de S: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF) e níveis de M: Coinoculação (*Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum*) e Controle (sem microrganismos). Tukey a 5% de significância. Letras maiúsculas sobre as barras indicam diferenças significativas entre os níveis de S, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de M.....82
- Figura 6: Médias de massa verde da parte aérea (MVPA) e massa seca da parte aérea (MSPA) do milho em função dos fatores Sistema (S) e Manejo (M). Níveis de S: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF) e níveis de M: Coinoculação (*Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum*) e Controle (sem microrganismos). Tukey a 5% de significância. Letras maiúsculas sobre as barras indicam diferenças significativas entre os níveis de S, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de M.....83

Figura 7. Médias de número de espigas (NE), número de fileiras (NFI) e número de grãos por fileira (NGF) do milho em função dos fatores Sistema (S) e Manejo (M). Níveis de S: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF) e níveis de M: Coinoculação (*Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum*) e Controle (sem microrganismos). Tukey a 5% de significância. Letras maiúsculas sobre as barras indicam diferenças significativas entre os níveis de S, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de M. ns - não apresentou diferença significativa ( $p>0,05$ ).....84

Figura 8. Médias de massa de 1000 grãos (M1000), Produtividade (Prod.) do milho em função dos fatores Sistema (S) e Manejo (M). Níveis de S: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF) e níveis de M: Coinoculação (*Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum*) e Controle (sem microrganismos). Tukey a 5% de significância. Letras maiúsculas sobre as barras indicam diferenças significativas entre os níveis de S, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de M.....86

### Capítulo III

Figura 1. Análise de Componentes Principais e correlação entre os tratamentos e as variáveis independentes. Dimensão – Dim; dos componentes de rendimento de grãos da cultura do milho sob os fatores: “Sistemas de Cultivo” (i. Lavoura – L; e ii. Lavoura-Pecuária – LP); e “Manejos Microbiológicos” (i. *Azospirillum brasilense*; ii. *Trichoderma asperellum*; iii. Coinoculação: *A. brasilense* + *T. asperellum*; iv. controle: ausência de aplicação de microrganismos) para as variáveis resposta - altura de planta AP, diâmetro de colmo DC, altura de inserção da espiga AIE, número de folhas NFO, massa seca da parte aérea (MS.PA) número de espigas (NE), número de fileiras (NFI), número de grãos por fileira (NGF), massa de 1.000 grãos (MMG), Produtividade por ha (Prod.).....115

Figura 2. Análise de Componentes Principais apresentando a correlação entre os tratamentos e as variáveis independentes. Correlação de variáveis através do mapa de contribuição individual. Dimensão – Dim; L – Lavoura; La – Lav. + *Azospirillum brasilense*; Lc – Lav. + (Coinoculação com *Trichoderma asperellum* com *A. brasilense*). Lt – Lav. + *T. asperellum*; Lavoura Pecuária – LP; LPa – LP + *A. brasilense*; LPc – LP + coinoculação;

LPt – LP + *T. asperellum*. Variáveis resposta - altura de planta AP (cm), diâmetro de colmo DC, altura de inserção da espiga AIE, número de folhas NFO, massa verde da parte aérea MVPA, massa seca da parte aérea MS.PA, número de espigas NE, número de fileiras NFI, número de grãos por fileira NGF, massa de 1.000 grãos M1000, Produtividade de grãos por ha Prod. ....117

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo II

- Tabela 1. Atributos químicos do solo 0-10 cm em diferentes sistemas agrícolas de produção - Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA), Pinhais, Paraná.....76
- Tabela 2. Valores do teste de F da ANAVA para a cultura do milho submetida aos fatores Sistema e Manejo, ano agrícola 2020/21.....79
- Tabela 3. Autovalores e % acumulado de variâncias de componentes principais – PCA.....87

### Capítulo III

- Tabela 1. Atributos químicos do solo 0-10 cm em diferentes sistemas agrícolas. Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA), Pinhais, Paraná.....101
- Tabela 2. Valores do teste de F (ANAVA) da primeira e segunda safra, para a altura de planta - AP; altura de inserção da espiga - AIE; número de folhas - NFO; diâmetro de colmo - DC; massa verde parte aérea - MVPA; massa seca parte aérea - MSPA; número de espigas - NE; número de fileiras - NFI; número de grãos por fileira - NGF; massa de mil grãos - MMG; produção - PROD).....106
- Tabela 3. Médias geral ( $\mu$ ); desvio padrão ( $\sigma$ ); e coeficiente de variação (CV %) dos componentes morfológicos da cultura do milho sob os fatores: “Sistemas de Cultivo” (i. Lavoura – L; e ii. Lavoura-Pecuária – LP); e “Manejos Microbiológicos” (i. *Azospirillum brasilense*; ii. *Trichoderma asperellum*; iii. Coinoculação: *A. brasilense* + *T. asperellum*; iv. controle: ausência de aplicação de microrganismos) nos componentes de altura de planta (AP, cm), diâmetro de colmo (DC, cm), altura de inserção da espiga (AIE, cm), número de folhas (NFO, un.), massa verde parte aérea (MVPA, kg pl-1), massa seca da parte aérea (MSPA, kg pl-1). Safra 2021-22, Pinhais, Paraná.....108

Tabela 4. Médias geral ( $\mu$ ); desvio padrão ( $\sigma$ ); e coeficiente de variação (CV %) dos componentes morfológicos da cultura do milho sob os fatores: “Sistemas de Cultivo” (i. Lavoura – L; e ii. Lavoura-Pecuária – LP); e “Manejos Microbiológicos” (i. *Azospirillum brasilense*; ii. *Trichoderma asperellum*; iii. Coinoculação: *A. brasilense* + *T. asperellum*; iv. controle: ausência de aplicação de microrganismos) nos componentes de altura de planta (AP), diâmetro de colmo (DC), altura de inserção da espiga (AIE), número de folhas (NFO), massa verde parte aérea (MVPA), massa seca da parte aérea (MSPA). Safra 2022-23, Pinhais, Paraná.....109

Tabela 5. Médias geral ( $\mu$ ); desvio padrão ( $\sigma$ ); e coeficiente de variação (CV %) dos componentes de rendimento de grãos da cultura do milho sob os fatores: “Sistemas de Cultivo” (i. Lavoura – L; e ii. Lavoura-Pecuária – LP); e “Manejos Microbiológicos” (i. *Azospirillum brasilense*; ii. *Trichoderma asperellum*; iii. Coinoculação: *A. brasilense* + *T. asperellum*; iv. controle: ausência de aplicação de microrganismos) nos componentes de número de espigas NE, número de fileiras NF, número de grãos por fileira NGF, massa de 1000 grãos M1000 (kg), Produtividade por ha Prod. (t ha<sup>-1</sup>), safra 2021-22, Pinhais, Paraná.....112

Tabela 6. Médias geral ( $\mu$ ); desvio padrão ( $\sigma$ ); e coeficiente de variação (CV %) dos componentes de rendimento de grãos da cultura do milho sob os fatores: “Sistemas de Cultivo” (i. Lavoura – L; e ii. Lavoura-Pecuária – LP); e “Manejos Microbiológicos” (i. *Azospirillum brasilense*; ii. *Trichoderma asperellum*; iii. Coinoculação: *A. brasilense* + *T. asperellum*; iv. controle: ausência de aplicação de microrganismos) nos componentes de número de espigas NE, número de fileiras NF, número de grãos por fileira NGF, massa de 1000 grãos M1000 (kg), Produtividade por ha Prod. (t ha<sup>-1</sup>), safra 2022-23, Pinhais, Paraná.....113

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

|                   |  |
|-------------------|--|
| AIA               | - Ácido indol acético  |
| AP                | - Altura de plantas  |
| APA               | - Área de proteção ambiental   |
| BPCVs             | - Bactérias promotoras de crescimento vegetal                          |
| BSF               | - Bactérias solubilizadoras de fosfato                                 |
| BSPA              | - Biomassa seca de parte aérea   |
| Capes -           | - Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior |
| CO <sub>2</sub> - | - Dióxido de carbono   |
| CONAB -           | - Companhia Nacional de Abastecimento                                  |
| DAE               | - Dias após emergência   |
| DAS               | - Dias após semeadura  |
| DBC               | - Delineamento experimental de blocos casualizados                     |
| DC                | - Diâmetro da base do colmo  |
| EFP               | - Estádio de florescimento pleno                                       |
| EM                | - Espaçamento médio entre linhas                                       |
| Emater            | - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural                      |
| EMBRAPA           | - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária                          |
| F                 | - Floresta   |
| FBN               | - Fixação biológica de Nitrogênio                                      |
| FPCVs             | - Fungos promotores de crescimento vegetal                             |
| GAAS              | - Grupo Associado de Agricultura Sustentável                           |
| GPF               | - número de grãos por fileira  |
| IDR               | - Instituto de Desenvolvimento Rural                                   |
| IGC               | - Conselho Internacional de Grãos                                      |
| KCL               | - Cloreto de potássio  |
| L                 | - Lavoura  |
| LF                | - Lavoura Floresta -   |
| LP                | - Lavoura Pecuária -   |
| LPF               | - Lavoura pecuária floresta  |
| M1000             | - Massa de 1.000 grãos   |
| MPCPs             | - Microrganismos Promotores de Crescimento em Plantas                  |

|        |  |
|--------|--|
| N      | - Nitrogênio   |
| NE     | - Número de espigas por planta   |
| NE     | - Número médio de espigas  |
| NFE    | - Número de fileiras por espiga  |
| NITA   | - Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária                         |
| ORCID  | - Open Researcher and Contributor ID                                     |
| P      | - Pecuária   |
| P      | - Peso médio de grãos por espiga -:                                      |
| PCA    | - Componentes principais   |
| PF     | - Pecuária Floresta  |
| PGPB   | - Plant growth-promoting bactéria  |
| PGPF   | - Plant growth-promoting fungi   |
| Prod.  | - Produtividade  |
| R      | - Estádio reprodutivo  |
| SAS    | - Software de Analytics & Soluções                                       |
| SciELO | - Scientific Electronic Library Online                                   |
| Scopus | - Search API supports  |
| SIPA   | - Sistemas Integrados de Produção Agropecuária                           |
| Tukey  | - Procedimento de comparação múltipla de etapa única e teste estatístico |
| UFC    | - Unidades formadoras de colônia   |
| UFPR   | - Universidade Federal do Paraná -                                       |
| UFERSA | - Universidade Federal Rural do Semi-Árido                               |
| USDA   | - Departamento de Agricultura dos Estados Unidos                         |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....   | 17 |
| 1.1 REFERÊNCIAS.....   | 24 |
| <b>2. CAPÍTULO I - Microrganismos promotores de crescimento de plantas - <i>Trichoderma</i> e <i>Azospirillum</i>: otimizando a cultura do milho em sistemas integrados de produção agropecuária</b> ..... | 29 |
| 2.1 RESUMO.....  | 29 |
| 2.2 ABSTRACT.....  | 30 |
| 2.3 RESUMEN.....   | 30 |
| 2.4 INTRODUÇÃO.....  | 31 |
| 2.5 MATERIAL E MÉTODOS.....  | 34 |
| 2.6 DISCUSSÕES.....  | 35 |
| 2.6.1 Características gerais dos microrganismos promotores de crescimento vegetal.....   | 35 |
| 2.6.2 Características gerais dos principais gêneros de BPCPs.....  | 36 |
| 2.6.3 Características gerais dos principais gêneros dos FPCPs.....   | 38 |
| 2.6.4 Ambiente edáfico de desenvolvimento dos MPCPs.....   | 39 |
| 2.6.5 Efeitos dos MPCPS.....   | 39 |
| 2.6.6 Efeitos Diretos.....   | 40 |
| 2.6.7 Produção de sideróforos.....   | 40 |
| 2.6.8 Produção de fitohormônios.....   | 40 |
| 2.6.9 Fixação Biológica de Nitrogênio.....   | 41 |
| 2.6.10 Solubilização de fosfato.....   | 42 |
| 2.6.11 Produção de Biofilme.....   | 43 |
| 2.6.12 Efeitos indiretos.....  | 44 |
| 2.6.13 Biocontrole de organismos espontâneos.....  | 44 |
| 2.6.14 Ativação do Sistema de Alerta das Plantas.....  | 44 |
| 2.6.15 Benefícios causados pelos MPCPs.....  | 44 |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.6.16 O gênero <i>Trichoderma</i> e espécies relevantes.....  | 45        |
| 2.6.17 O gênero <i>Azospirillum</i> e espécies relevantes.....   | 47        |
| 2.6.18 MPCPs associados à cultura do milho.....  | 49        |
| 2.6.19 Coinoculação – A associação do <i>Trichoderma</i> com <i>Azospirillum</i> potencializando a cultura do milho.....     | 49        |
| 2.6.20 Coinoculação de MPCPs em SIPA.....  | 50        |
| <b>2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>52</b> |
| <b>2.8 AGRADECIMENTOS.....</b>   | <b>53</b> |
| <b>2.9 REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>53</b> |
| <b>3. CAPÍTULO II - Desempenho da cultura do milho sob diferentes sistemas de produção agropecuária e coinoculação .....</b> | <b>66</b> |
| 3.1 RESUMO.....  | 66        |
| 3.2 ABSTRACT.....  | 67        |
| 3.3 RESUMEN.....   | 68        |
| <b>3.4 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>69</b> |
| <b>3.5 METODOLOGIA .....</b>   | <b>72</b> |
| 3.5.1 Caracterização da área experimental .....  | 72        |
| 3.5.2 Delineamento experimental - Pesquisa de longa duração .....  | 73        |
| 3.5.3 Delineamento experimental - Pesquisa de curta duração .....  | 73        |
| 3.5.4 Condução dos sistemas.....   | 74        |
| 3.5.5 Componente floresta.....   | 74        |
| 3.5.6 Componente Pecuário.....   | 74        |
| 3.5.7 Componente Lavoura.....  | 75        |
| 3.5.8 Caracterização do solo.....  | 76        |
| 3.5.9 Caracterização da cultivar .....   | 77        |
| 3.5.10 Protocolo das coinoculações.....  | 77        |
| 3.5.11 Tratos culturais .....  | 78        |
| 3.5.12 Semeadura.....  | 78        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.5.13 Adubação .....   | 78         |
| 3.5.14 Manejo fitossanitário.....   | 79         |
| 3.5.15 Avaliação de componentes morfológico e de rendimento de grãos e coleta de dados....  | 79         |
| 3.5.16 Análise de dados.....  | 79         |
| <b>3.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>   | <b>80</b>  |
| 3.6.1 Valores do teste de F da ANAVA.....   | 80         |
| 3.6.2 Componentes morfológicos.....   | 80         |
| 3.6.3 Componentes de rendimento de grãos.....   | 84         |
| 3.6.4 Análise de componentes principais – PCA.....  | 87         |
| <b>3.7 CONCLUSÃO.....</b>   | <b>88</b>  |
| <b>3.8 AGRADECIMENTOS .....</b>   | <b>90</b>  |
| <b>3.9 REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>91</b>  |
| <b>4. Capítulo III - Desempenho morfológico e de rendimento de grãos do milho híbrido em sistema puro e integrado de produção agropecuário submetido a inoculação e coinoculação com <i>Azospirillum brasilense</i> e <i>Trichoderma asperellum</i> .....</b> | <b>94</b>  |
| 4.1 RESUMO .....  | 94         |
| 4.2 ABSTRACT .....  | 95         |
| 4.3 RESUMEN .....   | 96         |
| <b>4.4 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>97</b>  |
| <b>4.5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>   | <b>100</b> |
| 4.5.1 Caracterização da área experimental .....   | 100        |
| 4.5.2 Características Climáticas e Ambientais.....  | 100        |
| 4.5.3 Caracterização do Solo.....   | 101        |
| 4.5.4 Delineamento da pesquisa de longa duração.....  | 101        |
| 4.5.5 Delineamento de pesquisa de curta duração – “Sistemas de Cultivo” e “Manejos Microbiológicos” .....   | 101        |
| 4.5.6 Manejo do tratamento L .....  | 102        |
| 4.5.7 Manejo do tratamento LP.....  | 102        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 4.5.8      | Protocolo de inoculação e coinoculação.....   | 102        |
| 4.5.9      | Adubações .....   | 103        |
| 4.5.10     | Semeaduras.....   | 103        |
| 4.5.11     | Desbaste de plantas.....  | 103        |
| 4.5.12     | Manejo fitossanitário.....  | 104        |
| 4.5.13     | Componentes de rendimento morfológico .....   | 104        |
| 4.5.14     | Coleta de dados componentes morfológicos.....   | 104        |
| 4.5.15     | Componentes de rendimento de grãos .....  | 105        |
| 4.5.16     | Coleta de dados de rendimento de grãos.....   | 105        |
| 4.5.17     | Análise de dados.....   | 105        |
| <b>4.6</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>  | <b>106</b> |
| 4.6.1      | Teste F da ANOVA – Para componentes morfológicos e de rendimento de grãos - Primeira e Segunda Safra..... | 106        |
| 4.6.2      | Componentes Morfológicos .....  | 106        |
| 4.6.3      | Componentes de rendimento de grãos .....  | 111        |
| 4.6.4      | Análise de Componentes Principais.....  | 115        |
| <b>4.7</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>   | <b>118</b> |
| <b>4.8</b> | <b>AGRADECIMENTOS.....</b>  | <b>118</b> |
| <b>4.9</b> | <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>118</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>  | <b>125</b> |
| <b>6</b>   | <b>REFERÊNCIAS GERAIS.....</b>  | <b>126</b> |

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Para alcançar uma agricultura diferente do modelo tradicional, é necessário reduzir o uso de insumos sintéticos e produzir alimentos saudáveis com intensificação produtiva sustentável. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), até 2050 será necessário aumentar em 60% a produção de alimentos para atender à demanda global. Esse aumento é impulsionado pelo crescimento econômico, maior poder aquisitivo dos consumidores, aumento da população e maior expectativa de vida (Sgarioni, 2021; Pereira, 2022).

Esse cenário tem despertado um interesse crescente na adoção de práticas agrícolas sustentáveis (Sgarioni, 2021; Pereira & De Castro, 2022). Entre essas práticas, destacam-se a coinoculação com microrganismos promotores de crescimento em plantas (MPCPs) e a intensificação produtiva sustentável com os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) (Al-Tammar & Khalifa, 2022; Mourouzidou, 2023; Fernandes, *et al.*, 2024).

No que diz respeito aos MPCPs, estes constituem uma categoria específica de microrganismos que estabelecem relações benéficas para as plantas, resultando em melhorias significativas no seu crescimento e desenvolvimento (Mourouzidou, 2023), além de representar um manejo cultural de baixo impacto ambiental (Al-Tammar & Khalifa, 2022). Dentre esses microrganismos estão inclusos o grupo das bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCPs) e dos fungos promotores de crescimento em plantas (FPCPs) que exercer influência positiva em uma ampla gama de processos fisiológicos e metabólicos das plantas (Pathania, 2020; Al-Tammar & khalifa, 2022).

No grupo dos BPCPs, destaca-se o gênero *Azospirillum*, conhecido por sua capacidade de fixação biológica de nitrogênio (FBN) atmosférico (Okon, 1985; Galindo *et al.*, 2022). Essa habilidade permite que essas bactérias convertam o nitrogênio do ar em uma forma utilizável pelas plantas, promovendo um suprimento adicional de nitrogênio (N) para o crescimento e desenvolvimento dos vegetais. Esse processo é particularmente benéfico para plantas gramíneas, como milho (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), arroz (*Oryza sativa* L.) e braquiária (*Urochloa brizantha* cv. Marandu), resultando na redução da necessidade de adubação de N (Okon, 1985; Galindo *et al.*, 2022).

Outro benefício para as plantas é a produção de fitohormônios como as auxinas que promove o estímulo para o desenvolvimento radicular, possibilitando com isso uma melhor

absorção de nutrientes e maior resistência das plantas ao estresse hídrico e ambientais (Okon, 1985; Galindo *et al.*, 2022), além do que, possibilita menor dependência de fertilizantes, resultando em uma economia de custos e na redução do impacto ambiental (Yasuda *et al.*, 2022).

Já no grupo dos FPCPs tem destaque o gênero *Trichoderma* pela sua capacidade de colonizar as raízes e promover o crescimento de plantas, além de atuarem como agentes de controle biológico contra patógenos do solo. Eles secretam enzimas que degradam a parede celular dos patógenos, impedindo sua multiplicação e reduzindo o risco de doenças nas plantas de milho (Degani e Dor, 2021; Tyśkiewicz *et al.*, 2022). Contribuem para a melhoria da qualidade do solo pois ajudam a aumentar a matéria orgânica do solo, melhoram a estrutura e aumentam sua capacidade de retenção de água (Schweiger *et al.*, 2021).

Outro ponto de destaque é a técnica da coinoculação, que consiste em associar dois ou mais MPCPs (BPCPs e ou FPCPs) e colocar esses microrganismos de forma simultânea em contato com a planta. Essa técnica tem como objetivo aproveitar os benefícios das interações sinérgicas entre eles e busca potencializar os efeitos positivos desses microrganismos sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas (Barbosa *et al.*, 2022). A coinoculação pode ser realizada durante diversas etapas de desenvolvimento da cultura como diretamente na semente, no solo, no sistema radicular ou parte aérea das plantas como caule e folhas. Isso permite que os microrganismos estabeleçam relação simbiótica ou associativa, assim, fornecendo múltiplos benefícios para as plantas, como supramencionado, sendo que a escolha do local de aplicação dos MPCPs é baseada na compatibilidade dos microrganismos com a cultura e na estratégia de interação desejada (Vishwakarma *et al.*, 2020; Sarkar *et al.*, 2021; Barbosa *et al.*, 2022).

A título de exemplo, diferentes pesquisas demonstram que os MPCPs podem ser uma alternativa viável para melhorar o desempenho agrônômico e produtivo em diferentes culturas agrícolas. Pesquisa, realizada por Fernandes *et al.*, (2021), demonstrou que os tratamentos coinoculados com *Serratia* sp. + pool de *T. asperellum* e *A. brasilense* + pool de *T. asperellum* promoveram incrementos significativos nas variáveis de trocas gasosas e na concentração de nutrientes. Além disso, o tratamento coinoculado com *Azospirillum* sp. *Bacillus* sp. + *A. brasilense* apresentou maiores médias de produção de biomassa comparado aos demais tratamentos, sendo esses valores significativamente diferentes do tratamento controle na cultura do arroz de terras altas.

Silva *et al.*, também conduziram um estudo que mostrou que diferentes MPCPs, quando aplicados isoladamente ou em coinoculação, proporcionaram ganhos de biomassa, trocas gasosas positivas, aumento na absorção de nutrientes na parte aérea e nos grãos, e uma melhor produtividade de grãos e seus componentes em relação às plantas controle. A combinação Ab-V5 + pool de *T. asperellum* destacou-se por proporcionar uma melhoria de 25% no rendimento de grãos na cultura da soja. Adicionalmente estudo conduzido por Fernandes *et al.*, (2021) demonstrou que as coinoculações de microrganismos *Bacillus* sp. + *A. brasilense* e BRM 32114 + pool de *Trichoderma asperellum* foram os tratamentos mais eficazes, aumentando em média 123% e 88% o número de panículas e 206% e 167% a produtividade de grãos do arroz de terras altas, respectivamente.

Outro estudo desenvolvida por Da Anunciação *et al.*, (2024) revelou que a coinoculação com *Bacillus* na cultura do trigo, em condições de campo, proporcionou um aumento de 80% na biomassa seca das raízes em comparação ao controle (ausência de microrganismos), resultando em melhorias significativas no desenvolvimento morfológico e potencial aumento na produtividade do trigo. Exemplo adicional, pesquisa conduzida por Cruz *et al.*, 2023 aponta que diferentes MPCPs quando aplicados em coinoculação promoveram incrementos significativos de 49% na biomassa em plantas de milho, 30% nas trocas gasosas, 36% no teor de macronutrientes e 33% na produtividade. As coinoculações com as associações *Serratia* sp. + *T. koningiopsis*, *Bacillus* sp. + *A. brasilense* e *Serratia* sp. + *Bacillus* sp. promoveram maiores benefícios a cultura do milho.

Conforme trabalho produzido por, que objetivou determinar os efeitos de diferentes MPCPs, em inoculação ou em coinoculação, na produção de biomassa da parte aérea, raiz e total, nas trocas gasosas, no teor de macronutrientes, componentes de produção e produtividade de grãos de plantas de milho, conduzido em casa de vegetação, com avaliação dos microrganismos (*Bacillus* sp.); (*Burkholderia cepacea*); (*Pseudomonas* sp.); (*Serratia marcenses*); (*Serratia* sp.), (*A. brasilense* e *Azospirillum* sp.), um isolado de (*Trichoderma koningiopsis*). Com isso, esses autores sugerem que os microrganismos aplicados em inoculação ou coinoculação promoveram incrementos significativos de 49% na biomassa das plantas de milho, 30% nas trocas gasosas, 36% não teor de macronutrientes e 33% na produtividade. Sendo que as coinoculações *Serratia* sp + *Trichoderma koningiopsis*, *Bacillus* sp. + *A. brasilense* e *Serratia* sp + *Bacillus* sp promoveram maiores benefícios para a cultura do milho.

Outro ponto interessante, mas que ainda precisa de maiores esclarecimentos, é que a coinoculação composta pela associação do *Trichoderma* com *Azospirillum* pode demonstrar

resultados positivos, possivelmente semelhantes aos exemplos supramencionados. No entanto, a literatura ainda carece de informações adicionais sobre o manejo da coinoculação na cultura do milho, especialmente no que se refere à associação de FPCPs e ou BPCPs e também no que se refere a associação *Trichoderma* e *Azospirillum*, e seus possíveis benefícios.

Segundo Oliveira *et al.*, 2022 o FPCPs *Trichoderma* atua como um agente de controle biológico, suprimindo patógenos e estimulando o crescimento radicular das plantas. Por sua vez, a BPCPs *Azospirillum*, promove a FBN e a produção de fitohormônios, resultando em um aumento significativo do crescimento e desenvolvimento das plantas. E Mastan *et al.*, 2021 acrescentam que esse agente biológico pode reduzir a dependência de fertilizantes químicos, o que, por conseguinte, resulta em economia de custos e menor impacto ambiental.

No que diz respeito mais especificamente à cultura do milho, essa é pertencente à família Poaceae, trata-se de um cereal rico em amido e altamente energético, com elevado valor nutricional. Apresenta diversas aplicações, incluindo na alimentação humana e animal, especialmente na avicultura e suinocultura. Além de ser utilizado na produção industrial de biocombustíveis, e de bioplásticos, com os respectivos favorecimentos na descarbonização do planeta e na redução da poluição dos recursos naturais. Além de ser insumo para diversos produtos em diferentes ramos industriais. (De Souza, *et al.*, 2020. Marra, *et al.*, 2024.).

Outro ponto relevante é o fato de ser a cultura agrícola mais produzida no mundo, sendo a única a ultrapassar a produção de um bilhão de toneladas de grãos. As somatórias das produções dos países Estados Unidos, China e Brasil contribuíram com 65% da produção global o equivalente a 1,22 bilhão de toneladas na atual safra 2023/24, conforme sugere Guimarães, 2024. Com produção brasileira estimada em 297,54 Mt e maior exportador do grão sugere Coêlho, 2024. Além da grande altamente relevância para o agronegócio brasileiro é uma das principais culturas produzidas no país apresentando maior diversidade de cultivo com produção em todos os municípios que possuem áreas rurais segundo Guimarães, 2024.

Nas condições climáticas do Brasil, considerando o cultivo sem irrigação suplementar, o milho é tipicamente cultivado em duas safras, conhecidas como safra e safrinha. Apesar da alta produção brasileira, a média de produtividade nacional ainda é baixa devido a fatores desfavoráveis, como eventos climáticos adversos (secas prolongadas e chuvas excessivas), deficiências nutricionais, entre outros fatores apontado por Silva, *et al.*, 2020. Nesse sentido, a coinoculação com MPCPs na cultura do milho, pode ser um manejo cultural eficiente, como

supramencionado e apresentar diferentes benefícios quanto a maior capacidade de superação de condições ambientais adversas, com destaque para superação do estresse hídrico, deficiências nutricionais e desenvolvimento inicial da cultura lento, por exemplo, conforme Da Silva, *et al.*, 2023.

Outro ponto que merece destaque é o reconhecimento da FAO sobre o potencial dos SIPA como uma via sustentável para a produção de alimentos e segurança alimentar no âmbito global. Além de atender à crescente demanda por alimentos, esses sistemas agropecuários oferecem uma opção para a intensificação sustentável de sistemas agrícolas apontado por Basso, 2023 e com bons resultados produtivos incluindo a cultura do milho conforme mencionado por De Queiroz *et al.*, 2021.

De todo modo, destaca-se que o SIPA não é considerado uma novidade temática. Para elucidar, os primeiros sistemas agrários da história humana derivam da revolução agrícola neolítica (Mazoyer; Roudart, 2010). Em seu estado primordial, o SIPA se originou, provavelmente, de uma combinação de objetivos, em que herbívoros domesticados alimentavam-se de vegetais que o homem não conseguia obter proveito. Dessas, os animais convertiam em alimentos (ovos, carne, leite) suscetíveis para o consumo humano, e seus dejetos eram utilizados como fonte de nutrientes necessária para a adubação de cultivos (Anghinoni; Carvalho; Costa, 2013).

Conforme apontado por Carvalho *et al.*, 2024 o SIPA pode ser composto por três componentes principais: i. agrícola ou lavoura, ii. pecuário ou animal e iii. florestal ou arbóreo. Mais especificamente sobre as características específica de cada componente a título de exemplo o componente agrícola pode abranger uma ampla variedade de culturas para diversos fins como alimentícios, fibras ou energia. Assim como, pode ser composto por leguminosas, oleaginosas e culturas energéticas. A inclusão dessas culturas no SIPA é fundamental para garantir maior diversidade biológica, cobertura vegetal do solo, segurança alimentar, dentre outros fins (Carvalho, *et al.*, 2014).

No que diz respeito ao componente animal segundo Carvalho, *et al.*, 2014 e Dos Anjos, *et al.*, 2021, o componente animal pode ser representado por bovinos, bubalinos, equinos, lhamas, suínos, ovinos, caprinos, avestruz, perus, frangos, patos, coelhos, peixes dentre outros. A integração do componente animal no SIPA é essencial para a diversificação e aumento da produtividade do sistema. Além de contribuir para a ciclagem de nutrientes, produção de

excretas, em alguns casos no controle insetos praga além de proporcionar um ambiente mais equilibrado.

Para Carvalho, *et al.*, 2014 o componente florestal ou arbóreo pode incluir espécies nativas ou exóticas, utilizadas para diversos fins. São exemplos árvores, arbustos, palmeiras, bambus, tem como função a produção de madeira e produtos não madeireiros, como resinas, óleos, frutas, dentre outros. Para Teixeira, 2023 as leguminosas arbóreas são importantes para a fixação de nitrogênio no solo, banco de proteína para alimentação animal. E Carvalho, *et al.*, 2014, aponta que as árvores frutíferas contribuem para a diversificação de produtos e aumento da rentabilidade do sistema, promovendo a conservação do solo, o sequestro de carbono e maior biodiversidade a título de exemplo.

São exemplos de arranjos produtivos ou sistemas integrados que podem ser formados: i. lavoura-pecuária ou agropastoril; ii. lavoura-floresta ou silviagrícola; iii. pecuária-floresta ou silvipastoris e iv. lavoura-pecuária-floresta ou agrossilvipastoris (Carvalho, *et al.*, 2014). Além dos possíveis diferentes arranjos dos sistemas integrados, conforme Elejalde *et al.*, 2023 e Palamar, 2023 o SIPA pode proporcionar múltiplos benefícios, tais como diversidade de espécies vegetais, a melhoria da fertilidade do solo e a redução dos processos erosivos, o maior sequestro de carbono, o conforto térmico e o bem-estar animal, bem como o aumento da produção de grãos, carne, leite e produtos madeireiros e não madeireiros em uma mesma área, valorização da propriedade agrícola e diversificação da renda do produtor rural, segurança alimentar e produção de alimentos saudáveis, melhorando a imagem pública dos produtores rurais perante a sociedade, dentre outros benefícios.

Além disso, a título de exemplo, segundo Martins *et al.*, 2015, que conduziram pesquisa em experimento de longa duração, do tipo lavoura-pecuária (sucessão soja/pastagem anual de inverno), com diferentes intensidades de pastejo. Esses autores sugerem que o pastejo moderado na aveia-preta/azevém, com residual médio de 25 cm, lotação contínua e ajuste de carga, proporcionou incremento 48% na renda bruta por ha, durante o período avaliado. Embora com maior custo operacional, mas com menor risco econômico frente às adversidades de condições climáticas principalmente no período do verão.

Bem como, Bonini *et al.*, 2016, em sua pesquisa sugerem que a presença de animais e a presença dos componentes forrageiro e arbóreo podem influenciar atributos químico-físicos do solo, com maiores teores de  $15 \text{ mg dm}^{-3}$  e  $9,42 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de P e Mg na camada de 0–0,20 m,

após 2 anos de implantação dos sistemas, para o tratamento agropastoril diferindo estatisticamente dos demais tratamentos agrossilvipastoris e florestal que obtiveram 9 e 5e mg dm<sup>-3</sup> de P e 7,45 e 6,79 de Mg respectivamente.

Apesar dos benefícios relacionados aos SIPA, sua implementação requer conhecimento técnico, planejamento adequado e integração entre os diferentes atores do setor da produção rural (Basso *et al.*, 2023; Elejalde, 2023). Portanto, é essencial investir em pesquisas que incentivem a adoção dos SIPA, visando desenvolver agroecossistemas sustentáveis (El-Saadony, 2022; Mourouzidou, 2023). Nesse contexto, o estudo do papel dos MPCPs na cultura do milho em ambientes de SIPA é de extrema relevância, dada a crescente demanda por alimentos e o aumento da busca por alimentos saudáveis (El-Saadony, 2022; Mourouzidou, 2023).

Nesse sentido, as hipóteses deste estudo são as seguintes: Capítulo I. a) A literatura existente sobre o uso de MPCPs em SIPA é insuficiente e carece de uma base explicativa robusta; Cap II. a) Os fatores manejo da coinoculação com *Azospirillum* e *Trichoderma* e SIPA podem promover maiores rendimentos morfológicos e produtivos de grãos na cultura do milho; Capítulo III a). O manejo da inoculação e coinoculação com *Azospirillum* e *Trichoderma* pode potencialmente aumentar os rendimentos morfológicos e produtivos de grãos na cultura do milho, tanto em sistema de monocultivo quanto em SIPA.

Diante disso, este estudo teve como objetivo fornecer informações abrangentes sobre os MPCPs, incluindo aspectos gerais, características principais, com foco especial nos microrganismos *Trichoderma* e *Azospirillum*, sua importância para a agricultura, o papel desses microrganismos na cultura do milho, sua aplicação em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) e a prática da coinoculação e avaliar os efeitos da inoculação e da coinoculação (associação *A. brasilense* com *Trichoderma asperellum*) em monocultivo e SIPA na cultura do milho, abrangendo avaliações nos parâmetros morfológicos e de produção de grãos por meio de pesquisas de campo.

## 1.1 REFERÊNCIAS

Al-tammar, F. K., & Khalifa, A. Y. Z. (2022). Plant growth promoting bacteria drive food security. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e267257, <https://doi.org/10.1590/1519-6984.267257>. Baldani *et al.*, 1986.

Anghinoni, I.; Carvalho, P. C. F.; Costa, S. E. V. G. A. Tópicos em Ciência do Solo. In: Araújo, A. P.; Avelar, B. J. R., (Eds.) *Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro...* 8. ed. Viçosa: UFV, 2013. cap. 8, p. 221-278.

Barbosa, J. Z. *et al.*, (2022). Improving yield and health of legume crops via co-inoculation with rhizobia and Trichoderma: A global meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 176. 104493. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104493>. Buso *et al.*, 2021.

Basso, R. F. (2023). Adoção de sistemas integrados de produção agropecuária como estratégia para intensificação sustentável.

Bonini, Carolina dos Santos Batista *et al.*, Produção de forragem e atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 51, p. 1695-1698, 2016.

Carvalho, Paulo César de Faccio *et al.*, Definições e terminologias para sistema integrado de produção agropecuária. *Revista Ciência Agronômica*, v. 45, p. 1040-1046, 2014.

Coelho, Jackson Dantas. MILHO. *Caderno Setorial ETENE*, Fortaleza, v. 9, 2024. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/etene/article/view/2700>. Acesso em: 10 jul. 2024.

Cruz, Dennis RC *et al.*, Use of multifunctional microorganisms in corn crop. *Revista Caatinga*, v. 36, n. 2, p. 349-361, 2023.

Da Silva, J. H. B., da Silva, A. V., da Silva, C. M., Gomes, T. R. V. R., dos Santos Araújo, V. F., Nóbrega, J. S., ... & da Silva Leal, M. P. (2023). Uso de bioestimulantes na cultura do milho (*Zea mays* L.): uma revisão. *Scientific Electronic Archives*, 16(5).

De Queiroz Barbosa, Daniel *et al.*, Composição de plantas invasoras em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária. *Agropecuária Catarinense*, v. 34, n. 3, pág. 33-36, 2021.

De Souza, Willian Cleisson Lopes *et al.*, Aspectos comparativos entre milho (*Zea mays* L.) e sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench): diferenças e semelhanças. *Diversitas Journal*, v. 5, n. 4, p. 2337-2357, 2020.

Degani, O., & Dor, S. (2021). *Trichoderma* Biological Control to Protect Sensitive Maize Hybrids against Late Wilt Disease in the Field. *Journal of Fungi*, 7(4), 315, <https://doi.org/10.3390/jof7040315>.

Dos Anjos, Mariana Moreira *et al.*, Sistemas integrados de produção agropecuária e os efeitos do componente animal. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 16, p. e498101624014-e498101624014, 2021.

Elejalde, Denise Adelaide Gomes *et al.*, Viabilidade econômica em sistema integrado de produção agropecuária. 2023.

El-Saadony, M. T. *et al.*, (2022). Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: Mechanisms, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 13, 923880, <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923880>.

Fernandes, João PT *et al.*, Efeito de microrganismos na performance do arroz de terras altas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, p. 156-162, 2021.

Fernandes, João Pedro Tavares *et al.*, Caracterização fitoagronômica de arroz de terras altas inoculado com mix de microrganismos multifuncionais. *Revista Caatinga*, v. 3, pág. 679-689, 2020.

Fernandes, JPT; Nascente, AS; Carvalho, PC de F.; Dominschek, R.; Santos, FL de S.; DE Moraes, A.; Bier, VA; Silva, DC Microrganismos promotores de crescimento de plantas - *Trichoderma* e *Azospirillum*: otimizando a cultura do milho em sistemas integrados de produção agropecuária. *Contribuciones a las ciencias sociales*, [S. l.], v. 2, pág. e5090, 2024.

Galindo, F. S., Rodrigues W. L., Fernandes G. C., Boleta E. H. M., Jalal A., Rosa P. A. L., Buzetti S., Lavres J., & Filho M. C. M. T. (2022). Enhancing agronomic efficiency and maize grain yield with *Azospirillum brasilense* inoculation under Brazilian savannah conditions. *European Journal of Agronomy*, 134, 126471, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126471>. Gavilanes *et al.*, 2020.

Guimarães, Daniel Pereira. 2024 Artigo: Impactos do clima na atual safra de milho. Disponível em: [ww.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/90138806/artigo-impactos-do-clima-na-atual-safra-de-milho](http://ww.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/90138806/artigo-impactos-do-clima-na-atual-safra-de-milho).

Lemaire G., Franzluebbbers A., Carvalho P. C. de F., & Dedieu B. (2014). Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 4-8, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>.

Marra, Daniel Felipe *et al.*, Um estudo prospectivo da cadeia produtiva do milho no Brasil. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 40, p. 27368, 2024.

Martins, A.; Kunrath, T. R.; Anghinoni, I.; Carvalho, P. C. de F. (eds.). Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil. Porto Alegre: Ufrgs, 2015. (Boletim Técnico, 2. Edição) 102p.

Mastan A., Rane D., Dastager S. G., & Babu C. S. V., (2021). Molecular insights of fungal endophyte co-inoculation with *Trichoderma viride* for the augmentation of forskolin biosynthesis in *Coleus forskohlii*. *Phytochemistry*, 184, 112654, <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112654>.

Mazoyer, M.; Roudart, L. A história das agriculturas no mundo: Do Neolítico à crise contemporânea. São Paulo: UNESP, 2010. 568 p.

Moraes, A. de, Carvalho, P. C. de F., Lustosa, S. B. C., Lang, C. R., & Deiss, L. (2014). Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, 45(5spe), 1024–1031. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500018>.

Mourouzidou, S., Ntinis, G. K., Tsaballa, A., & Monokrousos, N. (2023). Introducing the Power of Plant Growth Promoting Microorganisms in Soilless Systems: A Promising Alternative for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 15, 5959, <https://doi.org/10.3390/su15075959>.

Okon, Y. (1985). *Azospirillum* as a potential inoculant for agriculture. *Trends in Biotechnology*, 3(9), 223-228, [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(85\)90012-5](https://doi.org/10.1016/0167-7799(85)90012-5).

Oliveira, C. E. da S., Jalal, A., Oliveira, J. R., Tamburi, K. V., & Teixeira Filho, M. C. M. (2022). Leaf inoculation of *Azospirillum brasilense* and *Trichoderma harzianum* in hydroponic

arugula improve productive components and plant nutrition and reduce leaf nitrate. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 52, e72755. <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272755>.

Palamar, Natália Giehl. *Da pesquisa ao campo: estudo de tecnologias baseadas no conceito de intensificação sustentável*. 2023.

Pathania P., Rajta A., Singh P. C., & Bhatia R., (2020). Role of plant growth-promoting bacteria in sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 30, 101842 <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101842>.

Pereira, Caroline Nascimento; De Castro, César Nunes. *Expansão da produção agrícola, novas tecnologias de produção, aumento de produtividade e o desnível tecnológico no meio rural*. Texto para Discussão, 2022.

Pereira, Caroline Nascimento; De Castro, César Nunes. *Expansão da produção agrícola, novas tecnologias de produção, aumento de produtividade e o desnível tecnológico no meio rural*. Texto para Discussão, 2022.

Ruthes B. E. S., Kaschuk G., Moraes A. de, Lang C. R., Crestani C. & Oliveira L. B. de. (2023). Soil Microbial Biomass, N Nutrition Index, and Yield of Maize Cultivated Under eucalyptus Shade in Integrated crop-livestock-forestry Systems. *Int. J. Plant Prod.* 17, 323–335, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42106-023-00242-7>.

Sarkar D., Singh S., Parihar M., & Rakshit A. (2021). Seed bio-priming with microbial inoculants: A tailored approach towards improved crop performance, nutritional security, and agricultural sustainability for smallholder farmers. *Current Research in Environmental Sustainability*, <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100093>.

Schweiger, R., Padilla-Arizmendi, F., Nogueira-López, G., Rostás, M., Lawry, R., Brown, C., Hampton, J., Steyaert, J. M., Müller, C., & Mendoza-Mendoza, A. (2021). Insights into Metabolic Changes Caused by the *Trichoderma virens*–Maize Root Interaction. *IS-MPMI* 34(5), 524–537. <https://doi.org/10.1094/MPMI-04-20-0081-R>.

Sgarioni, Thayná Santos. *Sistema alimentar e sustentabilidade ambiental: uma revisão narrativa*. 2021.

Sgarioni, Thayná Santos. *Sistema alimentar e sustentabilidade ambiental: uma revisão narrativa*. 2021.

Silva, L. E. B. *et al.*, Desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays* L.): revisão de literatura. *Diversitas Journal*, v. 5, n. 3, p. 1636-1657, 2020.

Silva, Mariana Aguiar *et al.*, Screening of beneficial microorganisms to improve soybean growth and yield. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 63, p. e20190463, 2020.

Teixeira, Elaine Cristina *et al.*, Sistemas integrados de produção agropecuária com inclusão da leguminosa cratília. 2023.

Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E., & Jaroszuk-Ściseł, J. (2022). Trichoderma: The Current Status of Its Application in Agriculture for the Biocontrol of Fungal Phytopathogens and Stimulation of Plant Growth. *International journal of molecular sciences*, 23(4), 2329. <https://doi.org/10.3390/ijms23042329>.

Valani, G. P., Martíni, A. F., da Silva, L. F. S., Bovi, R. C., & Cooper, M. (2021). Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. *Soil Use and Management*, 37(1), 22-36. <https://doi.org/10.1111/sum.12667>.

Ventura, M. V. A., de Menezes Filho, A. C. P., & Batista-Ventura, H. R. F. (2023). Chemical, physical, and biological attributes of the soil in integrated systems. *Brazilian Journal of Science*, 2(4), 90-98. <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i4.300>.

Vishwakarma, K., Kumar, N., Shandilya, C., Mohapatra, S., Bhayana, S., & Varma, A. (2020). Revisiting Plant-Microbe Interactions and Microbial Consortia Application for Enhancing Sustainable Agriculture: A Review. *Frontiers in Microbiology*, 11, 560406. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.560406>.

Yasuda, M., Dastogeer, K. M., Sarkodee-Addo, E., Tokiwa, C., Isawa, T., Shinozaki, S., & Okazaki, S. (2022). Impact of *Azospirillum* sp. B510 on the rhizosphere microbiome of rice under field conditions. *Agronomy*, 12(6), 1367.

## CAPÍTULO I

### **MICROORGANISMOS PROMOTORES DE CRESCIMENTO DE PLANTAS - *TRICHODERMA* E *AZOSPIRILLUM*: OTIMIZANDO A CULTURA DO MILHO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

### **MICROORGANISMS THAT PROMOTE PLANT GROWTH - *TRICHODERMA* AND *AZOSPIRILLUM*: OPTIMIZING THE CORN CROP INTEGRATED CROP- LIVESTOCK SYSTEMS**

### **MICROORGANISMOS PROMOTORES DEL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS - *TRICHODERMA* Y *AZOSPIRILLUM*: OPTIMIZANDO EL CULTIVO DEL MAÍZ EN SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA**

#### **RESUMO**

Microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCPs) têm surgido como alternativa promissora na busca por uma agricultura sustentável. Este estudo, de caráter teórico, baseou-se em levantamento bibliográfico de natureza exploratória e adotou uma abordagem qualitativa. Seu objetivo é fornecer informações abrangentes sobre os MPCPs, incluindo aspectos gerais, características principais, efeitos diretos e indiretos, com foco especial nos microrganismos *Trichoderma* e *Azospirillum*. Além disso, busca-se discutir os mecanismos de ação desses MPCPs, sua importância para a agricultura, o papel desses microrganismos na cultura do milho, sua aplicação em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) e a prática da coinoculação. Os MPCPs têm demonstrado resultados positivos devido à sua interação específica com as plantas, promovendo ganhos produtivos em diversas culturas, com ênfase na coinoculação, que consiste na associação de dois ou mais MPCPs no intuito de proporcionar maiores benefícios às plantas do que a aplicação isolada do microrganismo. A cultura do milho pode se beneficiar e apresentar ganhos significativos em produtividade ao ser associada ao manejo conservacionista, com destaque para a implementação de SIPA e coinoculações com MPCPs.

**Palavras-chave:** Agricultura sustentável. Produção vegetal. Bioinsumos. Agrosilvicultural. Agrossilvipastoris

## ABSTRACT

Plant growth promoting microorganisms (PGPMs) have emerged as a promising alternative in the search for sustainable agriculture. This theoretical study was based on an exploratory bibliographic survey and adopted a qualitative approach. Its objective is to provide comprehensive information on PGPMs, including general aspects, main characteristics, direct and indirect effects, with a special focus on *Trichoderma* and *Azospirillum* microorganisms. In addition, we seek to discuss the mechanisms of action of these PGPMs, their importance for agriculture, the role of these microorganisms in the corn crop, their application Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS) and the practice of coinoculation. PGPMs have shown positive results due to their specific interaction with plants, promoting productivity gains in several crops, with emphasis on coinoculation, which consists of the association of two or more PGPMs in order to provide greater benefits to plants than the isolated application of the microorganism. The corn crop can benefit and present significant gains in productivity when associated with conservation management, with emphasis on the implementation of ICLS and coinoculations with PGPMs.

**Key words:** Sustainable agriculture. Plant production. Bioinputs. Agroforestry. Agrosilvopastoral.

## RESUMEN

Los microorganismos promotores del crecimiento de las plantas (MPCPs) han surgido como una alternativa prometedora en la búsqueda de una agricultura sostenible. Este estudio, de carácter teórico, se basó en una revisión bibliográfica de naturaleza exploratoria y adoptó un enfoque cualitativo. Su objetivo es proporcionar información integral sobre los MPCPs, incluyendo aspectos generales, características principales, efectos directos e indirectos, con un enfoque especial en los microorganismos *Trichoderma* y *Azospirillum*. Además, se busca discutir los mecanismos de acción de estos MPCPs, su importancia para la agricultura, el papel de estos microorganismos en el cultivo de maíz, su aplicación en Sistemas Integrados de Producción Agropecuaria (SIPA) y la práctica de la coinoculación. Los MPCPs han demostrado resultados positivos debido a su interacción específica con las plantas, promoviendo aumentos productivos en diversos cultivos, con énfasis en la coinoculación, que consiste en la asociación de dos o más MPCPs con el fin de proporcionar mayores beneficios a las plantas que la

aplicación aislada del microorganismo. El cultivo de maíz puede beneficiarse y presentar ganancias significativas en productividad al asociarse con el manejo conservacionista, destacando la implementación de SIPA y coinoculaciones con MPCPs.

**Palabras clave:** Agricultura sostenible. Producción vegetal. Bioinsumos. Agroforestal. Agrosilvopastoril.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos e a necessidade de práticas agrícolas sustentáveis têm despertado o maior interesse na utilização de MPCPs (AL-TAMMAR; KHALIFA, 2022). Esses microrganismos têm se destacado devido aos inúmeros benefícios que proporcionam, incluindo o aumento significativo da produtividade das plantas, além de representarem baixo impacto ambiental em comparação aos métodos convencionais de manejo de culturas (AL-TAMMAR; KHALIFA, 2022).

A diversidade de MPCPs é uma opção promissora para melhorar o manejo produtivo, atendendo à crescente demanda por alimentos e reduzindo os impactos negativos sobre o ambiente, diminuindo a dependência de fertilizantes químicos e defensivos agrícolas (PATHANIA *et al.*, 2020). Assim, a utilização de MPCPs apresenta-se como estratégia promissora para promover a agricultura sustentável, alinhada com as necessidades globais de produção de alimentos (PATHANIA *et al.*, 2020; AL-TAMMAR; KHALIFA, 2022). Dentre os MPCPs, destacam-se as bactérias e os fungos, que estabelecem relações simbióticas ou associativas com as plantas (BLAKE *et al.*, 2021; SHEORAN *et al.*, 2021; MUKHERJEE *et al.*, 2022).

No grupo das bactérias, tem destaque os gêneros *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Bradyrhizobium* e *Bacillus*. I. *Azospirillum*, conhecido por sua capacidade de fixação biológica de nitrogênio -N (FBN), também promove o crescimento vegetal em gramíneas, como o milho (*Zea mays* L.) (SHEORAN *et al.*, 2021) e o trigo (*Triticum aestivum* L.), por exemplo; II. *Rhizobium*, simbiote de leguminosas capaz de estabelecer relação mutualística e fixar o N atmosférico (MWENDA *et al.*, 2023); III. *Pseudomonas*, além de promover o crescimento de plantas, produz substâncias que conferem resistência a patógenos (EL-SAADONY *et al.*, 2022); IV. *Bradyrhizobium* é amplamente conhecido pela FBN em

simbiose com leguminosas, com capacidade de melhorar a absorção de nutrientes e tolerância o estresse abiótico (KLEPA *et al.*, 2021; ZILLI *et al.*, 2021); e *V. Bacillus*: destaca-se pela produção de substâncias bioativas, solubilização de nutrientes, estímulo ao crescimento radicular e supressão de patógenos do solo, contribuindo para o crescimento e proteção das plantas (BLAKE *et al.*, 2021).

Já no grupo dos fungos, tem destaque os gêneros *Trichoderma*, *Glomus* e *Piriformospora indica*. I. *Trichoderma*, que desempenha papel benéfico ao atuar como agente de controle biológico, combatendo patógenos do solo e estimulando o crescimento radicular das plantas (Mukherjee *et al.*, 2022); II. *Glomus* - compreende os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), estabelecendo simbiose com as raízes das plantas e contribuindo para a absorção de nutrientes, principalmente o fósforo (P) (ETESAMI *et al.*, 2021); e III. *Piriformospora indica*, um fungo endofítico que promove o crescimento de plantas e melhora sua resistência a estresses bióticos e abióticos (WU *et al.*, 2022).

Através de diferentes mecanismos, os MPCPs podem promover o crescimento e desenvolvimento das plantas, tornando-as mais resistentes a estresses bióticos e abióticos (PATHANIA *et al.*, 2020). Dentre os diferentes mecanismos que os MPCPs podem promover a FBN (BALDANI *et al.*, 1986; ZEFFA *et al.*, 2019), solubilização do fosfato (KOUR *et al.*, 2020), produção de aminoácidos e fitohormônios (OLIVEIRA *et al.*, 2022) e síntese de sideróforos (KOUR *et al.*, 2020), dentre outros mecanismos que contribuem para um crescimento saudável, maior produtividade e resiliência das plantas em condições de estresse ambientais. (EL-SAADONY *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2022).

Compreender e selecionar os MPCPs mais eficazes para cada cultura e ambiente de cultivo são fundamentais para avançar em direção a uma agricultura sustentável (GLICK, 2012; MOUROUZIDOU *et al.*, 2023; OLANREWAJU *et al.*, 2017). Em relação ao ambiente de cultivo e às condições ambientais, os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) têm demonstrado ser alternativa viável, de base produtiva sustentável, apresentando plantas mais resilientes comparado ao modelo convencional de produção (CARVALHO *et al.*, 2010; LEMAIRE *et al.*, 2014). O SIPA são agroecossistemas de base sustentável que visam maiores benefícios nos eixos ambiental, econômico e social. Esses agroecossistemas são mais resilientes quando comparados à agricultura convencional, porque exploram os benefícios das interações sinérgicas entre diferentes componentes como por exemplo lavoura, pecuária e floresta (CARVALHO *et al.*, 2010; LEMAIRE *et al.*, 2014). Os princípios agroecológicos empregados

no SIPA são de base ecológica sustentável. A fim de ilustração, destacamos a diversificação de espécies vegetais, o melhor manejo de entomo e fitopatógenos de forma natural, o melhor aproveitamento da água em quantidade e qualidade dentre outros (FAS, 2021). Outro benefício é a exploração de atividades produtivas diversificadas e integradas em diferentes escalas espaço-temporais (CARVALHO *et al.*, 2010; LEMAIRE *et al.*, 2014).

A cultura do milho (*Zea mays* L.) é plantada significativamente em todo o mundo, em uma ampla gama de condições climáticas de tipos de solo (ABREU *et al.*, 2022; ERENSTEIN *et al.*, 2022; ROMERO FLORES *et al.*, 2023). Há alta demanda mundial pela cultura, com elevada importância para a segurança alimentar e para agronegócio global (ERENSTEIN *et al.*, 2022). Os principais países produtores da cultura do milho são Estados Unidos, China, Brasil (USDA, 2022). Sua área plantada tem aumentado constantemente, impulsionada pela demanda crescente para alimentação humana e animal, biocombustíveis, óleo, amido, xarope, bioplásticos, entre outras finalidades (ABREU *et al.*, 2022, ROMERO FLORES *et al.*, 2023). É uma cultura versátil, capaz de se adaptar a diferentes sistemas de produção, desempenhando papel importante na rotação de culturas, recuperação de pastagens degradadas e na sustentabilidade agrícola (ROMERO FLORES *et al.*, 2023). Suas características gerais, como alto potencial de produtividade, adaptabilidade a diferentes ambientes produtivos e produção de grãos com valor nutricional elevado, acarreta em um papel estratégico na segurança alimentar e no desenvolvimento socioeconômico (ROMERO FLORES *et al.*, 2023).

Para o agronegócio brasileiro, a cultura do milho desempenha função essencial, sendo amplamente cultivada no país (ABREU *et al.*, 2022; ERENSTEIN *et al.*, 2022; ROMERO FLORES *et al.*, 2023). Visando uma produção sustentável da cultura do milho a adoção de MPCPs no manejo produtivo da cultura proporciona diversos benefícios como menor dependência de insumos, maior resistência a pragas, a condições adversas de solo e clima, além de maior produção de grãos por hectare, por exemplo (AL-TAMMAR; KHALIFA, 2022; EL-SAADONY., 2022; MOUROUZIDOU, 2023).

Na busca por uma produção agropecuária sustentável, além dos MPCPs os SIPA são sistemas produção agropecuária que buscam promover a eficiência e a sustentabilidade na produção rural, por meio de agroecossistemas que se beneficiam da integração sinérgica de diferentes componentes produtivos como o vegetal, animal e florestal, (MORAES *et al.*, 2014; VALANI *et al.*, 2020), visando otimizar o uso dos recursos naturais, ao promover a diversificação e minimizando os impactos negativos no ambiente (MORAES *et al.*, 2014;

VALANI *et al.*, 2020), além de promover o manejo e produção de alimentos saudáveis, a conservação dos recursos naturais e a melhoria da qualidade de vida das comunidades rurais (LEMAIRE *et al.*, 2014; PUECH; STARK 2023).

Esses agroecossistemas de base produtiva sustentável promovem múltiplos benefícios, a saber, maior diversidade de espécies vegetais, melhoria na fertilidade do solo, controle para o não desenvolvimento do processo erosivo do solo, maior sequestro de carbono (MORAES *et al.*, 2014; RUTHES *et al.*, 2023; VENTURA *et al.*, 2023), maior diversificação da renda do produtor rural, contribuindo para a segurança alimentar, a produção de alimentos saudáveis e a valorização da propriedade agrícola (FAZ, 2021).

Entretanto, a implementação de SIPA requer conhecimento técnico, planejamento adequado e integração entre os diferentes atores do setor da produção rural (FAZ, 2021). Portanto, é essencial investir em pesquisa que incentivem a adoção dos SIPA, objetivando desenvolver agroecossistemas sustentáveis (EL-SAADONY, 2022; MOUROUZIDOU, 2023). Nesse contexto, o estudo do papel dos MPCPs na cultura do milho em ambiente de SIPA é de extrema relevância, dada a crescente demanda por alimentos e a busca cada vez maior por alimentos saudáveis (EL-SAADONY, 2022; MOUROUZIDOU, 2023).

Assim, entender as principais características dos grupos de MPCPs, sua relevância em diferentes culturas e na cultura do milho, bem como em ambiente produtivo do SIPA é de grande importância. Diante dessas considerações, esta revisão de literatura tem como objetivo fornecer informações relevantes sobre MPCPs, suas principais características, com ênfase nos microrganismos *Trichoderma* e *Azospirillum*, seus efeitos e benefícios para as plantas, assim como sua aplicação na cultura do milho, em conjunto com práticas de manejo utilizando MPCPs em SIPA.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Este artigo científico adota uma perspectiva metodológica com base nos pressupostos teóricos da pesquisa bibliográfica de caráter exploratório de abordagem qualitativa, de revisão de literatura do tipo narrativa, conforme PEREIRA *et al.*, (2018). A pesquisa consiste principalmente na análise crítica de informações disponíveis na literatura, buscando identificar as principais ideias e conceitos sobre o tema em questão. A coleta de dados teve como fonte principal a consulta em artigos científicos obtidos por meio da plataforma e da base de dados

acadêmica do Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar. A seleção dos artigos foi realizada com base na relevância e pertinência para o tema da pesquisa. No processo de busca dos artigos, foram utilizadas palavras-chave relacionadas aos MPCPs, como "bactérias promotoras de crescimento vegetal" (BPCVs), "fungos promotores de crescimento vegetal" (FPCVs), entre outras. Essas palavras-chave foram utilizadas em combinação para refinar os resultados da pesquisa e obter um conjunto relevante de artigos científicos.

Ao longo da pesquisa bibliográfica, foram analisados artigos que abrangem um período amplo, desde 1985 até 2023. As citações mais antigas foram utilizadas principalmente para a conceituação e caracterização dos temas avaliados, enquanto as citações mais recentes foram utilizadas para apresentar resultados de pesquisas recentes, ideias e perspectivas atuais sobre o tema abordado.

Após a seleção dos artigos relevantes, as informações foram analisadas e sintetizadas de forma a construir uma revisão narrativa de literatura coerente e abrangente sobre os MPCPs, com ênfase nos microrganismos *Trichoderma* e *Azospirillum* e sua aplicação na cultura do milho em ambientes de SIPA.

Embora esta pesquisa bibliográfica forneça informações e conhecimentos relevantes, é importante ressaltar que a aplicação prática dos MPCPs em ambientes de produção agrícola pode exigir estudos adicionais e experimentos específicos. Portanto, este artigo científico serve como base teórica e informativa para o entendimento e a exploração dos MPCPs, mas não substitui a necessidade de experimentos e pesquisas aplicadas para a validação e implementação dessas práticas em agroecossistemas sustentável.

### 3 DISCUSSÕES

#### **Características gerais dos microrganismos promotores de crescimento vegetal**

Os MPCPs são uma categoria específica de microrganismos que estabelecem relações benéficas com os vegetais, resultando em melhorias significativas no crescimento e desenvolvimento plantas (EL-SAADONY, 2022; MOUROUZIDOU, 2023, DA ANUNCIAÇÃO *et al.*, 2024). Esses microrganismos podem incluir as bactérias, dentre as quais merecem destaque os gêneros *Azospirillum*, *Bacillus*, *Bradyrhizobium*, *Pseudomonas* e *Rhizobium*. Já no grupo dos fungos ressaltamos os gêneros *Trichoderma*, *Glomus* e a espécie

*P. indica*, exercendo influência positiva em uma ampla gama de processos fisiológicos e metabólicos das plantas (PATHANIA, 2020; AL-TAMMAR, 2022).

No grupo dos FPCVs, destacam-se os gêneros *Trichoderma*, *Glomus* e a espécie *P. indica* supramencionados (ETESAMI *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2022; DÍAZ-URBANO *et al.*, 2023). Esses gêneros têm capacidade de atuar como agentes de controle biológico, estimular o crescimento radicular, promover a absorção de nutrientes, aumentar a resistência das plantas a estresses bióticos e abióticos, o que, dentre outros benefícios, torna esses agentes valiosos aliados na busca por uma agricultura sustentável e no manejo eficiente de culturas.

Com capacidade para interagir com as plantas de diferentes maneiras, esses microrganismos podem estabelecer relação simbióticas, associativas, além de estabelecer comunicação intercelular, mediada por uma variedade de mecanismos bioquímicos e moleculares (OLANREWAJU, 2017). Na rizosfera, região do solo próximo as raízes, eles desenvolvem relação simbiótica ou associativa, e também podem colonizar os tecidos internos das plantas ou até mesmo a superfície externa das folhas (TRIVEDI *et al.*, 2020; SANTOYO *et al.*, 2021).

### **Características gerais dos principais gêneros de BPCPs**

As bactérias do gênero *Azospirillum* são conhecidas por sua capacidade de fixação biológica de nitrogênio (FBN) atmosférico (BALDANI *et al.*, 1986; ZEFFA *et al.*, 2019), habilidade esta que permite que essas bactérias convertam o N do ar em uma forma utilizável pelas plantas, promovendo suprimento adicional de N para o crescimento e desenvolvimento dos vegetais, sendo particularmente benéfico para plantas gramíneas, como as culturas do milho, trigo, arroz (*Oryza sativa* L.) e brachiaria (*Urochloa brizanta* cv. Marandu), por exemplo, resultando, por conseguinte, na redução da necessidade de fertilizantes (OKON, 1985; BALDANI *et al.*, 1986; ZEFFA *et al.*, 2019; GALINDO *et al.*, 2022). Outro benefício para as plantas é a produção de fitohormônios que promove o estímulo para o desenvolvimento radicular, possibilitando com isso uma melhor absorção de nutrientes e maior resistência das plantas ao estresse hídrico (OKON, 1985; BALDANI *et al.*, 1986; GALINDO *et al.*, 2022; ZEFFA *et al.*, 2019).

Na sequência, destacamos o gênero *Bacillus* e sua contribuição para o crescimento e

proteção das plantas de diferentes formas. Esse microrganismo produz substâncias bioativas, contribui para melhor absorção de nutrientes pelas plantas - principalmente o P pela solubilização de fosfato, síntese de fitohormônios tal como o ácido indol acético (AIA), como estímulo ao desenvolvimento radicular, além de suprimir os fitopatógenos do solo (BLAKE *et al.*, 2021).

Amplamente conhecido pela FBN em simbiose com leguminosas, o gênero *Bradyrhizobium* apresenta capacidade de fixar N e contribuir para uma maior tolerância das plantas ao estresse abiótico (KLEPA *et al.*, 2021; ZILLI *et al.*, 2021). Essa bactéria forma simbiose com leguminosas, como o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e a soja (*Glycine max* L.) (NGWENYA *et al.*, 2022). Além da FBN, o *Bradyrhizobium* também promove o crescimento de plantas através da produção de fitohormônios e enzimas que contribuem para uma melhor absorção de nutrientes pelas raízes das plantas. O uso dessa bactéria resulta em maior produtividade das culturas e redução da necessidade de fertilizantes nitrogenados (NGWENYA *et al.*, 2022).

Além disso, outro gênero de importância as *Pseudomonas* também podem promover o crescimento de plantas e conferir resistência a patógenos (SINGHA *et al.*, 2022). Essas bactérias produzem substâncias que atuam como agentes de biocontrole, inibindo o crescimento de patógenos do solo e protegendo as plantas contra doenças com produção de metabólitos secundários que conferem resistência a fitopatógenos e fortalecem o sistema de defesa das plantas (SINGHA *et al.*, 2022; KOZA *et al.*, 2022). A fim de ilustração, a *P. fluorescens* pode ajudar a suprimir doenças causadas por fungos patogênicos, pois atua como antagonista, competindo com os fitopatógenos por recursos e produzindo metabólitos antimicrobianos que inibem o crescimento daqueles (GADE; KOCHE, 2022). Ainda, ela possui uma ampla gama de aplicação em diversas culturas como tomate (*Solanum lycopersicum* L.), batata (*Solanum tuberosum* L.) e alface (*Lactuca sativa* L.) (MEI *et al.*, 2023). Dessa forma, a utilização de *Pseudomonas* contribui para a redução do uso de fungicidas químicos e para a produção de alimentos sustentáveis (COCHARD *et al.*, 2022; GADE; KOCHE, 2022).

Outro gênero de bastante relevância é o *Rhizobium*, capaz de estabelecer relação simbiótica com leguminosas. Dentre as culturas com as quais esse FPCPs exerce relação benéfica, destaca-se por exemplo as culturas do feijão (ATHUL *et al.*, 2022), soja (DOBO, 2022), ervilha (*Pisum sativum*) (YANG *et al.*, 2022) e amendoim (*Arachis hypogaea*) (LIMA *et al.*, 2022). Essa relação mutualística resulta na formação de estruturas nas raízes das plantas

chamadas de nódulos, onde as bactérias fixam o N atmosférico em troca de compostos orgânicos fornecidos pelas plantas (MAHMUD *et al.*, 2020). Essa simbiose entre *Rhizobium* e leguminosas é uma estratégia eficiente de obtenção de N beneficiando tanto as plantas, quanto as bactérias. Através da formação de nódulos nas raízes das plantas, o *Rhizobium* fixa o N atmosférico e o disponibiliza para a planta (YANG *et al.*, 2022). Isso resulta em um suprimento adequado de N, reduzindo a necessidade de adubação nitrogenada (ATHUL *et al.*, 2022).

### **Características gerais dos principais gêneros dos FPCPs**

Dentre os FPCPs o gênero *Trichoderma* é reconhecido por apresentar capacidade de atuar como agente de controle biológico, combatendo patógenos do solo que podem causar doenças em plantas (MUKHERJEE *et al.*, 2022). Através da produção de enzimas antifúngicas, é capaz de suprimir o crescimento de organismos prejudiciais, protegendo assim as raízes e o sistema radicular das plantas (MUKHERJEE *et al.*, 2022). Ele também estimula o crescimento radicular das plantas, promovendo melhor absorção de nutrientes e água do solo em culturas como milho, trigo e arroz (*Oryza sativa* L.) (MATAR *et al.*, 2022; DÍAZ-URBANO *et al.*, 2023).

Já na classe dos FMAs, o gênero *Glomus* estabelece simbiose com as raízes das plantas como milho, trigo e arroz. Esse gênero forma estruturas chamadas micorrizas, que consistem em uma associação mutualística das hifas do fungo com as raízes das plantas (ZHOU *et al.*, 2020; DOWARAH *et al.*, 2022; TOSI *et al.*, 2023). Essa simbiose proporciona aumento significativo na capacidade da planta em absorver nutrientes, principalmente P, presente no solo (ETESAMI *et al.*, 2021), melhoria na estrutura do solo, maior capacidade de retenção de água e promoção de um ambiente favorável para o crescimento de plantas (ETESAMI *et al.*, 2021; TOSI *et al.*, 2023). As culturas do milho, trigo e soja quando em associação com FMAs apresentaram maior biomassa seca: 16,67%, 42,20% e 22,18%, respectivamente, em comparação com o tratamento controle sem associação com FMAs (DOBO, 2022).

Com capacidade de promover o crescimento de plantas e melhorar sua resistência a diferentes estresses, a espécie *P. indica*, fungo endofítico - termo que refere a microrganismos que vivem dentro dos tecidos de plantas sem causar doenças ou sintomas visíveis de infecção (WU *et al.*, 2022; DÍAZ-URBANO *et al.*, 2023) - também é capaz de induzir a produção de fitohormônios, como auxinas e giberelinas, produzindo melhores condições para o crescimento

de culturas como milho, trigo e o arroz (GRABKA *et al.*, 2022). Outro papel relevante é na ativação do sistema de defesa das plantas, conferindo-lhes maior resistência a patógenos e estresses abióticos, como estresse hídrico e salinidade (WU *et al.*, 2022).

### **Ambiente edáfico de desenvolvimento dos MPCPs**

Os MPCPs habitam diferentes ambientes edáficos como o terrestre, aquático ou em associação/simbiose com plantas (endofíticos). Para que esses microrganismos possam colonizar esses ambientes edáficos é necessário condições e características específicas relacionadas às condições ambientais, como disponibilidade de nutrientes e pH do solo, temperatura e umidade, entre outras (ABDUL RAHMAN *et al.*, 2021).

No ambiente edáfico terrestre esses microrganismos colonizam a região da rizosfera estabelecendo relação simbiótica ou associativa (KUMAWAT *et al.*, 2022). Em ambientes aquáticos como lagos, rios, oceanos, ou mesmo em sistemas de aquicultura, esses microrganismos interagem com as plantas contribuindo para o seu desenvolvimento, como, por exemplo, o gênero *Spirulina* que é um tipo de cianobactéria capaz de promover o melhor crescimento de plantas de ambiente aquático (KHOLSSI *et al.*, 2021).

Outro exemplo de ambiente/colonização é a formação de uma microbiota específica em diferentes tecidos vegetais, pois esses microrganismos colonizam os tecidos internos de folhas, caules e raízes das plantas exercendo efeitos benéficos como maior resistência a estresses ambientais e melhoria no desenvolvimento de plantas (KUMAWAT *et al.*, 2022). Dentre esses microrganismos, as bactérias que atuam na FBN (diazotróficas) associam-se intimamente com as raízes das plantas, formando estruturas denominadas de nódulos. Dentre os principais gêneros de bactérias que atuam na FBN destacam-se o *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium*, *Sinorhizobium* e *Mesorhizobium*. Com a utilização desses agentes biológicos pode-se dispensar total ou parcialmente a utilização de fertilizantes nitrogenados, devido ao incremento em N proporcionado por esses agentes biológicos, minimizando assim os possíveis impactos ambientais decorrentes da utilização de fertilizantes sintéticos (JUNIOR *et al.*, 2023). Assim como, o gênero *Trichoderma*, fungo micorrízico que se associa com as plantas, contribuindo para a absorção de nutrientes, proteção contra patógenos e promoção do estímulo fitohormonal das plantas (TRIVEDI *et al.*, 2020; DOWARAH *et al.*, 2022).

## **Efeitos dos MPCPS**

Os efeitos dos MPCPs podem ser divididos em diretos e indiretos. Essas duas categorias descrevem os diferentes impactos dos MPCPs na sua relação com as plantas (ARORA *et al.*, 2013; LI *et al.*, 2020). Dentre os efeitos diretos, destacam-se a produção de sideróforos e fitohormônios, FBN, solubilização de fosfato e produção de biofilme. Já os efeitos indiretos são o biocontrole de pragas e doenças e ativação do sistema de alerta das plantas.

### **Efeitos Diretos**

#### **Produção de sideróforos**

Diversos gêneros bacterianos, como *Pseudomonas*, *Bacillus* e *Azotobacter*, são capazes de produzir sideróforos. Os sideróforos são moléculas de baixo peso molecular que possuem afinidade pelo P-Fe. Essas moléculas de sideróforos têm a capacidade de se ligar ao Fe, formando um complexo sideróforo-Fe solúvel. Essa interação permite que as bactérias solubilizem o P-Fe inacessível e o tornem disponível para as plantas sendo utilizado por elas em diversos processos fisiológicos vitais, como a síntese de clorofila e a ativação de enzimas (LI *et al.*, 2020; REZENDE, 2023).

#### **Produção de fitohormônios**

Os fitohormônios, também conhecidos como hormônios vegetais, desempenham um papel crucial no crescimento e desenvolvimento das plantas. BPCPs e FPCPs são capazes de produzir e liberar fitohormônios, contribuindo para o crescimento radicular, aumentando a absorção de nutrientes, melhorando a tolerância ao estresse e promovendo um crescimento vegetal vigoroso e equilibrado. Dentre os fitohormônios, destacamos o grupo das auxinas, citocininas e giberelinas (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

As auxinas desempenham papel fundamental no crescimento e desenvolvimento das plantas, como estímulo à divisão celular, alongamento das células e a formação de raízes laterais, por exemplo, sendo o ácido indolacético (AIA) a auxina natural mais encontrada nos vegetais. Algumas bactérias do gênero *Azospirillum* são capazes de produzir auxinas, auxiliando no desenvolvimento radicular e no crescimento vegetativo das plantas (VEJAN *et al.*, 2016; ENESPA *et al.*, 2020; SHEORAN *et al.*, 2021; OROZCO-MOSQUEDA *et al.*, 2023).

Já as citocininas promovem a divisão celular e a diferenciação de tecidos de vegetais, como formação de brotos laterais na quebra da dominância apical e na promoção da proliferação celular em geral. Algumas bactérias, como as do gênero *Bacillus*, são conhecidas por produzir citocininas, contribuindo para o crescimento vigoroso das plantas (VEJAN *et al.*, 2016; OROZCO-MOSQUEDA *et al.*, 2023).

Quanto às giberelinas, elas estão relacionadas ao alongamento caulinar, germinação de sementes, florescimento e desenvolvimento de frutos. Algumas bactérias, como o gênero *Pseudomonas*, são capazes de produzir giberelinas, auxiliando no crescimento vegetal e desenvolvimento de plantas saudáveis (MENDONÇA 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

### **Fixação Biológica de Nitrogênio**

A FBN é um processo vital para a nutrição das plantas, no qual certas bactérias têm a capacidade de converter o N atmosférico em uma forma utilizável pelas plantas. Esse processo ocorre por meio da simbiose entre as bactérias fixadoras de N e as plantas hospedeiras. A FBN é um processo de grande importância na agricultura sustentável, pois reduz a necessidade da adubação nitrogenada, que têm um impacto ambiental significativo. A utilização de bactérias fixadoras de N pode melhorar a fertilidade do solo, reduzir os custos de produção e contribuir para o desenvolvimento de culturas mais saudáveis e produtivas (KLEPA *et al.*, 2021; ZILLI *et al.*, 2021)

A FBN é desenvolvida em organismos que apresentem um complexo proteico enzimático nitrogenase. Este complexo apresenta uma série de reações redox através de complexos proteicos formados por Fe e molibdênio, capaz de reduzir o nitrogênio atmosférico (N<sub>2</sub>) para a forma inorgânica combinada, a amônia (NH<sub>3</sub>), em formas disponíveis para plantas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006)

As bactérias fixadoras de N, como as do gênero *Rhizobium*, estabelecem uma relação simbiótica com as raízes de leguminosas, como feijão, soja e ervilha. Nessa interação, as bactérias formam nódulos nas raízes das plantas, onde ocorre a FBN dentro dos nódulos, uma vez que as bactérias possuem enzimas especiais chamadas nitrogenases, que são capazes de converter o N atmosférico (N<sub>2</sub>) em amônia (NH<sub>3</sub>), um composto nitrogenado que as plantas podem assimilar e utilizar para seu crescimento e desenvolvimento (KLEPA *et al.*, 2021; ZILLI

*et al.*, 2021).

Essa interação simbiótica beneficia tanto as bactérias fixadoras de N quanto as plantas hospedeiras. As bactérias fornecem às plantas uma fonte adicional de N, nutriente essencial para a síntese de proteínas e outros compostos vitais. Por sua vez, as plantas fornecem às bactérias um ambiente favorável e nutrientes necessários para seu crescimento e sobrevivência (KLEPA *et al.*, 2021; ZILLI *et al.*, 2021).

Além da FBN em leguminosas, existem outras bactérias, como as do gênero *Azospirillum*, que são capazes de fixar N de forma livre, sem a necessidade de uma associação simbiótica com as plantas. Essas bactérias colonizam as raízes das plantas e, por meio de mecanismos ainda não completamente compreendidos, fornecem N para as plantas (HARDOIM *et al.*, 2015, YASUDA *et al.*, 2022).

### **Solubilização de fosfato**

As bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF) são especialmente importantes em solos com baixa disponibilidade de P, uma situação comum em muitas áreas agrícolas. Ao solubilizar o fosfato, essas bactérias aumentam a disponibilidade desse nutriente para as plantas, melhorando sua nutrição e seu crescimento (LI *et al.*, 2020).

O P é um dos nutrientes essenciais para o crescimento de plantas, sendo que em muitas vezes esse nutriente está presente no solo na forma de fosfato insolúvel, que não pode ser diretamente assimilado pelas raízes das plantas (LI *et al.*, 2020).

As BSF possuem a capacidade de converter o fosfato insolúvel em uma forma solúvel e assimilável pelas plantas. Essas bactérias produzem enzimas, como as fosfatases, que quebram os compostos de fosfato insolúvel em fosfato solúvel (LI *et al.*, 2020).

Diversos gêneros bacterianos, como *Pseudomonas*, *Bacillus* e *Enterobacter*, são conhecidos por sua capacidade de solubilizar fosfato. Essas bactérias secretam ácidos orgânicos, como ácido cítrico, ácido málico e ácido oxálico, que contribuem para a solubilização do fosfato insolúvel no solo (REZENDE, 2023).

Além da solubilização de fosfato, algumas bactérias também podem desempenhar um papel adicional na disponibilização de P para as plantas, podendo formar complexos com o P

solubilizado, protegendo-o da precipitação e tornando-o mais acessível para as raízes das plantas (REZENDE, 2023).

A solubilização de fosfato é um dos mecanismos pelos quais esses microrganismos podem melhorar a disponibilidade de P e, conseqüentemente, o crescimento e desenvolvimento das plantas. Essa interação benéfica é de grande interesse na agricultura sustentável, pois reduz a dependência de fertilizantes fosfatados sintéticos, que têm um impacto ambiental significativo (REZENDE, 2023).

### **Produção de Biofilme**

O biofilme é uma comunidade microbiana complexa composta por microrganismos aderidos a uma superfície sólida, como as raízes das plantas, o solo ou as estruturas vegetais. Essa comunidade é envolta por uma matriz polissacarídica produzida pelos próprios microrganismos, formando uma estrutura tridimensional, e que desempenha papel crucial na ecologia microbiana do solo e nas interações com as plantas (REZENDE, 2023).

Essas comunidades microbianas aderidas oferecem vantagens para os microrganismos que as compõem, como a proteção contra estresses ambientais, o compartilhamento de nutrientes e a capacidade de realizar funções metabólicas complexas. No contexto da agricultura, os biofilmes têm um impacto significativo na promoção do crescimento de plantas. Eles podem abrigar microrganismos benéficos, como os gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Bruxhoderia* e *Serratia* e FMAs, que interagem de forma simbiótica com as raízes das plantas (REZENDE, 2023).

Dentre os diversos benefícios às plantas, o biofilme fornece substâncias que estimulam o crescimento das raízes, facilitam a absorção de nutrientes, aumentam a resistência a patógenos e melhoram a tolerância ao estresse abiótico, assim como a presença de biofilmes nas raízes das plantas pode proteger contra a colonização por microrganismos patogênicos, formando uma barreira física e química que impede a entrada desses patógenos nas plantas (BASU *et al.*, 2021).

A formação e o desenvolvimento dos biofilmes são influenciados por diversos fatores, como a composição química do solo, a presença de exsudatos radiculares e a interação entre os microrganismos presentes. Compreender e manejar esses biofilmes é fundamental para

maximizar seus benefícios para o crescimento de plantas, o conhecimento sobre a formação, a composição e a função dos biofilmes podem ser aplicadas no manejo do solo e no desenvolvimento de estratégias de inoculação microbiana para melhorar o crescimento, a saúde e a produtividade das plantas (BASU *et al.*, 2021).

## **Efeitos indiretos**

### **Biocontrole de organismos espontâneos**

Diversos MPCPs podem ser utilizados como agentes de biocontrole de organismos nocivos para plantas, desempenhando papel de bioinseticida ou biofungicida. Esses organismos benéficos podem ser aplicados diretamente no solo, nas raízes ou aérea de plantas assim como no tratamento de sementes, flores e frutos (FERNANDES *et al.*, 2023).

Um exemplo de biofungicida é o fungo *Trichoderma harzianum*, eficiente no controle de patógenos alvo como *Fusarium*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Macrophomina*, *Sclerotinia*, *Sclerotium*, *Botrytis* e *Crinipellis*. Outro organismo são as bactérias benéficas entomopatogênicas *Metarhizium anisopliae*, *Beauveria bassiana* e *Bacillus thuringiensis*, utilizadas para o controle de insetos espontâneos, com diversos trabalhos demonstrando resultados significativos para o melhor desempenho das culturas cebola (*Allium cepa* L.), fumo (*Nicotiana tabacum* L.), feijão, soja entre outras (NASCIMENTO, 2022).

### **Ativação do Sistema de Alerta das Plantas**

Um dos efeitos indiretos é a capacidade dos microrganismos de ativar o sistema de alerta das plantas, conhecido como sistema de defesa induzida, desencadeando respostas de defesa nas plantas, estimulando a produção de substâncias químicas de defesa, como fitoalexinas, que têm ação antimicrobiana. Essas substâncias podem ajudar a proteger as plantas contra patógenos, reduzindo a suscetibilidade a doenças (WU *et al.*, 2022; STOCKMANS, 2023).

Elas podem produzir metabólitos secundários que têm propriedades antifúngicas e antibacterianas. Essas substâncias podem inibir o crescimento de patógenos e pragas, limitando sua capacidade de causar danos às plantas. Um exemplo prático desses efeitos é obtido com a utilização das bactérias dos gêneros *Pseudomonas* e *Bacillus*. Essas bactérias produzem

compostos antimicrobianos e enzimas que podem inibir o crescimento de fungos fitopatogênicos, protegendo as plantas contra doenças (WU *et al.*, 2022; STOCKMANS, 2023).

### **Benefícios causados pelos MPCPs**

A utilização de MPCPs tem se mostrado uma estratégia promissora na agricultura moderna, trazendo uma série de benefícios tanto para as plantas cultivadas quanto para o meio ambiente. Dentre os principais benefícios associados à utilização desses microrganismos, destacam-se a melhoria do desempenho produtivo, sanidade vegetal, e a redução do uso de fertilizantes químicos (AL-TAMMAR; KHALIFA, 2022).

A melhoria da sanidade vegetal é um dos principais benefícios proporcionados pelos MPCPs, devido a estímulos na capacidade de induzir respostas de defesa nas plantas, fortalecendo seu sistema imune e tornando-as mais resistentes a organismos espontâneos, assim como, maior produção de substâncias antimicrobianas que inibem o crescimento de patógenos do solo, contribuindo para a sanidade das plantas (TIKU, 2020; TRIVEDI *et al.*, 2020; ABDELAAL *et al.*, 2021; SINGHA *et al.*, 2022).

Outro benefício está relacionado a redução do uso de fertilizantes químicos. Isso ocorre devido a melhora na absorção e maior disponibilidade de nutrientes no solo, permitindo que as plantas os obtenham de forma mais eficiente. Isso resulta em uma menor dependência de fertilizantes sintéticos, reduzindo os custos de produção e minimizando os impactos negativos desses insumos como contaminantes da água e/ou solo (RAWAT *et al.*, 2021; AL-TAMMAR; KHALIFA, 2022).

Assim como, é fato positivo a redução da contaminação ambiental devida à redução na utilização de pesticidas, por consequência, menor contaminação do solo, da água e do ar, o que contribui para a preservação dos ecossistemas naturais e para a proteção da saúde humana (PATHANIA *et al.*, 2020; AL-TAMMAR; KHALIFA, 2022).

### **O gênero *Trichoderma* e espécies relevantes**

Pertencentes à classe dos Ascomycota e à ordem Hypocreales o gênero *Trichoderma* é composto por grupo de fungos do tipo filamentosos (SAMUELS, 1996; SCHUSTER;

SCHMOLL, 2010; TYŚKIEWICZ *et al.*, 2022). São amplamente distribuídos na natureza e podem ser encontrados nos mais diversos habitats (SCHUSTER; SCHMOLL, 2010; TYŚKIEWICZ *et al.*, 2022). A morfologia desse gênero é caracterizada por hifas septadas, filamentos alongados compostos por células com divisões transversais, com ramificações que formam uma rede complexa, permitindo uma ampla colonização dos substratos (ZIN; BADALUDDIN, 2020).

Apresenta como característica a produção de conídios, que são estruturas reprodutivas assexuadas. São geralmente unicelulares, podendo ser ovais, elipsoides ou fusiformes. Essas estruturas são produzidas em grande quantidade e são facilmente dispersadas pelo ar e por outros meios, contribuindo para a disseminação desse microrganismo (SAMUELS, 2006).

Tem grande tolerância a condições adversas podendo sobreviver em diferentes condições ambientais, incluindo altas temperaturas, baixa disponibilidade de nutrientes e estresses abióticos. Essa tolerância permite que colonizem uma ampla variedade de habitats e se adaptem a diferentes ambientes, além de estabelecerem interações complexas com o ambiente em que estão presentes (SAMUELS, 2006; ZIN; BADALUDDIN, 2020).

São conhecidos por sua capacidade de competir com outros microrganismos, incluindo fungos fitopatogênicos, através da produção de metabólitos antifúngicos e enzimas de degradação de celulose (HARMAN *et al.*, 2020). São capazes de colonizar a rizosfera das plantas, estabelecendo uma relação benéfica com as raízes e promovendo o crescimento vegetal (ZIN; BADALUDDIN, 2020). Além de possuírem uma ampla gama de habilidades metabólicas que são capazes de degradar uma variedade de materiais orgânicos, como celulose, lignina e quitina, através da produção de enzimas específicas. Essa versatilidade metabólica confere uma vantagem competitiva na colonização de diferentes habitats (HARMAN *et al.*, 2020).

Além disso, apresentam importância agrícola e industrial reconhecida, amplamente estudados e utilizados na agricultura como agentes de controle biológico de patógenos de plantas, promotores de crescimento vegetal e produtores de enzimas industriais (HARMAN *et al.*, 2020). Sua aplicação na agricultura tem como objetivo reduzir o uso de pesticidas, aumentar a produtividade das culturas e melhorar a sustentabilidade dos agroecossistemas (WAGHUNDE *et al.*, 2016).

Assim como, amplamente estudadas, as espécies *T. virens* e o *T. atroviride* apresentam capacidade de promover o crescimento vegetal e controlar doenças de plantas (SCHWEIGER

*et al.*, 2021). Ela apresenta uma ampla gama de habilidades metabólicas, incluindo a produção de enzimas degradadoras de celulose e quitina, que auxiliam na colonização da rizosfera e na promoção do crescimento radicular, além de ser eficaz no controle de doenças causadas por patógenos de solo, como fungos do gênero *Fusarium* (GUPTA *et al.*, 2021; SCHWEIGER *et al.*, 2021). Além de ser conhecido pela capacidade de controlar doenças causadas por fungos fitopatogênicos especialmente aqueles que afetam a parte aérea das plantas, produz uma ampla variedade de metabólitos antifúngicos e enzimas que desempenham um papel importante na inibição do crescimento dos patógenos e na proteção das plantas hospedeiras (ALFIKY; WEISSKOPF, 2021).

Além disso, o *T. reesei* e a espécie *T. asperellum* são amplamente utilizados na indústria devido à sua alta produção de enzimas celulolíticas (SCHWEIGER *et al.*, 2021; GUPTA *et al.*, 2021). Esse é capaz de degradar a celulose, um componente importante da biomassa vegetal, e converter tal material em produtos úteis, como etanol e bioenergia e habilidade antifúngica, com isso sendo estudado como agente de controle biológico (CHENTHAMARA *et al.*, 2021). Apresenta também grande habilidade para colonizar a rizosfera das plantas e estabelecer interações benéficas com as raízes (GUO *et al.*, 2021; ILLESCAS *et al.*, 2022). Produz enzimas, como quitinases, celulasas e proteases, que desempenham um papel fundamental na degradação de componentes do tecido vegetal e na inibição do crescimento de patógenos (FERREIRA; MUSUMECI, 2021).

### **O gênero *Azospirillum* e espécies relevantes**

O gênero *Azospirillum* compreende um grupo de bactérias gram-negativas aeróbias, pertencentes à classe Alphaproteobacteria. Esse gênero estabelece relação benéfica do tipo simbiótica com plantas. Promove a FBN utilizando a enzima nitrogenase para converter o N atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas, como amônia e nitrato (HARDOIM *et al.*, 2015; YASUDA *et al.*, 2022). Sendo que o processo da FBN é extremamente vantajoso para as plantas, uma vez que reduz a dependência da adubação nitrogenada (HARDOIM *et al.*, 2015; YASUDA *et al.*, 2022).

Também são capazes de sintetizar hormônios vegetais, como auxinas, citocininas e giberelinas, que desempenham um papel crucial no crescimento e desenvolvimento das plantas (VEJAN *et al.*, 2016; OROZCO-MOSQUEDA *et al.*, 2023). Outra característica é a capacidade

de produzir sideróforos, moléculas que se ligam ao P-Fe no solo e o tornam disponível para as plantas. O Fe é um nutriente essencial para o desenvolvimento adequado das plantas, e a produção de sideróforos pelo *Azospirillum* contribui para a melhoria da absorção desse elemento pelas raízes (TIMOFEEVA *et al.*, 2022).

Também são conhecidas por sua habilidade de colonizar a rizosfera, promovendo interações benéficas com as raízes, resultando em um aumento da disponibilidade de nutrientes, estímulo ao crescimento radicular e proteção contra patógenos do solo e formação de biofilmes nas superfícies das raízes, o que auxilia na estabilidade e persistência dessas bactérias na rizosfera (HARDOIM *et al.*, 2015; YASUDA *et al.*, 2022).

A capacidade do gênero *Azospirillum* de promover o crescimento vegetal e melhorar a saúde das plantas tem levado à sua ampla utilização na agricultura. Com destaque para as espécies *A. brasilense*, *A. lipoferum*, *A. amazonense*, *A. halopraeferens*, *A. irakense*. Essas bactérias são utilizadas como inoculantes em sementes, mudas ou diretamente no solo, visando estimular o crescimento de culturas agrícolas, como cereais, hortaliças, forrageiras, plantas ornamentais, entre outras (HARDOIM *et al.*, 2015; YASUDA *et al.*, 2022; OROZCO-MOSQUEDA *et al.*, 2023).

Dentre as principais espécies do gênero o *A. brasilense* é uma das espécies mais amplamente estudadas e utilizada. Tem capacidade de promover o crescimento em uma ampla variedade de culturas. As estirpes mais utilizadas são AB-V5 e AB-V6, capazes de fixar N atmosférico, produzir hormônios vegetais, como auxinas, e colonizar a rizosfera das plantas, fornecendo uma série de benefícios para o crescimento de plantas (OROZCO-MOSQUEDA *et al.*, 2023). Já o *A. lipoferum* tem a capacidade de fixar N atmosférico e produzir hormônios vegetais que estimulam o crescimento de plantas. Promove a mineralização de nutrientes no solo, tornando-os mais disponíveis para as plantas (ABDEL LATEF *et al.*, 2020; RENOUD *et al.*, 2022).

Originalmente isolada na região amazônica, o *A. amazonense* possui também é capaz de fixar N atmosférico, produzir fitohormônios e colonizar a rizosfera das plantas, e estudos já demonstraram melhores produtividades em arroz, milho e várias espécies de gramíneas (SANT'ANNA *et al.*, 2011). Assim como, *A. halopraeferens* e *A. irakense* são utilizados respectivamente como manejo cultural estratégico para mitigar os efeitos de solos salinos e promove o crescimento de plantas em condições adversas, auxiliando na absorção de nutrientes

e melhorando a resistência ao estresse ambiental (ENESPA *et al.*, 2020). Sendo frequentemente utilizado como inoculante em culturas como trigo, cevada, milho e forrageiras (KHAMMAS *et al.*, 1989, YASUDA *et al.*, 2022).

### **MPCPs associados à cultura do milho**

A utilização de MPCPs na cultura do milho apresenta uma série de benefícios como maior produtividade, melhora na saúde da cultura, além de reduzir a demanda pela utilização de fertilizantes químicos (EL-SAADONY, 2022; MOUROUZIDOU, 2023). Dentre esses microrganismos pode-se destacar a bactéria *Azospirillum* e fungo *Trichoderma*.

O gênero *Azospirillum* é capaz de estabelecer uma associação simbiótica com as raízes do milho, colonizando a rizosfera e fornecendo N às plantas (RENOUD *et al.*, 2022). Reduz a dependência da adubação nitrogenada, resultando em uma economia de custos e na redução do impacto ambiental (HARDOIM *et al.*, 2015; YASUDA *et al.*, 2022). Produzem fitohormônios, como as auxinas, que estimulam o desenvolvimento radicular, contribui para um melhor aproveitamento dos nutrientes presentes no solo, melhora a nutrição das plantas e aumenta sua resistência a estresses ambientais (VEJAN *et al.*, 2016; ENESPA *et al.*, 2020; SHEORAN *et al.*, 2021; OROZCO-MOSQUEDA *et al.*, 2023).

Já o gênero *Trichoderma* têm a capacidade de colonizar as raízes do milho e promover o crescimento de plantas, além de atuarem como agentes de controle biológico contra patógenos do solo. Eles secretam enzimas que degradam a parede celular dos patógenos, impedindo sua multiplicação e reduzindo o risco de doenças nas plantas de milho (DEGANI & DOR, 2021; TYŚKIEWICZ *et al.*, 2022). Contribuem para a melhoria da qualidade do solo pois ajudam a aumentar a matéria orgânica do solo, melhoram a estrutura e aumentam sua capacidade de retenção de água (SCHWEIGER *et al.*, 2021). Essa condição favorece o desenvolvimento das raízes do milho o que contribui para plantas mais resistentes aos estresses ambientais (DEGANI; Dor, 2021; SCHWEIGER *et al.*, 2021).

Como benefícios na utilização desses agentes biológicos observa-se maior massa seca de parte aérea, maior desenvolvimento da parte radicular, maior atividade fotossintética, produtividade e melhoria da qualidade dos grãos na cultura do milho (DANISH *et al.*, 2020; SHAHZAD *et al.*, 2020).

## Coinoculação – A associação do *Trichoderma* com *Azospirillum* potencializando a cultura do milho

A coinoculação é técnica utilizada na agricultura que envolve colocar em contato com a planta dois ou mais agentes biológicos de forma simultânea. Tem como objetivo aproveitar as interações sinérgicas entre os microrganismos para potencializar os efeitos positivos sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas (GROVER *et al.*, 2021; BARBOSA *et al.*, 2022).

A coinoculação pode ser realizada durante diversas etapas de desenvolvimento da cultura. Os microrganismos benéficos podem ser colocados aplicados diretamente na semente, no solo, sistema radicular ou parte aérea das plantas. Isso permite que os microrganismos estabeleçam relação simbiótica ou associativa, assim, fornecendo múltiplos benefícios para as plantas, sendo que a escolha do local de aplicação é baseada na compatibilidade dos microrganismos com a cultura e na estratégia de interação desejada (GAVILANES *et al.*, 2020; VISHWAKARMA *et al.*, 2020; GROVER *et al.*, 2021; SARKAR *et al.*, 2021; BARBOSA *et al.*, 2022).

A coinoculação com *Trichoderma* e *Azospirillum* pode demonstrar resultados positivos. O *Trichoderma* atua como um agente de controle biológico, suprimindo patógenos e estimulando o crescimento radicular das plantas. Por sua vez, o *Azospirillum*, bactéria promotora de crescimento, promove a FBN e a produção de fitohormônios, resultando em um aumento significativo do crescimento e desenvolvimento das plantas (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Na cultura do milho, a coinoculação com *Trichoderma* e *Azospirillum* ainda precisa ser melhor estudada. Essa combinação de microrganismos pode melhorar a absorção de nutrientes, principalmente N, promover o desenvolvimento do sistema radicular e aumentar a resistência das plantas a estresses abióticos, podendo reduzir a dependência de fertilizantes químicos, o que, por conseguinte, resulta em economia de custos e menor impacto ambiental (BUSO *et al.*, 2021; MASTAN *et al.*, 2021).

A coinoculação com *Trichoderma* e *Azospirillum* pode ser uma estratégia promissora para o manejo agrônômico da cultura do milho, com melhorias significativas no crescimento, desenvolvimento e resistência das plantas, além de reduzir a dependência de fertilizantes químicos, enquanto, igualmente, representa um avanço importante rumo à agricultura sustentável, promovendo maior produtividade e reduzindo os impactos ambientais (OLIVEIRA *et al.*, 2022; SOUSA *et al.*, 2022; TEIXEIRA *et al.*, 2022).

## Coinoculação de MPCPs em SIPA

Os SIPA são caracterizados pela combinação de diferentes componentes produtivos em uma mesma área, visando à diversificação de produção, a otimização dos recursos e a sustentabilidade do sistema. Uma estratégia que pode ser implementada no manejo produtivo dos SIPA é a utilização dos MPCPs que podem representar benefícios como maior ciclagem de nutrientes, promoção de controle biológico, melhoria da qualidade do solo, dentre outros (MORAES *et al.*, 2014; VALANI *et al.*, 2020).

No que se refere à ciclagem de nutrientes, os MPCPs têm a capacidade de mineralizar a matéria orgânica, solubilizar nutrientes e promover a ciclagem eficiente de nutrientes no solo. Isso é especialmente importante em SIPA, nos quais há a produção de resíduos orgânicos, como esterco animal, que podem ser aproveitados pelos microrganismos para a liberação de nutrientes essenciais às plantas. Dessa forma, os MPCPs contribuem para a disponibilidade de nutrientes, a fertilidade do solo e o aumento da produtividade das culturas (RAY *et al.*, 2020).

Outro benefício é o melhor controle biológico de pragas e doenças, de forma natural. Certas espécies de bactérias e fungos possuem propriedades antagonistas, promovendo o controle biológico de pragas e patógenos. Esses microrganismos são capazes de produzir substâncias antifúngicas, antibióticas e enzimas que inibem o desenvolvimento de patógenos, reduzindo a necessidade de pesticidas químicos (GARLAND *et al.*, 2021).

Outro fator relevante é a melhoria da qualidade do solo. Os MPCPs participam da formação e estabilização da estrutura do solo, promovendo a agregação e aumentando a capacidade de retenção de água. Além disso, eles contribuem para a formação de micorrizas, simbiose entre fungos e raízes das plantas, melhorando a absorção de nutrientes e o desenvolvimento radicular. A presença de MPCPs contribui para a melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo, o que, por sua vez, proporciona maior capacidade de suporte para o crescimento e desenvolvimento das plantas (HARTMANN; SIX, 2023).

A utilização dos MPCPs visa à sustentabilidade. Isso porque a utilização de MPCPs nos SIPA promove a redução do uso de insumos químicos, como fertilizantes e pesticidas, favorecendo a sustentabilidade do sistema, resultando em menor impacto ambiental, preservação da biodiversidade e segurança alimentar (ZVINAVASHE *et al.*, 2021). Além disso, a maior eficiência no uso de recursos, a redução da dependência de fertilizantes químicos e a diminuição dos resíduos agrícolas contribuem para a redução dos custos de produção e o

aumento da rentabilidade (SAEED *et al.*, 2021).

Destaca-se uma correlação positiva entre SIPA e MPCPs visando sustentabilidade, maior produtividade e rentabilidade na atividade rural (ASLAM *et al.*, 2019). A combinação desses elementos cria um ambiente favorável para o desenvolvimento das culturas, o equilíbrio do ecossistema e a produção de alimentos saudáveis e de qualidade (SEKARAN *et al.*, 2021).

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os Microrganismos Promotores de Crescimento de Plantas (MPCPs) representam uma abordagem eficaz e sustentável para aumentar a produtividade agrícola, ao mesmo tempo em que contribuem para a redução do uso de insumos químicos. Microrganismos como *Trichoderma* e *Azospirillum* têm mostrado grande potencial na promoção do crescimento de plantas, principalmente por meio da produção de substâncias bioativas e da melhoria na absorção de nutrientes. A coinoculação dessas espécies, especialmente na cultura do milho, oferece uma estratégia promissora para otimizar o rendimento de grãos e melhorar a qualidade da produção, além de reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos.

Adicionalmente, a aplicação de MPCPs em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) proporciona benefícios que vão além das plantas cultivadas, impactando positivamente a qualidade de diferentes plantas e contribui para a sustentabilidade do sistema como um todo. No entanto, apesar dos resultados promissores observados, constata-se que ainda existem lacunas significativas na literatura que necessitam de maior investigação, especialmente no que diz respeito à validação dessa técnica em diferentes condições edafoclimáticas e práticas de manejo. Desse modo, futuras pesquisas são fundamentais para consolidar o conhecimento sobre a coinoculação de *Trichoderma* e *Azospirillum* e em diversas culturas e sistemas de produção agrícola.

#### **AGRADECIMENTOS**

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos para o primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

- Abdel latef, A. A H., Alhmad, M. F. A., Kordrostami M., Abo–Baker A. A. & Zakir A. Inoculation with *Azospirillum lipoferum* or *Azotobacter chroococcum* Reinforces Maize Growth by Improving Physiological Activities Under Saline Conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39, 1293–1306. (2020).
- Abdelaal, K; Alkahtani, M; Attia, K; Hafez, Y; Király, L; & Künstler, A. (2021). The Role of Plant Growth-Promoting Bacteria in Alleviating the Adverse Effects of Drought on Plants. *Biology (Basel)*, 10(6), 520.
- Abdul M, N. A; Kumar, I. S; & Nadarajah, K. (2020). Elicitor and Receptor Molecules: Orchestrators of Plant Defense and Immunity. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(3), 963.
- Abdul Rahman, N. S. N; Abdul H, N. W; & Nadarajah, K. (2021). Effects of Abiotic Stress on Soil Microbiome. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16), 9036.
- Abreu, M; *et al.*, (2022). Low Indirect Land Use Change (ILUC) Energy Crops to Bioenergy and Biofuels—A Review. *Energies*, 15(12), 4348.
- Alfiky, A; & Weisskopf, L. (2021). Deciphering *Trichoderma*–Plant–Pathogen Interactions for Better Development of Biocontrol Applications. *Journal of Fungi*, 7(1), 61.
- Al-Tammar, F. K; & Khalifa, A. Y. Z. (2022). Plant growth promoting bacteria drive food security. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e267257.
- Arora, N. K; Tewari, S; & SINGH, R. (2013). Multifaceted plant-associated microbes and their mechanisms diminish the concept of direct and indirect PGPRs. In *Plant microbe symbiosis: Fundamentals and advances* (pp. 411-449). New Delhi: Springer India.
- Aslam, M. M. *ET AL.*, (2019). Piriformospora indica colonization reprograms plants to improved P-uptake, enhanced crop performance, and biotic/abiotic stress tolerance. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 106, 232-237.
- Athul, P. P; Patra, R. K; Sethi, D; Panda, N; Mukhi, S.K, Padhan, K; Sahoo, S. K; Sahoo, T. R; Mangaraj, S; Pradhan, S. R; & Pattanayak, S. K. (2022). Efficient native strains of rhizobia

improved nodulation and productivity of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under rainfed condition. *Front Plant Sci.* 13, 1048696.

Baldani, J. I. *ET AL.*, (1986). Characterization of *Herbaspirillum seropedicae* gen. nov. sp. nov. a Root-Associated Nitrogen-Fixing Bacterium. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 36(1), 86-93.

Barbosa, J. Z. *et al.*, (2022). Improving yield and health of legume crops via co-inoculation with rhizobia and *Trichoderma*: A global meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 176. 104493.

Basu, A. *et al.*, (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Green Bioinoculants: Recent Developments, Constraints, and Prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>.

Blake, C; Christensen, M. N; & Kovács, Á. T. (2021). Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(1), 15-25, <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-20-0225-CR>.

Buso P. H de M, *et al.*, (2021). Plant growth analysis describing the soybean plants response on dryland field to seed co-inoculation. *Cienc Rural.* 51(9) e20190642. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190642>.

Carvalho, P. C. F. *et al.*, (2010). Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88(2), 259-273, <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9360-x>.

Chenthamara, K. *et al.*, (2021). Ecological Genomics and Evolution of *Trichoderma reesei*. In: MACH-AIGNER, A. R.; MARTZY, R. (Eds.). *Trichoderma reesei. Methods in Molecular Biology*, 2234, 3-20. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1048-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1048-0_1).

Cochard B; Giroud B; Crovadore J; Chablais R; Arminjon L; & Lefort F. (2022). Endophytic PGPR from tomato roots: isolation, in vitro characterization and in vivo evaluation of treated tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *Microorganisms*, 10(4), 765. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040765>.

Da Anunciação, A. A. *et al.*, Agronomical performance of wheat crops (*Triticum* spp) subjected to *Bacillus* treatments in field environmental conditions: Desempenho agronomico da cultura

do trigo (*Triticum* spp) submetido a tratamentos com *Bacillus* em condições ambientais de campo. *Concilium*, v. 24, n. 4, p. 326-335, 2024.

Danish S; Zafar-ul-Hye M; Mohsin F; Hussain M. (2020). ACC-deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize growth. 15(4), e0230615, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230615>.

Degani, O; & Dor, S. (2021). *Trichoderma* Biological Control to Protect Sensitive Maize Hybrids against Late Wilt Disease in the Field. *Journal of Fungi*, 7(4), 315, <https://doi.org/10.3390/jof7040315>.

Díaz-Urbano M; Goicoechea N; Velasco P; & Poveda J. (2023). Development of agricultural bio-inoculants based on mycorrhizal fungi and endophytic filamentous fungi: Co-inoculants for improve plant-physiological responses in sustainable agriculture. *Biological Control*, 182, 105223, <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105223>.

Dobo, B. (2022). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and rhizobium inoculation on growth and yield of Glycine max L. Varieties. *International Journal of Agronomy*. <https://doi.org/10.1155/2022/9520091>.

Dowarah, B.; Gill, S. S; & Agarwala, N. (2022). Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Conferring Tolerance to Biotic Stresses in Plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 1429-1444, <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10392-5>.

El-Saadony, M. T. *et al.*, (2022). Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: Mechanisms, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 13, 923880, <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923880>.

Enespa, Prakash, J; & Chandra, P. (2020). Halophilic Microbes from Plant Growing Under the Hypersaline Habitats and Their Application for Plant Growth and Mitigation of Salt Stress. *Sustainable Development and Biodiversity*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38453-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38453-1_11).

Erenstein, O. *et al.*, (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Sec.* 14, 1295–1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>.

Etesami, H.; Jeong, B. R.; & Glick, B. R. (2021). Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Phosphate-Solubilizing Bacteria, and Silicon to P Uptake by Plant. *Frontiers in Plant Science*, 12, 699618, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699618>.

Fernandes, A. C. V; Lisboa, P. H. G; de Andrade, P. H. M; Vigna, B. B. Z; Nogueira, S. R; Fávero, A. P; & Lacava, P. T. (2023). Bactérias endofíticas associadas a *Paspalum vaginatum* Swartz com potencial para promoção de crescimento vegetal e biocontrole: Endophytic bacteria associated with *Paspalum vaginatum* Swartz with potential for plant growth promotion and biocontrol. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(2), 1071–1089. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n2-010>.

Ferreira, F. V; & Musumeci, M. A. (2021). *Trichoderma* as biological control agent: scope and prospects to improve efficacy. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(4), 90, <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03058-7>.

Gade, R. M; & Koche, M. D. (2022). Enhancing the growth and disease suppression ability of *Pseudomonas fluorescens*. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 351-368). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85577-8.00012-3>.

Galindo, F. S; Rodrigues W. L; Fernandes G. C; Boleta E. H. M; Jalal A; Rosa P. A. L; Buzetti S; Lavres J; & Filho M. C. M. T. (2022). Enhancing agronomic efficiency and maize grain yield with *Azospirillum brasilense* inoculation under Brazilian savannah conditions. *European Journal of Agronomy*, 134, 126471, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126471>.

Garland G; Edlinger A; Banerjee S; Degrun F; García-Palacios P; Pescador D. S; Herzog C; Romdhane S; Saghai A; Spor A; Wagg C; Hallin S; Maestre F. T; Philippot L; Rillig M. C. & Heijden M. G. A. V. D (2021). Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nat Food*, 2, 28–37, <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00210-8>.

Gavilanes F. Z; Andrade D. S; Zucareli C; Horácio E. H; Yunes J. S; Barbosa A. P; Alves L. A. R; Cruzatty L. G; Maddela N. R; & Guimarães M. de F. (2020). Co-inoculation of *Anabaena cylindrica* with *Azospirillum brasilense* increases grain yield of maize hybrids. *Rhizosphere*, 15, 100224, <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100224>.

Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.

Grabka, R; D'Entremont, T.W; Adams, S.J; Walker, A.K; Tanney, J.B; Abbasi, P.A; & Ali, S. (2022). Fungal endophytes and their role in agricultural plant protection against pests and pathogens. *Plants*, 11(3), 384, <https://doi.org/10.3390/plants11030384>.

Guo R; Ji S; Wang Z; Zhang H; Wang Y; & Liu Z. (2021). *Trichoderma asperellum* xylanases promote growth and induce resistance in poplar. *Microbiological Research*, 248, 126767, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126767>.

Gupta G. D; Bansal R; Mistry H; Pandey B; & Mukherjee P. K; (2021). Structure-function analysis reveals *Trichoderma virens* Tsp1 to be a novel fungal effector protein modulating plant defence. *International Journal of Biological Macromolecules*, 191, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.085>.

Harman G; Khadka R; Doni F; & Uphoff N. (2020). Benefits to Plant Health and Productivity From Enhancing Plant Microbial Symbionts. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.610065>.

Hartmann, M; & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 4-18, <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>.

Junior, V. C. do N; Prete, C. E. C; Hungria M; & Nogueira M. A. (2023). Fixação biológica de nitrogênio em soja com diferentes níveis de tolerância à seca. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 18(3), e3268-e3268. <https://doi.org/10.5039/agraria.v18i3a3268>.

Khammas, K. M; Ageron, E; Grimont, P. A. D; & Kaiser, P. (1989). *Azospirillum irakense* sp. nov; a nitrogen-fixing bacterium associated with rice roots and rhizosphere soil. *Research in Microbiology*, 140(9), 679-693. [https://doi.org/10.1016/0923-2508\(89\)90199-X](https://doi.org/10.1016/0923-2508(89)90199-X).

Kholssi, R; Marks Evan A.N; Miñón J; Maté, A. P; Sacristán, G; Montero O; Debdoubi A; & Rad C. (2021). A consortium of cyanobacteria and plant growth promoting rhizobacteria for wheat growth improvement in a hydroponic system. *South African Journal of Botany*, 142, 247-258, <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.06.035>.

Klepa, M. S; Helene L. C. F; O'Hara G., & Hungria M. (2021). *Bradyrhizobium agreste* sp. nov; *Bradyrhizobium glycinis* sp. nov. and *Bradyrhizobium diversitatis* sp. nov; isolated from a biodiversity hotspot of the genus Glycine in Western Australia. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 71, 3 <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004742>.

Kour D; Rana K. L; Yadav A. N; Yadav N; Kumar M; Kumar V; Vyas P; Dhaliwal H. S; & Saxena A. K; (2020). Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101487, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487>.

Koza, N; Adedayo, A; Babalola, O; & Kappo, A. (2022). Microorganisms in Plant Growth and Development: Roles in Abiotic Stress Tolerance and Secondary Metabolites Secretion. *Microorganisms*, 10(8), 1528. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081528>.

Kumawat, K. C; Razdan, N; & Saharan, K. (2022). Rhizospheric microbiome: Bio-based emerging strategies for sustainable agriculture development and future perspectives. *Microbiological Research*, 254, 126901, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126901>.

Lemaire G; Franzluebbers A; Carvalho P. C. de F; & Dedieu B. (2014). Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 4-8, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>.

Li Y; Li Q; Guan G; & Chen S. (2020). Phosphate solubilizing bacteria stimulate wheat rhizosphere and endosphere biological nitrogen fixation by improving phosphorus content. *PeerJ*, 8, e9062, <https://doi.org/10.7717/peerj.9062>.

Lima, A. F. S. *et al.*, (2022). Eficiência fisiológica e desempenho do amendoim sob estresse salino e inoculado com *Bradyrhizobium*. *Water Resources and Irrigation Management-WRIM*, 11(1-3), 22-35. <https://doi.org/10.19149/wrim.v11i1-3.2819>.

Mahmud, K; Makaju, S; Ibrahim, R; & Missaoui, A. (2020). Current Progress in Nitrogen Fixing Plants and Microbiome Research. *Plants*, 9(1), 97. <https://doi.org/10.3390/plants9010097>.

Mastan A; Rane D; Dastager S. G; & Babu C. S. V; (2021). Molecular insights of fungal endophyte co-inoculation with *Trichoderma viride* for the augmentation of forskolin

biosynthesis in *Coleus forskohlii*. *Phytochemistry*, 184, 112654, <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112654>.

Matar N., Macadré C., Ammar GAG., Peres A., Collet B., Boustany NE., Rajjou L., As-Sadi F., Dufresne M., & Ratet P. (2022). Identification of beneficial Lebanese *Trichoderma* spp. wheat endophytes. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1017890 <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1017890>.

Mei C., Zhou D., Chretien R. L., Turner A., Hou G; Evans M. R., & Lowman S. (2023). A Potential Application of *Pseudomonas psychrotolerans* IALR632 for Lettuce Growth Promotion in Hydroponics. *Microorganisms*, 11(2), 376 <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020376>.

Mendonça, J; Lira Junior, M; Carvalho, E; Fracetto, G; Fracetto, F; Alves, M; & Oliveira, J. (2021). Diversidade, mecanismos de atuação e potencial agrícola de bactérias promotoras de crescimento de plantas, usando milho como cultura exemplo. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, 25(2). <https://doi.org/10.12661/pap.2020.010>.

Minakshi G; Shrey B; Abha S; Pushpendra S; Jyoti S; & Lata N. (2020). PGPR Mediated Alterations in Root Traits: Way Toward Sustainable Crop Production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.618230>.

Moraes, A. de; Carvalho, P. C. de F; Lustosa, S. B. C; Lang, C. R; & Deiss, L. (2014). Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, 45(5spe), 1024–1031. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500018>.

Moreira, F. M. S; & Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. (2<sup>o</sup> edição) Lavras: UFLA.

Mourouzidou, S; Ntinis, G. K; Tsaballa, A; & Monokrousos, N. (2023). Introducing the Power of Plant Growth Promoting Microorganisms in Soilless Systems: A Promising Alternative for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 15, 5959, <https://doi.org/10.3390/su15075959>.

Mukherjee, P. K; Mendoza-Mendoza, A; Zeilinger, S; Horwitz, B. A. (2022). Mycoparasitism as a mechanism of *Trichoderma*-mediated suppression of plant diseases. *Fungal Biology Reviews*, 39, 15-33, <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.004>.

Mwenda, G. M; Hill, Y. J; O'Hara, G. W; Reeve, W. G; Howieson, J. G. & Terpolilli, J. J. (2023). Competição na simbiose *Phaseolus vulgaris* - Rhizobium e o papel dos rizóbios residentes no solo na determinação dos resultados da inoculação. *Plant Soil*, 487, 61–77, <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05903-0>.

Nascimento, V. C; Rodrigues-Santos, K. C; Carvalho-Alencar, K. L; Castro, M. B; Kruger, R. H; & Lopes, F. A. C.. (2022). *Trichoderma*: biological control efficiency and perspectives for the Brazilian Midwest states and Tocantins. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e260161. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.260161>.

Ngwenya, Z. D; Mohammed, M; Jaiswal, S. K; & Dakora, F. D. (2022). Phylogenetic relationships among Bradyrhizobium species nodulating groundnut (*Arachis hypogea* L.), jack bean (*Canavalia ensiformis* L.) and soybean (*Glycine max* Merr.) in Eswatini. *Scientific reports*, 12(1), 10629. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14455-9>.

Okon, Y. (1985). *Azospirillum* as a potential inoculant for agriculture. *Trends in Biotechnology*, 3(9), 223-228, [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(85\)90012-5](https://doi.org/10.1016/0167-7799(85)90012-5).

Olanrewaju, O. S; Glick, B. R; & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(11), 197, <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>.

Oliveira, C. E. da S; Jalal, A; Oliveira, J. R; Tamburi, K. V; & Teixeira Filho, M. C. M. (2022). Leaf inoculation of *Azospirillum brasilense* and *Trichoderma harzianum* in hydroponic arugula improve productive components and plant nutrition and reduce leaf nitrate. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 52, e72755. <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272755>.

Orozco-Mosqueda, M. D. C; Santoyo, G; & Glick, B. R. (2023). Recent Advances in the Bacterial Phytohormone Modulation of Plant Growth. *Plants Basel*, 12(3), 606. <https://doi.org/10.3390/plants12030606>.

Pathania P; Rajta A; Singh P. C; & Bhatia R; (2020). Role of plant growth-promoting bacteria in sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 30, 101842 <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101842>.

- Puech, T; & Stark, F. (2023). Diversification of an integrated crop-livestock system: Agroecological and food production assessment at farm scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 344, 108300, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108300>
- Rawat, P; Das, S; Shankhdhar, D; & Shankhdhar, S. (2021). Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 49-68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>.
- Ray, P; Lakshmanan, V; Labbé, J. L; & Craven, K. D. (2020). Microbe to Microbiome: A Paradigm Shift in the Application of Microorganisms for Sustainable Agriculture. *Frontiers in microbiology*, 11, 622926. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.622926>.
- Renoud, S; Abrouk, D; Prigent-Combaret, C; Wisniewski-Dyé, F; Legendre, L; Moënnelocoz, Y; & Muller, D. (2022). Effect of Inoculation Level on the Impact of the PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1 on Selected Microbial Functional Groups in the Rhizosphere of Field Maize. *Microorganisms*, 10(2), 325. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020325>.
- Rezende, C. C; Silva, M. A; Frasca, L. L. de M; Faria, D. R., Filippi, M. C. C. de., Lanna, A. C., & Nascente, A. S. (2021). Multifunctional microorganisms: use in agriculture. *Research, Society and Development*, 10(2), e50810212725. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12725>.
- Romero Flores, L. L; López Nevárez, V; Peinado Guevara, V. M; Chinchillas Chinchillas, M. de J; Perea Dominguez, X. P; & Arciniega Galaviz, M. A. (2023). Possibilities for Sustainable Development in Corn Intensification Scenarios. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 10, 106–130. <https://doi.org/10.47577/technium.v10i.9095>.
- Ruthes B. E. S; Kaschuk G; Moraes A. de, Lang C. R; Crestani C. & Oliveira L. B. de. (2023). Soil Microbial Biomass, N Nutrition Index, and Yield of Maize Cultivated Under eucalyptus Shade in Integrated crop-livestock-forestry Systems. *Int. J. Plant Prod.* 17, 323–335, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42106-023-00242-7>.
- Saeed, Q; Xiukang, W; Haider, F. U; Kučerik, J; Mumtaz, M. Z; Holatko, J; Naseem, M; Kintl, A; Ejaz, M; Naveed, M; Brtnicky, M; & Mustafa, A. (2021). Rhizosphere Bacteria in Plant Growth Promotion, Biocontrol, and Bioremediation of Contaminated Sites: A Comprehensive Review of Effects and Mechanisms. *International journal of molecular sciences*, 22(19), 10529. <https://doi.org/10.3390/ijms221910529>.

Samuels Gary J. (1996). *Trichoderma*: a review of biology and systematics of the genus. *Mycological Research*, 100(8), 923-935. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(96\)80043-8](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(96)80043-8).

Samuels Gary J. (2006). *Trichoderma*: systematics, the sexual state, and ecology. *Phytopathology*, 96(2), 195-206. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0195>.

Sant'Anna F. H; Almeida, L. G. P; Cecagno, R; Reolon, L. A; Siqueira, F. M; Machado, M. R. S; Vasconcelos A. T. R; & Schrank, I. S. (2011). Genomic insights into the versatility of the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum amazonense*. *BMC Genomics*, 12, 409, <https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-409>.

Santoyo, G; Urtis-Flores, C. A; Loeza-Lara, P. D; Orozco-Mosqueda, Ma. del C; & Glick, B. R. (2021). Rhizosphere Colonization Determinants by Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR). *Biology (Basel)*, 10(6), 475, [doi.org/10.3390/biology10060475](https://doi.org/10.3390/biology10060475).

Sarkar D; Singh S; Parihar M; & Rakshit A. (2021). Seed bio-priming with microbial inoculants: A tailored approach towards improved crop performance, nutritional security, and agricultural sustainability for smallholder farmers. *Current Research in Environmental Sustainability*, <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100093>.

Schuster, A; & Schmoll, M. (2010). Biology and biotechnology of *Trichoderma*. *Applied microbiology and biotechnology*, 87(3), 787–799. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2632-1>.

Schweiger, R; Padilla-Arizmendi, F; Nogueira-López, G; Rostás, M; Lawry, R; Brown, C; Hampton, J; Steyaert, J. M; Müller, C; & Mendoza-Mendoza, A. (2021). Insights into Metabolic Changes Caused by the *Trichoderma virens*–Maize Root Interaction. *IS-MPMI* 34(5), 524–537. <https://doi.org/10.1094/MPMI-04-20-0081-R>.

Sekaran, U; Lai, L; Ussiri, D; Kumar, S; & Clay, S. (2021). Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security -A review. *Journal of Agriculture and Food Research*. 5. 100190. [10.1016/j.jafr.2021.100190](https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100190).

Shahzad, S; Arif, M; Yasmeen, T; & Ali, B. (2020). Inoculation of potassium solubilizing bacteria with different potassium fertilization sources mediates maize growth and productivity. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 57(4), 1045-1055. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/20.9788>.

Sheoran, S; Kumar, S; Kumar, P; Meena, R. S. & Rakshit, S. (2021). Nitrogen fixation in maize: breeding opportunities. *Theor Appl Genet*, 134, 1263–1280, <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03791-5>.

Singh, P; Singh, R. K; Zhou, Y; Wang, J; Jiang, Y; Shen, N; Wang, Y; Yang, L. & Jiang, M. (2022). Unlocking the strength of plant growth promoting *Pseudomonas* in improving crop productivity in normal and challenging environments: a review, *Journal of Plant Interactions*, 17(1), 220-238, <https://doi.org/10.1080/17429145.2022.2029963>.

Sousa, W. dos S; Teixeira, I. R; Campos T. S; Silva G. Ca. da, Silva M. B. da & Moreira, S. G. (2022). Supplementary reinoculation in topdressing of *Rhizobium tropici* in common bean crop: effects on nodulation, morphology, and grain yield, *Journal of Plant Nutrition*, 45(20), 3094-3108, <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.2020833>.

Stockmans De N. F; Chiomento, J. C; Rosiani T; Nicolas T; Thomas, L; & Giuseppina, C. E. (2023). Alterações morfofisiológicas promovidas pela micorriza arbuscular em plantas hortícolas: uma revisão integrativa. <https://doi.org/10.37885/230212152>.

Teixeira, I. R; Lopes, P. R; Sousa, W. S; & Teixeira, G. C. da S. (2022). Response of common bean to *Rhizobium* reinoculation in topdressing. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, 26(4), 274–282. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n4p274-282>.

Tiku, A. R. (2020). Antimicrobial Compounds (Phytoanticipins and Phytoalexins) and Their Role in Plant Defense. In: Mérillon, J.-M; Ramawat, K. (eds). *Co-Evolution of Secondary Metabolites*. Reference Series in Phytochemistry. Cham: Springer, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96397-6\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96397-6_63).

Timofeeva, A. M; Galyamova, M. R; & Sedykh, S. E. (2022). Bacterial Siderophores: Classification, Biosynthesis, Perspectives of Use in Agriculture. *Plants*, 11(22), 3065. <https://doi.org/10.3390/plants11223065>.

Tosi, M; Ogilvie, C. M; Spagnoletti, F. N; Fournier, S; Martin, R. C; & Dunfield, K. E. (2023). Cover Crops Modulate the Response of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Water Supply: A Field Study in Corn. *Plants*, 12(5), 1015. <http://dx.doi.org/10.3390/plants12051015>.

Trivedi, P; Leach J. E; Tringe, S. G; Sa, T; & Singh B. K. (2020). Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 18, 607-621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>.

Tyśkiewicz, R; Nowak, A; Ozimek, E; & Jaroszuk-Ściseł, J. (2022). *Trichoderma*: The Current Status of Its Application in Agriculture for the Biocontrol of Fungal Phytopathogens and Stimulation of Plant Growth. *International journal of molecular sciences*, 23(4), 2329. <https://doi.org/10.3390/ijms23042329>.

Valani, G. P; Martíni, A. F; da Silva, L. F. S; Bovi, R. C; & Cooper, M. (2021). Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. *Soil Use and Management*, 37(1), 22-36. <https://doi.org/10.1111/sum.12667>.

Vejan, P; Abdullah, R; Khadiran, T; Ismail, S; & Nasrulhaq Boyce, A. (2016). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agricultural Sustainability—A Review. *Molecules*, 21(5), 573. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules21050573>.

Ventura, M. V. A; de Menezes Filho, A. C. P; & Batista-Ventura, H. R. F. (2023). Chemical, physical, and biological attributes of the soil in integrated systems. *Brazilian Journal of Science*, 2(4), 90-98. <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i4.300>.

Vishwakarma, K; Kumar, N; Shandilya, C; Mohapatra, S; Bhayana, S; & Varma, A. (2020). Revisiting Plant-Microbe Interactions and Microbial Consortia Application for Enhancing Sustainable Agriculture: A Review. *Frontiers in Microbiology*, 11, 560406. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.560406>.

Wu, H; Wang, B; Hao, X; Zhang, Y; Wang, T; Lu, Z; ... & Cheng, C. (2022). *Piriformospora indica* promotes the growth and enhances the root rot disease resistance of gerbera. *Scientia Horticulturae*, 297, 110946, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110946>.

Yang, J; Lan, L; Jin, Y; Yu, N; Wang, D; & Wang, E. (2022). Mechanisms underlying legume–rhizobium symbioses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 64(2), 244-267. <https://doi.org/10.1111/jipb.13207>.

Yasuda, M; Dastogeer, K. M; Sarkodee-Addo, E; Tokiwa, C; Isawa, T; Shinozaki, S; & Okazaki, S. (2022). Impact of *Azospirillum* sp. B510 on the rhizosphere microbiome of rice under field conditions. *Agronomy*, 12(6), 1367. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061367>.

Zhou, J; Chai, X; Zhang, L; George, T. S; Wang, F; & Feng, G. (2020). Different Arbuscular Mycorrhizal Fungi Cocolonizing on a Single Plant Root System Recruit Distinct Microbiomes. *mSystems*, 5(6), e00929-20. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00929-20>.

Zilli, J. É; Pacheco, R. S; Gianluppi, V; Smiderle, O. J; Urquiaga, S; & Hungria, M. (2021). Biological N<sub>2</sub> fixation and yield performance of soybean inoculated with *Bradyrhizobium*. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 119(3), 323-336. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10128-7>.

Zin, N. A; & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2), 168-178, <https://doi.org/10.1016/j.aogas.2020.09.003>.

Zvinavashe, A. T; Mardad, I; Mhada, M; Kouisni, L; & Marelli, B. (2021). Engineering the plant microenvironment to facilitate plant-growth-promoting microbe association. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(45), 13270-13285. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00138>.

## CAPÍTULO II

### **Desempenho da cultura do milho sob diferentes sistemas de produção agropecuária e coinoculação**

### **Performance of maize crop under different agropecuary production systems and co- inoculation**

### **Rendimiento del maíz bajo diferentes sistemas de producción agropecuaria y coinoculación.**

#### **RESUMO**

Com a intensificação da agricultura, predominam os monocultivos, caracterizados pela baixa diversidade e pelo elevado uso de insumos sintéticos. O futuro da alimentação global depende, agora, de tecnologias de intensificação sustentável que promovam ganhos de eficiência, permitindo a produção de mais alimentos sem a necessidade de expandir áreas cultivadas ou aumentar o uso de água e outros insumos prejudiciais à saúde de consumidores e produtores rurais. Nesse contexto, os microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCPs) e os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) podem contribuir para uma agricultura sustentável, além de promover maiores rendimentos morfológicos e de grãos na cultura do milho. Este estudo objetivou determinar os efeitos da coinoculação com a bactéria *Azospirillum brasilense* associada ao fungo *Trichoderma asperellum* na cultura do milho, cultivado em monocultivo e (SIPA). Os tratamentos avaliados foram: lavoura (L), lavoura-pecuária (LP), lavoura-floresta (LF) e lavoura-pecuária-floresta (LPF). A distribuição dos tratamentos seguiu um delineamento em blocos ao acaso (DBC), em um fatorial duplo (4x2), considerando os fatores sistemas de cultivo e manejo de MPCPs, com três repetições. A coinoculação com *A. brasilense* e *T. asperellum* demonstrou eficácia significativa na melhoria dos aspectos morfológicos e do rendimento de grãos na cultura do milho, tanto em monocultivo quanto em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), com destaque para os sistemas (LP) e Lavoura (L), que apresentaram maior produtividade. Em contraste, os sistemas Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF), que incluem o componente arbóreo *Eucalyptus benthamii*,

mostraram menores rendimentos, possivelmente devido à menor taxa fotossintética relacionada ao espaçamento entre as árvores. O tratamento LP + coinoculação foi o mais expressivo, com aumentos de 17,14% no componente morfológico MSPA, 43% no M1000, e 9,56% na produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) em relação ao tratamento L + controle. Além disso, o tratamento LP + coinoculação superou o LPF + controle em 136,63% na produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ). A análise de componentes principais (PCA) mostrou que Dim-1 (74,9%) e Dim-2 (19,8%) explicam 94,7% da variância dos dados, com alta correlação entre PROD, MSPA, MVPA e AIE, principalmente nos tratamentos L e LP, e correlação inversa com LF e LPF. Esses resultados indicam que a coinoculação em sistemas integrados de produção é uma estratégia eficaz para otimizar a produção de milho, melhorando tanto os componentes morfológicos quanto o rendimento de grãos.

**Palavras-chave:** Bioinsumos, sustentabilidade, produção vegetal, manejo biológico.

## ABSTRACT

With the intensification of agriculture, monocultures have become predominant, characterized by low diversity and high use of synthetic inputs. The future of global food security now depends on sustainable intensification technologies that promote efficiency gains, allowing for the production of more food without the need to expand cultivated areas or increase the use of water and other inputs that are harmful to the health of consumers and rural producers. In this context, Plant Growth-Promoting Microorganisms (PGPMs) and Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS) can contribute to sustainable agriculture, as well as promote higher morphological and grain yields in maize cultivation. This study aimed to determine the effects of co-inoculation with the bacterium *Azospirillum brasilense* associated with the fungus *Trichoderma asperellum* on maize grown in monoculture and ICLS systems. The treatments evaluated were: cropping (C), crop-livestock (CL), crop-forest (CF), and crop-livestock-forest (CLF). The treatments were distributed according to a randomized block design (RBD) in a 4x2 factorial arrangement, considering the factors of cropping systems and PGPM management, with three replications.

Co-inoculation with *A. brasilense* and *T. asperellum* demonstrated significant efficacy in improving the morphological aspects and grain yield of maize, both in monoculture and in integrated crop-livestock systems (ICLS), with the CL and C systems showing the highest productivity. In contrast, the Crop-Forest (CF) and Crop-Livestock-Forest (CLF) systems, which include the arboreal component *Eucalyptus benthamii*, showed lower yields, possibly due to the reduced photosynthetic rate related to tree spacing. The CL + co-inoculation treatment was the most effective, with increases of 17.14% in the morphological component MSPA, 43% in M1000, and 9.56% in productivity ( $t\ ha^{-1}$ ) compared to the C + control treatment. Additionally, the CL + co-inoculation treatment outperformed the CLF + control treatment by 136.63% in productivity ( $t\ ha^{-1}$ ). Principal component analysis (PCA) showed that Dim-1 (74.9%) and Dim-2 (19.8%) explain 94.7% of the data variance, with a high correlation between PROD, MSPA, MVPA, and AIE, particularly in the C and CL treatments, and an inverse correlation with CF and CLF. These results indicate that co-inoculation in integrated production systems is an effective strategy to optimize maize production, improving both morphological components and grain yield.

**Keywords:** Bioinputs, sustainability, plant production, biological management.

## RESUMEN

Con la intensificación de la agricultura, predominan los monocultivos, caracterizados por una baja diversidad y un alto uso de insumos sintéticos. El futuro de la alimentación global depende ahora de tecnologías de intensificación sostenible que promuevan ganancias de eficiencia, permitiendo la producción de más alimentos sin la necesidad de expandir las áreas cultivadas o aumentar el uso de agua y otros insumos perjudiciales para la salud de los consumidores y los productores rurales. En este contexto, los microorganismos promotores del crecimiento de plantas (MPCP) y los Sistemas Integrados de Producción Agropecuaria (SIPA) pueden contribuir a una agricultura sostenible, además de promover mayores rendimientos morfológicos y de grano en el cultivo de maíz. Este estudio tuvo como objetivo determinar los efectos de la co-inoculación con la bacteria *Azospirillum brasilense* asociada con el hongo *Trichoderma asperellum* en el cultivo de maíz, cultivado en monocultivo y en SIPA. Los tratamientos evaluados fueron: cultivo (C), cultivo-ganadería (CG), cultivo-forestal (CF) y cultivo-ganadería-forestal (CGF). La distribución de los tratamientos siguió un diseño de bloques al azar (DBA), en un factorial doble (4x2), considerando los factores

sistemas de cultivo y manejo de MPCP, con tres repeticiones. La co-inoculación con *A. brasilense* y *T. asperellum* demostró una eficacia significativa en la mejora de los aspectos morfológicos y el rendimiento de grano en el cultivo de maíz, tanto en monocultivo como en sistemas integrados de producción agropecuaria (SIPA), destacándose los sistemas CG y C, que presentaron mayor productividad. En contraste, los sistemas Cultivo-Forestal (CF) y Cultivo-Ganadería-Forestal (CGF), que incluyen el componente arbóreo *Eucalyptus benthamii*, mostraron menores rendimientos, posiblemente debido a la menor tasa fotosintética relacionada con el espaciamiento entre los árboles. El tratamiento CG + co-inoculación fue el más expresivo, con aumentos del 17,14% en el componente morfológico MSPA, 43% en M1000 y 9,56% en productividad ( $t\ ha^{-1}$ ) en comparación con el tratamiento C + control. Además, el tratamiento CG + co-inoculación superó al CGF + control en un 136,63% en productividad ( $t\ ha^{-1}$ ). El análisis de componentes principales (ACP) mostró que Dim-1 (74,9%) y Dim-2 (19,8%) explican el 94,7% de la varianza de los datos, con una alta correlación entre PROD, MSPA, MVPA y AIE, principalmente en los tratamientos C y CG, y una correlación inversa con CF y CGF. Estos resultados indican que la co-inoculación en sistemas integrados de producción es una estrategia eficaz para optimizar la producción de maíz, mejorando tanto los componentes morfológicos como el rendimiento de grano.

**Palabras clave:** Bioinsumos, sostenibilidad, producción vegetal, manejo biológico

## 1. INTRODUÇÃO

Com a predominância do modelo produtivo convencional, marcado pela baixa biodiversidade e pelo uso intensivo de insumos sintéticos, surgem crescentes questionamentos sobre a eficiência desse sistema de produção sob a perspectiva socioambiental e econômica (Fernandes *et al.*, 2024). Adicionalmente, há uma crescente demanda por aumento na produção de alimentos para atender ao crescimento populacional projetado pela FAO para 2050. Esse cenário, juntamente com uma maior conscientização sobre o consumo de alimentos saudáveis, tem gerado diversos questionamentos sobre os modelos convencionais de produção (Basso, 2023).

É fundamental desenvolver e aplicar modelos de produção que promovam a intensificação sustentável, assegurando a eficiência produtiva, a conservação dos recursos naturais e a resiliência dos sistemas agrícolas. Nesse contexto, os microrganismos

promotores de crescimento de plantas (MPCPs) em inglês plant growth-promoting microorganisms (PGPMs) (Fernandes, *et al.*, 2024; Nascente, *et al.*, 2023a) e os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em inglês integrated crop-livestock systems (ICLS) ou de forma mais específica crop-livestock-forest systems (ICLSF) representam estratégias eficazes para alcançar uma produção agrícola sustentável (De Faccio Carvalho, *et al.*, 2021).

Em se tratando de práticas agrícolas sustentáveis, nota-se no Brasil uma grande demanda por produtos insumos biológicos, demonstrando o grande interesse em manejos culturais de baixo impacto ambiental e abordagens conservacionista (Posada *et al.*, 2021). Os microrganismos promotores de crescimento em plantas (MPCPs) são uma alternativa viável, pois contribuem para ganhos produtivos em culturas agrícolas, com baixo impacto ambiental e com menor utilização de insumos sintéticos (Pathania *et al.*, 2020; Al-Tammar & Khalifa, 2022).

É relevante destacar que a prática da coinoculação tem demonstrado diferentes benefícios ambientais e agronômicos superiores em comparação à inoculação. A coinoculação, consiste na aplicação simultânea de mais de um MPCP e proporciona maiores benefícios em comparação a técnica da inoculação com um único microrganismo por se beneficiar dos efeitos sinérgicos dos microrganismos combinados (Slimani; Oufdou; Meddich, 2023), além de resultar em maior capacidade da planta de superar condições estressantes, tanto bióticos quanto abióticos (Mourouzidou, S. *et al.*, 2023).

Para exemplificar, pesquisa desenvolvida por Nascente *et al.*, 2023b no que se refere ao desempenho radicular da cultura do arroz de terras altas em função de diferentes MPCPs. Sugere que a coinoculação (*Serratia marcescens* com *Bacillus toyonensis*) proporciona aumento (296%) no comprimento da raiz em relação ao controle. Assim como, a coinoculação (*B. toyonensis* com *A. brasilense*) aumenta a área da superfície radicular em 209% em comparação com ao controle. Esses autores concluíram que diferentes MPCPs melhoraram comprimento da raiz, diâmetro e volume da raiz, dentre outros benefícios.

Outra pesquisa, conduzida por Camargo e Buso (2020), sugere que a coinoculação *Bradyrhizobium japonicum* no tratamento de sementes com *A. brasilense* no sulco resulta em maior número de grãos por vagem. Resultados semelhantes foram observados por Bulegon *et al.*, (2016), que avaliaram a coinoculação de *Bradyrhizobium* associado ao

*Azospirillum* na cultura da soja e observaram uma maior média de grãos por vagem quando adotado a prática da co inoculação.

A co inoculação composta pela associação de *Azospirillum* e *Trichoderma* podem oferecendo benefícios em termos de produtividade e de sustentabilidade para diferentes culturas agrícolas, entretanto, ainda carece de maiores estudos. A bactéria *Azospirillum* promove o crescimento das plantas por meio da fixação biológica de nitrogênio (FBN) e da produção de fitohormônios, resultando em um aumento significativo no crescimento e desenvolvimento das plantas. O fungo *Trichoderma*, por sua vez, atua como agente de controle biológico, suprimindo patógenos e estimulando o crescimento radicular das plantas (Barbosa *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2022).

Além dos MPCPs outra forma de intensificação produtiva com característica sustentável são os SIPA, apontado pela FAO como alternativa para produção de alimentos saudáveis, com acréscimo de biodiversidade e maior resiliência social e ambiental. Esses sistemas buscam promover a eficiência na produção agropecuária por meio da integração sinérgica de diferentes componentes produtivos, como o agrícola, animal e arbóreo (Moraes *et al.*, 2014). Outro ponto é que esses componentes podem ser integrados compondo diferentes arranjos produtivos como os sistemas I - agropastoris (agrícola + animal); II - agrofloresta (agrícola + arbóreo); III - silvipastoris (arbóreo + animal); e IV - agrossilvipastoris (agrícola + arbóreo + animal) (Carvalho, *et al.*, 2014).

A inclusão do componente animal pode ser feita com a utilização de bovinos, bubalinos, caprinos, ovinos, suínos, aves, dentre outros. A inserção do componente animal apresenta como benefício, maior ciclagem de nutrientes, em alguns casos controle de insetos praga e plantas espontâneas, além da diversificação na produção e maior eficiência na utilização de recursos reduzindo o desperdício (Carvalho, *et al.*, 2014).

O componente arbóreo oferece diferentes benefícios ecológicos e econômicos. Árvores frutíferas como a mangueira (*Mangifera indica*) e a goiabeira (*Psidium guajava*), árvores madeireiras como o eucalipto (*Eucalyptus spp.*) e o mogno africano (*Khaya ivorensis*), produtoras de resinas como o pinheiro (*Pinus spp.*) e seringueira (*Hevea brasiliensis*), e leguminosas arbóreas como a gliricídia (*Gliricidia sepium*) são espécies que podem ser utilizadas a título de exemplo. A presença dessas árvores contribui para a adição de matéria orgânica e da ciclagem de nutrientes, sombra e abrigo para os animais, reduzindo

o estresse térmico e erosão do solo, aumentam a infiltração de água e a resiliência dos sistemas produtivos frente às variações climáticas (Porfírio; *et al.*, 2018.).

Já o componente agrícola melhora a fertilidade do solo e proteção do solo, produz alimentos e descompacta do solo, por exemplo. A escolha das culturas deve considerar as condições específicas de cada propriedade, como clima, tipo de solo e objetivos do produtor. São exemplos de cultura que podem integrar um SIPA, milho (*Zea mays*), soja (*Glycine max*), sorgo (*Sorghum bicolor*), girassol (*Helianthus annuus* L.), arroz (*Oryza sativa*), dentre outras (Carvalho, *et al.*, 2014).

Em se tratando de cultura agrícola, mais especificamente o milho é altamente tem amplo uso na alimentação humana e animal, além da produção industrial (De Souza *et al.*, 2020; Marra *et al.*, 2024). É a cultura agrícola mais produzida no mundo, além de ter alta importância para o agronegócio brasileiro (Guimarães, 2024). Apesar da elevada produção no país, a produtividade média nacional ainda é baixa, por ser suscetível a fatores desfavoráveis como eventos climáticos adversos secas prolongadas, desenvolvimento nos estádios vegetativos iniciais lento e deficiências nutricionais.

Dito isso, ainda há questionamentos se o uso de MPCP em coinoculação em SIPA poderia proporcionar resultados superiores nos atributos morfológicos e na produção de grãos na cultura do milho. Esta pesquisa tem como hipótese que os fatores i. manejo da coinoculação (*A. brasilense* associado ao *T. asperellum*) e ii. SIPA podem promover maiores rendimentos morfológicos e produtivos de grãos na cultura do milho. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho da cultura do milho quanto aos fatores de rendimento morfológico e produtivo de grãos em resposta aos fatores de manejo da coinoculação e a diferentes sistemas de cultivo. Assim, este estudo fornece maiores esclarecimentos sobre um tema que carece de literatura científica.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1 Caracterização da área experimental**

A pesquisa foi conduzida no Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA), localizado na Fazenda Canguiri, estação experimental pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Pinhais, PR, Brasil, nas coordenadas 25° 23' 30" S e 49° 07'

30" W, a uma altitude de 935 metros. A região apresenta uma média anual de precipitação de 1.400 mm, com temperaturas mínima e máxima médias de 12,5°C e 22,5°C, respectivamente (IDR-PR, 2019). A área é sujeita a geadas e possui um clima do tipo oceânico temperado (Cfb) segundo a classificação de Köppen-Geiger (1928). O NITA opera em conformidade com o decreto estadual 1.753/96, que regulamenta o uso de defensivos agrícolas, e com a lei 6.938/81, que estabelece normas para áreas de proteção ambiental (APA) (Alvares, 2013).

## 2.2 Delineamento experimental - Pesquisa de longa duração

A área experimental da pesquisa de longa duração está representada na Figura 1. Com delineamento de blocos casualizados (DBC), com três repetições e sete tratamentos distintos: I - Lavoura (L); II - Floresta (F); III - Pecuária (P); IV - Lavoura-Pecuária (LP); V - Lavoura-Floresta (LF); VI - Pecuária-Floresta (PF); e VII - Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF).

A declividade do terreno e os padrões de drenagem foram considerados como fatores de bloqueio. A linha preta que delimita a estrada marca a separação entre os blocos 2 e 3, seguindo o divisor de águas, enquanto a separação entre os blocos 2 e 1 é demarcada por uma curva de nível representado pela linha cinza.

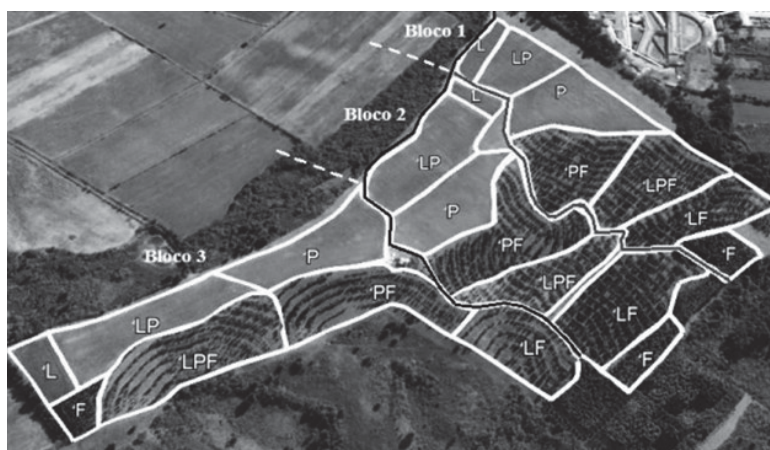


Figura 1. Área experimental do NITA para o experimento de longa duração, Pinhais, PR. Adaptada de Lang e Moraes (2018).

## 2.3 Delineamento experimental - Pesquisa de curta duração

O experimento foi conduzido segundo um DBC com três repetições, utilizando um esquema fatorial duplo, com os níveis 4x2 para os fatores A e B respectivamente, totalizando 8 tratamentos. O fator A consistiu nos sistemas de cultivo: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF). O fator B envolveu diferentes manejos microbiológicos: coinoculação de *T. asperellum* com *A. brasilense* e um controle sem aplicação de microrganismos. Para cada variável avaliada na cultura do milho, foram coletadas sete amostras aleatórias em cada tratamento, totalizando 21 amostras por variável.

## 2.4 Condução dos sistemas

### 2.4.1 Componente floresta

Os sistemas integrados que incluem o componente floresta (PF, LF, LPF) têm *Eucalyptus benthamii* plantados em linhas simples, com pastagem ou lavoura intercaladas entre essas linhas. O espaçamento entre as linhas de eucaliptos é de 14 m, e o espaçamento entre plantas ao longo das linhas é de 2 m. As linhas de árvores foram estabelecidas seguindo curvas de nível para promover a conservação do solo e da água, controlar a erosão, melhorar o conforto térmico dos animais e reduzir as trilhas provocadas pelo caminhar animal em áreas inclinadas, ao mesmo tempo que facilitam o acesso de máquinas.

### 2.4.2 Componente Pecuário

Nos sistemas que integram o componente pecuário (P), utilizam-se bovinos de raças europeias, que pesam em média 180 kg no início do período de pastejo (Figura 2). Adota-se o pressuposto de que para cada planta forrageira existe uma altura ideal para consumo animal, visando à máxima taxa de ingestão de massa seca por unidade de tempo, conforme preconizado pelo pastoreio rotativo.



Figura 2. Imagem adaptada de Vanderlei Porfírio-da-Silva, tratamento PF, NITA, 2018.

As pastagens variam conforme a época do ano. No verão, a composição das pastagens é predominantemente caracterizada pela forrageira perene *Megathyrsus maximus* cv. Áries, e em menor parte diferentes espécies forrageiras espontâneas. No inverno, como forma de superar o vazio forrageiro, utiliza-se aveia-preta (*Avena strigosa*) em sobresemeadura no capim Áries; outras plantas espontâneas também são observadas como azevém (*Lolium multiflorum*), trevo-vermelho (*Trifolium pratense* L.) e ervilhaca (*Vicia sativa* L.), que se estabelecem naturalmente na área por meio de ressemeadura.

### 2.4.3 Componente Lavoura

Nas áreas destinadas à lavoura (L), são cultivadas milho (*Z. mays*) e girassol (*H. annuus*) no verão, além de aveia preta no inverno para proteção e cobertura do solo. Nos sistemas integrados com pecuária (LP) e floresta (LPF), é adotado o sistema "ley farming". Nestes sistemas, as áreas são utilizadas para pastejo por três anos consecutivos, com aveia preta como pastagem de inverno e capim Áries como pastagem de verão. No inverno antes do plantio das culturas agrícolas, não há pastejo. As culturas de grãos são semeadas diretamente sobre a palhada verde, conforme o sistema de plantio direto (Lang & Moraes, 2018).



Figura 3: A- Semeadura de milho área experimental do NITA; B- Cobertura vegetal com aveia preta; C- Vista dos talhões LP e L (blocos 1 e 2) após semeadura; Adaptado Dominschek e Lang (2018).

## 2.5 Caracterização do solo

É classificado como Cambissolo Háplico Tb distrófico típico (EMBRAPA, 2018), são apresentados os atributos químicos do solo em diferentes sistemas agrícolas (Tabela 1). Informações históricas dos usos do solo são apresentadas por Kruchelski *et al.*, 2021. Na área experimental é praticado adubação de sistemas, com sinergia da relação solo-planta-animal na ciclagem de nutrientes e a liberação de P retido na palhada, induzida pela adubação de N na sementeira (Huf, 2018). A fertilização do solo tem sido mantida uniforme em todos os sistemas, de acordo com as análises de solo e as recomendações para as culturas e pastagens envolvidas, segundo Pauletti e Motta (2019).

Tabela 1. Atributos químicos do solo 0-10 cm em diferentes sistemas agrícolas de produção, Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA), Pinhais, Paraná.

| Sistemas | pH                | P                      | MO                    | K <sup>+</sup>                | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | H + Al | SB   | CTC<br>Potencial | R C                |
|----------|-------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|------------------|--------|------|------------------|--------------------|
|          | CaCl <sub>2</sub> | mg<br>dm <sup>-3</sup> | G<br>dm <sup>-3</sup> | ----cmol dm <sup>-3</sup> --- |                  |                  |        |      |                  | t ha <sup>-1</sup> |
| L        | 5,00              | 4,18                   | 40,07                 | 0,39                          | 5,47             | 2,72             | 4,44   | 8,58 | 13,02            | 3,60               |
| LP       | 5,07              | 4,37                   | 39,09                 | 0,19                          | 3,60             | 2,77             | 7,97   | 6,56 | 13,01            | 3,40               |
| LF       | 5,22              | 3,50                   | 37,32                 | 0,49                          | 4,85             | 3,18             | 3,91   | 8,52 | 12,43            | 1,40               |
| LPF      | 5,25              | 3,84                   | 34,56                 | 0,39                          | 4,64             | 3,31             | 3,74   | 8,34 | 12,08            | 1,10               |

Abreviaturas: L - Monocultivo lavoura; LP - Lavoura-pecuária; LF - Lavoura-floresta; LPF - Lavoura-pecuária-floresta; MO - Matéria orgânica; RC - Resíduo cultural. Conforme Pauletti e Motta (2019) e Ruths *et al.*, (2023). Os teores de fósforo (P) são considerados baixos, os de matéria orgânica (MO) médios, e os de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) altos.

## 2.5 Caracterização da cultivar

Utilizou-se a cultivar de milho BRS 4157 - Sol da Manhã NF, desenvolvida pela Embrapa Agrobiologia e Embrapa Milho e Sorgo (Ferreira, 2023). Cultivar adaptada a solo de baixa fertilidade natural e eficiência no uso de nitrogênio.

## 2.6 Protocolo das coinoculações

No manejo das coinoculações, foram utilizados dois produtos comerciais contendo formulação pura de *T. asperellum* e *A. brasilense*; ambos com concentração de  $1 \times 10^8$  unidades formadoras de colônia (UFC) por ml. As coinoculações foram realizadas em três momentos distintos na cultura do milho, sendo: I- Microbiolização de Sementes: Conduzida horas antes da semeadura, a microbiolização envolveu a combinação de 0,5 ml de suspensão para cada microrganismo, totalizando um ml para microbiolização de 1.000 sementes; II - Rega na linha de semeadura aos Sete Dias Após a Semeadura (DAS), utilizando 50 ml de suspensão de cada microrganismo combinado em 10 metros lineares, totalizando 100 ml de suspensão aplicada; III- Rega na linha de semeadura aos 21 DAS: Aplicados 100 ml de suspensão combinada em 10 metros lineares.

O grupo controle, consistiu da ausência de microrganismos, sendo as regas efetuadas apenas com água. As aplicações ocorreram por meio de um pulverizador manual costal, com pressão constante de  $\text{CO}_2$  e bico do tipo cônico (TX VS2). Entre as aplicações de cada tratamento, o pulverizador foi adequadamente desinfetado com água e detergente líquido, seguido por álcool 70%, conforme adaptado de Fernandes (2020).

## 2.7 Tratos culturais

### 2.7.1 Semeadura

Na presente pesquisa, a planta de cobertura do solo recaiu sobre a aveia preta, que foi acamada pelo trânsito do trator e serviu como palhada para cobertura do solo, sem a aplicação de herbicida. A semeadura e a adubação de base foram realizadas mecanicamente com trator em 15/10/2020, com espaçamento entre linhas de 0,45 m e adubação de base de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de ureia. Quando as plantas estavam no estágio V3, com três folhas expandidas, foi realizado o desbaste na área útil, mantendo três plantas por metro linear, resultando em

uma densidade de 66 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

### 2.7.2 Adubação

As adubações na cultura do milho foram realizadas mecanicamente em três momentos distintos. Primeiramente, foi aplicado fosfato reativo natural (29% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) a uma taxa de 60 kg ha<sup>-1</sup>, distribuído a lanço uma semana antes da semeadura. Em seguida, ureia (46% de N) foi aplicada a uma taxa de 60 kg ha<sup>-1</sup> como adubação de base, utilizando um implemento semeadoura-adubadora, no momento da semeadura. Por fim, no estágio V3 da cultura do milho, foi aplicado cloreto de potássio (60% de K<sub>2</sub>O) e ureia (46% de N) a uma taxa de 300 kg ha<sup>-1</sup> por adubo, também distribuída a lanço. Concomitantemente, seguindo os preceitos da adubação de sistemas, as mesmas taxas de adubos foram aplicadas nos demais sistemas.

### 2.7.3 Manejo fitossanitário

Não foi necessária intervenção para o controle fitossanitário de insetos e doenças. No entanto, houve uma grande competição de plantas espontâneas. Para mais informações sobre plantas espontâneas, composição botânica e danos nos cultivos agrícolas no NITA é detalhado por Dominschek *et al.*, 2020; De Queiroz *et al.*, 2021; Barbosa *et al.*, 2023.

## 2.8 Avaliação de componentes morfológico e de rendimento de grãos e coleta de dados

Todas as avaliações de rendimento morfológico ocorreram no momento de florescimento pleno da cultura, com metodologia de coleta de dados a saber: 1. altura de planta (AP, cm) a partir do solo até a ponta da folha mais alta da planta, utilizando uma trena; 2. diâmetro de colmo (DC, cm) na parte inferior do colmo, próximo ao solo, utilizando um paquímetro; 3. altura de inserção da espiga (AIE, cm) a partir do solo até o ponto de inserção da espiga na planta, utilizando uma trena; 4. número de folhas (NFO, unid.) contagem do número total de folhas por planta; 5. massa verde da parte aérea por planta (MVPA, kg) da parte aérea verde de cada planta, obtido através da colheita e pesagem individual das plantas em balança digital; 6. produtividade de massa seca da parte aérea por planta (MSPA, kg) da

parte aérea seca de cada planta, obtido após secagem em estufa a 60° C por 72 h e aferição em balança de precisão;

Aos 110 DAS, ocorreram as avaliações e coleta de dados para rendimento de grãos. Todas as avaliações foram aferidas durante o estágio de maturação plena de grãos e corrigido umidade para 13%. Para as variáveis 1. número de espigas (NE, unid.); 2. número de fileiras (NFI, unid.); 3. número de grãos por fileira (NGF, unid.); 4. massa de 1.000 grãos (M1000, kg); 5. produtividade por ha (Prod. t ha<sup>-1</sup>) que foi estimado pelo método Emater-MG (2000).

## 2.9 Análise de dados

Os dados brutos foram submetidos à análise de variância (ANAVA) com o teste F, e, após atender aos pressupostos dessa análise, as médias foram submetidas ao teste comparativo de Tukey a 5% de significância. Adicionalmente, foi realizada uma análise multivariada de componentes principais (PCA) para comparar a correlação entre as variáveis de resposta dos componentes morfológicos e de rendimento de grãos, utilizando-se os pacotes estatísticos Sisvar e R (Ferreira, 2020; R Core Team, 2020).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Valores do teste de F da ANAVA

A tabela 2 exibe os resultados da ANAVA para componentes morfológicos e de rendimento de grãos do milho, considerando os fatores "Sistema" de cultivo e "Manejo".

Tabela 2. Valores do teste de F da ANAVA para a cultura do milho submetida aos fatores Sistema e Manejo, ano agrícola 2020/21

| Fatores     | AP     | AIE    | NFO    | DC     | MVPA   | MSPA   | NE                 | NFI    | NGF    | MMIL   | PROD   |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| Sistema (S) | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | 0,08 <sup>ns</sup> | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 |
| Manejo (M)  | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | 0,83 <sup>ns</sup> | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 |
| S x M       | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | 0,16 <sup>ns</sup> | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 | P<0,01 |

ns: Não significativo, P>0,05; altura de planta (AP), altura de inserção da espiga (AIE), número de folhas (NFO), diâmetro de colmo (DC), massa verde da parte aérea (MVPA), massa seca da parte aérea (MSPA), número de espigas (NE), número de fileiras (NFI), número de grãos por fileira (NGF), massa de mil grãos (MMG) e produtividade (PROD).

Os valores de F<0,01 evidenciam a influência de pelos menos um dos níveis do "Sistema" de produção agrícola avaliado, nos diferentes "Manejos" e também na interação

dos dois fatores (“S” x “M”), com exceção do componente NE, que não respondeu aos fatores impostos (ou sua interação).

### 3.2 Componentes morfológicos

A Figura 4 apresenta os gráficos e os resultados comparativos do teste de Tukey para os componentes AP e AIE. Os maiores valores médios de AP foram obtidos nos sistemas de cultivo: i. LP + coinoculação e ii. L + coinoculação, com 293 cm e 289 cm, respectivamente. Em relação à AIE, o tratamento LP + coinoculação proporcionou a maior média global (153 cm), com diferença significativa em relação aos demais níveis dos fatores Sistema e Manejo. Esses resultados estão em concordância com as observações de Barros *et al.*, (2023), que registraram incrementos superiores em AP e AIE (26,5% e 27,22%, respectivamente) na cultura do milho submetida à coinoculação com MPCPs, em comparação ao tratamento controle, que não utilizou promotores de crescimento. Nossos resultados são comparáveis às descobertas de Simão *et al.*, (2018) e Kang (2008), que observaram menores rendimentos em componentes morfológicos de plantas de milho associadas ao componente arbóreo, devido ao efeito do sombreamento.

Para os componentes AP e AIE os maiores desempenhos foram obtidos com os sistemas de cultivo LF e LPF. Observações comparáveis aos achados de Pontes *et al.*, (2018); Simão *et al.*, (2018) e Borges *et al.*, (2019; 2020), que apontaram menor desempenho de diferentes culturas quando associadas ao componente arbóreo. Em complemento a isso, Kang *et al.*, (2008) demonstraram que diferentes níveis de poda no componente arbóreo diminuem o sombreamento, promovem um maior índice de radiação fotossintética e, conseqüentemente, melhoram o desenvolvimento vegetativo na cultura do milho.

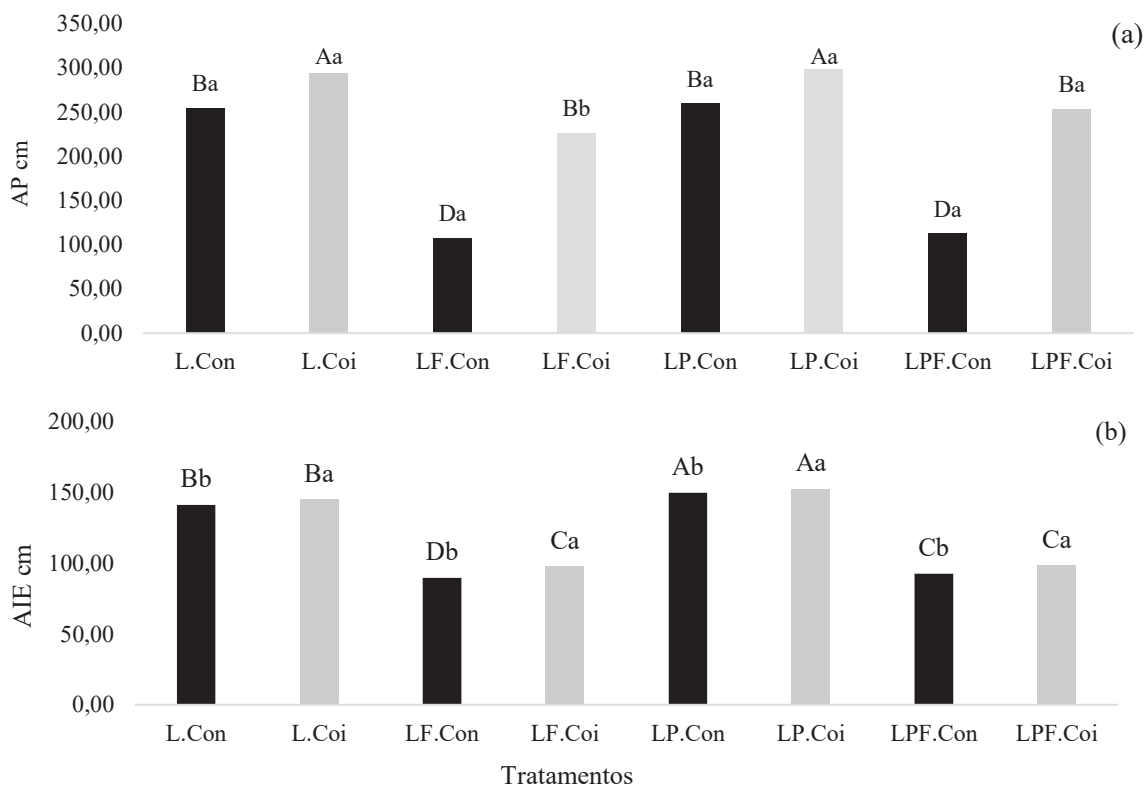


Figura 4: Médias das alturas de plantas (AP) e da altura de inserção da espiga (AIE) do milho em função dos fatores Sistema (S) e Manejo (M). Níveis de S: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF); e níveis de M: Coinoculação (*Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum*) e Controle (sem microrganismos). Tukey a 5% de significância. Letras maiúsculas sobre as barras indicam diferenças significativas entre os níveis de S, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de M.

A Figura 5 apresenta os gráficos dos componentes NFO e DC. Em relação ao NFO a maior média global foi observada com o tratamento LP + coinoculação (18,8 un.), além de diferir estatisticamente dos demais tratamentos. Esses dados são comparáveis aos resultados de Raspe e Raspe (2021), que observaram maiores incrementos morfológicos em plantas de milho associadas a MPCPs. Assim como, os resultados do nosso estudo suportam as descobertas de Kang (2008) e Simão *et al.*, (2018), que também observaram menores médias de NFO em tratamentos associados ao componente arbóreo.

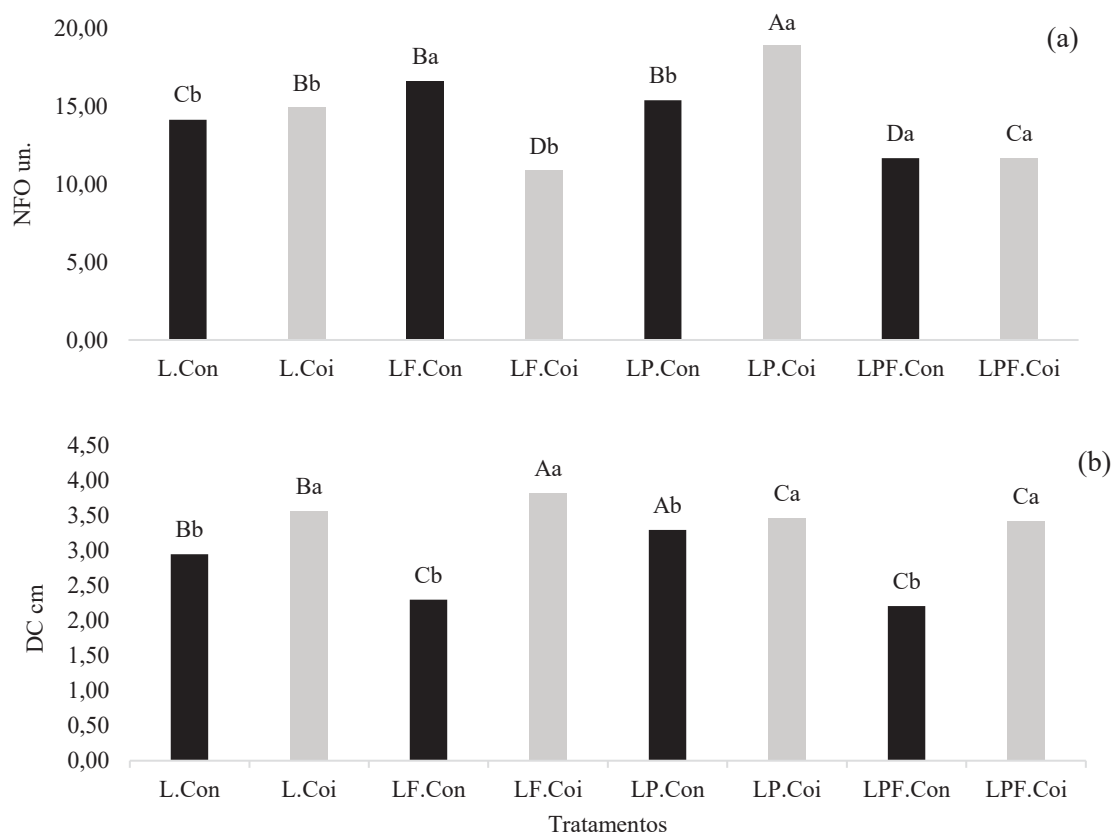


Figura 5: Médias de número de folhas (NFO) e diâmetro de colmo (DC) do milho em função dos fatores Sistema (S) e Manejo (M). Níveis de S: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF) e níveis de M: Coinoculação (*Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum*) e Controle (sem microrganismos). Tukey a 5% de significância. Letras maiúsculas sobre as barras indicam diferenças significativas entre os níveis de S, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de M.

Observou-se uma maior média no componente DC com o tratamento LP + controle (3,46 cm), que diferiu significativamente dos demais tratamentos. Esses dados corroboram os achados de Konai (2023), que destacou um incremento de 8,88% no DC da cultura do milho quando coinoculada com as bactérias *A. brasilense* e *Bacillus*, em comparação ao manejo controle. Nossas descobertas diferem dos resultados de Araujo *et al.*, (2013), que indicaram que, no componente DC, a análise de variância não foi significativa pelo teste F para diferentes fatores, incluindo diferentes sistemas de cultivo com maior ou menor nível tecnológico.

Na Figura 6 são apresentados os gráficos de MVPA e MSPA. Os maiores valores acumulados de MVPA são observados nos tratamentos i. LP + coinoculação e ii. LP + controle, com médias de 0,20 e 0,18 kg, respectivamente, com diferença estatística significativa no fator manejo. Adicionalmente, os tratamentos i. LP + coinoculação e ii. L +

controle apresentaram os maiores valores médios de MSPA, sendo 0,12 e 0,11 kg por planta, respectivamente. Outro destaque é que o componente MSPA teve incremento de 17,14% no tratamento LP + coinoculação em comparação ao tratamento L + controle.

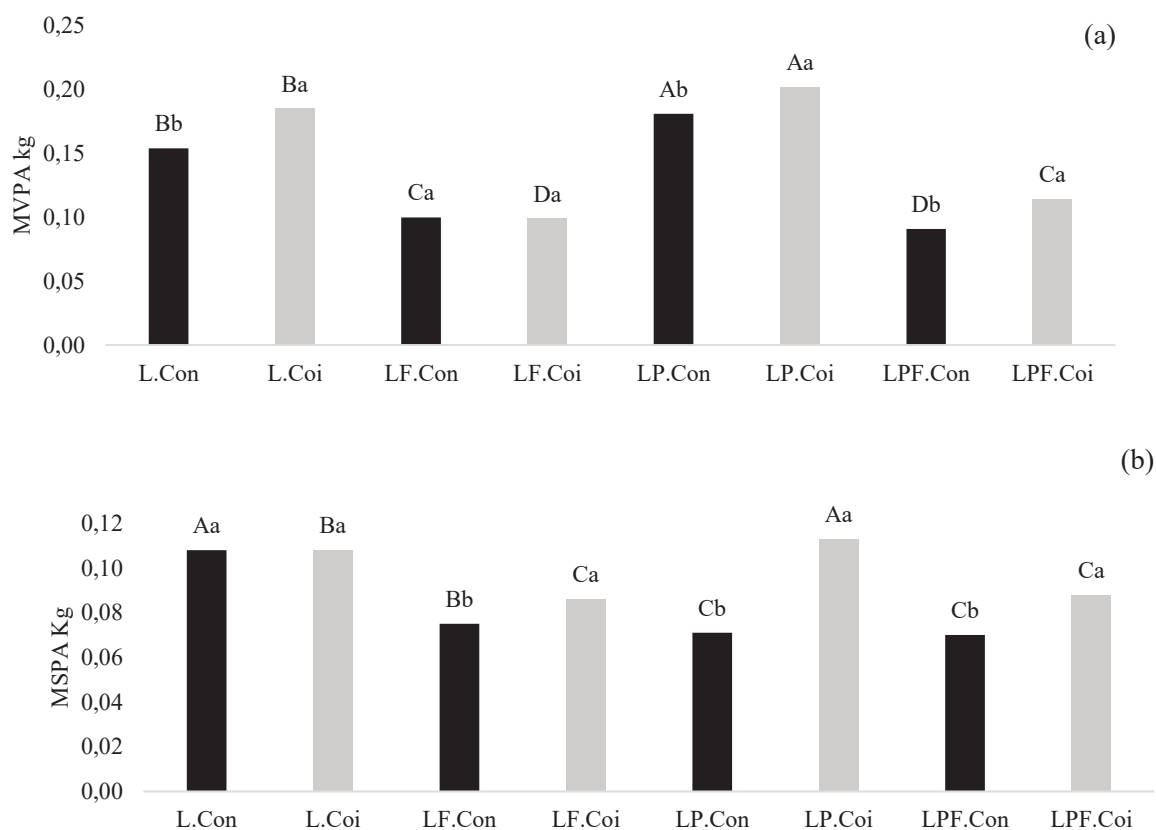


Figura 6: Médias de massa verde da parte aérea (MVPA) e massa seca da parte aérea (MSPA) do milho em função dos fatores Sistema (S) e Manejo (M). Níveis de S: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF) e níveis de M: Coinoculação (*Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum*) e Controle (sem microrganismos). Tukey a 5% de significância. Letras maiúsculas sobre as barras indicam diferenças significativas entre os níveis de S, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de M.

Nossos resultados são comparáveis aos de Cruz *et al.*, (2023), que observaram um incremento e 30,76% na MSPA de plantas coinoculadas com BRM 63573 + Ab-V5. Adicionalmente, outra pesquisa conduzida por Fernandes *et al.*, (2020) também demonstra maior produção de MSPA em plantas de arroz de terras altas coinoculadas com MPCPs com diferença estatística significativa em comparação ao tratamento controle (ausência da utilização de microrganismos). E superior ao achados de Wu *et al.*, (2021) em Sistema Integrado com a cultura do milho.

### 3.3 Componentes de rendimento de grãos

Na Figura 7, são apresentados os gráficos dos componentes NE, NFI e NGF. Adicionalmente o componente NE, não apresentou diferença estatisticamente significativa em relação aos diferentes níveis dos fatores Sistema e Manejo ( $p>0,05$ ).

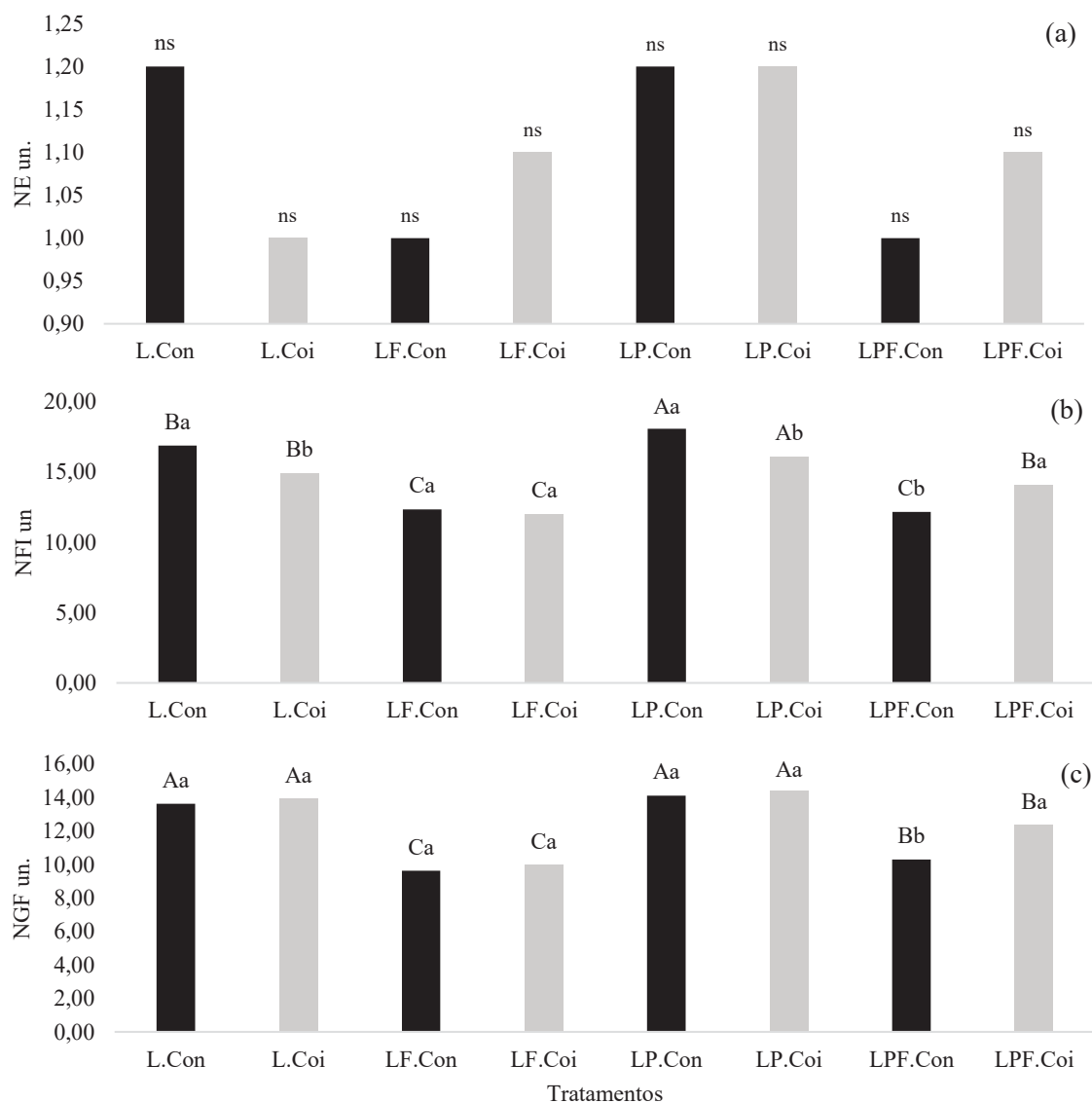


Figura 7. Médias de número de espigas (NE), número de fileiras (NFI) e número de grãos por fileira (NGF) do milho em função dos fatores Sistema (S) e Manejo (M). Níveis de S: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF) e níveis de M: Coinoculação (*Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum*) e Controle (sem microrganismos). Tukey a 5% de significância. Letras maiúsculas sobre as barras indicam diferenças significativas entre os níveis de S, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de M. ns - não apresentou diferença significativa ( $p>0,05$ ).

Observaram-se maiores médias globais para o componente NFI, 18,0 e 16,8 unidades, nos tratamentos i. LP + coinoculado e ii. LP + controle, respectivamente, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. O componente NGF apresentou maiores valores nos sistemas i. L e ii. LP, também diferindo estatisticamente dos demais níveis do fator

sistema. Ademais, os níveis do fator manejo não mostraram diferença estatística significativa nos desdobramentos com os sistemas L e LP.

Nossos dados corroboram com pesquisa conduzida por Konai (2023), que verificou efeitos positivos semelhantes em diferentes componentes de rendimento de grãos na cultura do milho em especial no NGF quando submetida a coinoculações com *A. brasilense* e bactérias do gênero *Bacillus*, proporcionando um incremento médio de 4,29% em comparação ao tratamento controle sem manejo com microrganismos. Além disso, nossos achados diferem do estudo de Berta *et al.*, (2014) em relação aos componentes NFI e NGF, já que esses autores não encontraram maiores incrementos nesses componentes na cultura do milho submetida a diferentes MPCPs.

Na Figura 8, são apresentados os gráficos dos componentes M1000 e Prod. Com relação ao componente M1000, foram obtidos maiores desempenhos nos sistemas de cultivo i. L e ii. LP, destacando-se com diferenças significativas em relação aos outros níveis de sistema. Adicionalmente, o fator manejo também apresentou diferenças significativas em quando desdobrado nos sistemas de cultivo L e LP, com desempenho superior do tratamento LP + coinoculação. Observa-se que para o componente M1000 o tratamento sistema integrado LP + coinoculação apresentou 43% de incremento superior ao tratamento sistema integrado LPF + controle. Outra análise é que o tratamento integrado LP + coinoculação apresentou incremento de 6% em comparação ao tratamento monocultural L + controle na M1000.

Quanto à significativa perda de produtividade no sistema integrado que contem o componente arbóreo *E. benthamii*, sugere-se que seja devido ao sombreamento da cultura do milho, informações complementares sobre a densidade de plantas do componente arbóreo no NITA é explorado por KRUCHELSKI, *et al.*, 2021. Adicionalmente, nossas observações para os tratamentos L+ coinoculação e LP+ coinoculação são superiores aos achados de De Barros *et al.*, (2023), que indicaram que plantas de milho coinoculadas com MPCPs apresentaram incrementos de 4,37% na M1000, corroborando a tendência de ganhos observada em nossa pesquisa. Sugere-se que o maior desempenho produtivo observado na nossa pesquisa seja atribuído ao sinergismo dos fatores produtivos “Sistemas de Cultivo Integrado” e “Manejos”.

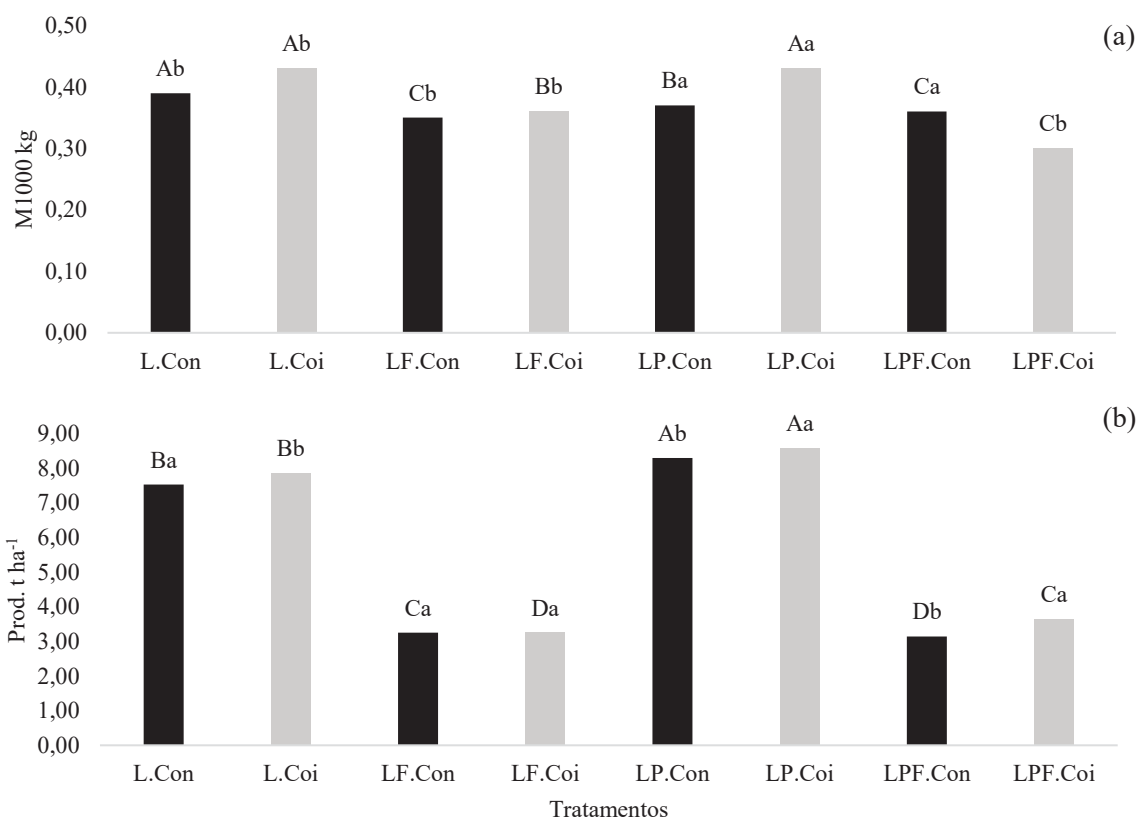


Figura 8. Médias de massa de 1000 grãos (M1000), Produtividade (Prod.) do milho em função dos fatores Sistema (S) e Manejo (M). Níveis de S: Lavoura (L), Lavoura-Pecuária (LP), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF) e níveis de M: Coinoculação (*Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum*) e Controle (sem microrganismos). Tukey a 5% de significância. Letras maiúsculas sobre as barras indicam diferenças significativas entre os níveis de S, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre os níveis de M.

Com relação à variável Prod. t ha<sup>-1</sup>, as maiores médias foram obtidas com o sistema de cultivo integrado i. LP + coinoculação e ii. LP + controle, com médias de 8,59 e 8,34 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Observa-se que o tratamento LP + coinoculação apresentou Prod. (t ha<sup>-1</sup>) 9,56% superior ao tratamento L + controle, e 136,63% superior ao tratamento LPF + controle.

Nossos achados são superiores às observações de Wu *et al.*, (2021), que observaram que o sistema integrado com patos-almiscarados em campos de milho, em comparação com ao plantio convencional de milho, não reduziu significativamente a produção de milho em termos de rendimento de grãos. Os patos mostraram boa adaptação ao sistema e ganho de peso superior aos dos patos criados em ambientes fechados.

Ademais, Wander *et al.*, (2022), indica que o consórcio de milho com *Eucalyptus urophylla* em um sistema agroflorestal apresentou variações significativas na produtividade

de grãos e no número de espigas, dependendo da distância entre as fileiras triplas de *E. urophylla* e da posição do milho em relação a essas fileiras. Especificamente, o milho plantado a 4,2 m de distância do *E. urophylla* na menor distância entre fileiras triplas (16,5 m) teve menor número de espigas e produtividade de grãos. Em contraste, o milho plantado a 8,2 m de distância do eucalipto, na maior distância entre fileiras triplas (37,1 m), apresentou maior número de espigas e produtividade. Adicionalmente, Fernandes *et al.*, (2020) observaram que plantas de arroz tratadas com diferentes MPCPs dentre eles *A. brasilense* e *T. asperellum* proporcionaram aumentos médios de até 206 e 167%, respectivamente, no rendimento de grãos de plantas de arroz de terras altas.

### 3.4 Análise de componentes principais – PCA

No que se refere a PCA que relaciona os componentes de produtividade com os tratamentos, é abordado na Tabela 3.

Tabela 3. Autovalores e % acumulado de variâncias de componentes principais – PCA.

|                          | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | Dim.4 | Dim.5 | Dim.6 | Dim.7 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Variância                | 5,2   | 1,3   | 0,3   | 0,0   | 0,02  | 0,001 | 0,0   |
| % de variância           | 74,8  | 19,8  | 4,3   | 0,6   | 0,29  | 0,009 | 0,0   |
| % Acumulado de variância | 74,8  | 94,7  | 99,0  | 99,6  | 99,9  | 100,0 | 100,0 |

Na tabela supramencionada a variabilidade entres os tratamentos são melhor descritas pelos componentes Dim-1 (74,9%) e Dim-2 (19,8%), representando 94,7% de variância dos dados e indicando que ocorrem menos de 6% de perda de informações

No Gráfico 1. é abordado a análise de componentes principais. Os vetores do, indicam a correlação entre os tratamentos (Figura a) e entre as variáveis (Figura b). O comprimento do vetor indica a variância, ou seja, quanto maior o vetor, maior a variância em campo. O ângulo formado entre dois vetores indica o grau de correlação entre as medidas. Um ângulo de 90° indica ausência de correlação e um ângulo maior que 90° indica correlação negativa ou inversa.



simples com espaçamento de 14 x 2 m entre linhas e entre plantas na linha. Sugere-se que a menor taxa fotossintética, acarretando em menores produtividades na cultura do milho, possa ser atribuída a esse espaçamento.

O tratamento mais expressivo foi o LP + coinoculação. Destaca-se que o componente morfológico MSPA apresentou um incremento de 17,14% no tratamento LP + coinoculação em comparação ao tratamento L + controle. No componente M1000, o sistema integrado LP + coinoculação demonstrou um aumento de 43% em relação ao sistema integrado LPF + controle.

Com relação aos componentes de rendimento de grãos, destaca-se que o tratamento integrado LP + coinoculação apresentou um incremento de 6% em comparação ao tratamento monocultural L + controle para o M1000. No que se refere à variável Prod. (t ha<sup>-1</sup>), as maiores médias foram obtidas nos sistemas de cultivo integrados: i) LP + coinoculação e ii) LP + controle, com médias de 8,59 e 8,34 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, diferenciando-se estatisticamente dos demais tratamentos. Observou-se que o tratamento LP + coinoculação apresentou Prod. (t ha<sup>-1</sup>) 9,56% superior ao tratamento L + controle, e 136,63% superior ao tratamento LPF + controle.

A análise de componentes principais revelou que os componentes Dim-1 (74,9%) e Dim-2 (19,8%) explicam 94,7% da variância dos dados, indicando uma perda mínima de informações. Os vetores mostraram a correlação entre os tratamentos e as variáveis, com três agrupamentos principais: o grupo 1, composto pelos tratamentos L, Lc, LP e LPc; o grupo 2, por LPFc e LFc; e o grupo 3, por LF e LPF, tratados com o coinoculado. Observou-se alta correlação entre as variáveis PROD, MSPA, MVPA e AIE, especialmente com os tratamentos L e LP, e uma correlação inversa com os tratamentos LF e LPF. A aplicação de coinoculado resultou em respostas superiores nos componentes de produtividade, enquanto as variáveis DC e AP apresentaram pouca ou nenhuma correlação com NFO e com os tratamentos L e LP.

Nossas pesquisas indicam que a coinoculação, quando associada a sistemas integrados de produção, é uma estratégia eficaz para otimizar a produção de milho, tanto em termos de componentes morfológicos quanto de rendimento de grãos.

## AGRADECIMENTOS

A UFPR, ao NITA, ao Grupo Agricultura Sustentável (GAAS), às empresas Dinamiza e Quality pelo apoio na pesquisa. À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos para o primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Felipe Miranda de Souza. Decomposição da produtividade total dos fatores da produção de milho no Brasil, 1995/96 a 2017. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

AL-TAMMAR, Fátima K.; KHALIFA, AYZ Bactérias que promovem o crescimento das plantas impulsionam a segurança alimentar. *Revista Brasileira de Biologia*, v. 82, p. e267257, 2022.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.*, Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARAUJO, Alisson Vinicius de *et al.*, Desempenho agrônômico de variedades crioulas e híbridos de milho cultivados em diferentes sistemas de manejo. *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, p. 885-892, 2013.

BARBOSA, Daniel de Queiroz *et al.*, Composição de plantas invasoras na cultura do milho em sistemas integrados de produção agropecuária sem o uso de herbicidas. In: *Ciência Brasileira: Múltiplos olhares - Agroecologia, Agronomia, Ciências do Campo e Medicina Veterinária. Anais...Recife(PE) Even3*, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/ebook/cb-agroecologia-agronomia-ciencias-do-campo-medicina-veterinaria-1/599649-composicao-de-plantas-invasoras-na-cultura-do-milho-em-sistemas-integrados-de-producao-agropecuaria-sem-o-uso-de->. Acesso em: 02/05/2024

BARBOSA, Julierme Zimmer *et al.*, Melhorar o rendimento e a saúde das culturas leguminosas através da co-inoculação com rizóbios e Trichoderma: Uma meta-análise global. *Ecologia Aplicada do Solo*, v. 176, p. 104493, 2022.

BASSO, Raíssa Furlan. Adoção de sistemas integrados de produção agropecuária como estratégia para intensificação sustentável. 2023.

BERTA, Graziella *et al.*, Maize development and grain quality are differentially affected by mycorrhizal fungi and a growth-promoting pseudomonad in the field. *Mycorrhiza*, v. 24, p. 161-170, 2014.

BULEGON, L. G., GUIMARÃES, V. F., EGEWARTH, V. A., Santos, M. G., Heling, A. L., Ferreira, S. D., Wengrat, A. A. G. S., & Battistus, A. G. (2016a). Crescimento e trocas gasosas no período vegetativo da soja inoculada com bactérias diazotróficas. *Nativa*, 4(5), 277-286.

CALONEGO, Juliano Carlos *et al.*, Produtividade e crescimento de milho em diferentes arranjos de plantas. *Agrarian*, v. 4, n. 12, p. 84-90, 2011.

CAMARGO, Nathyelle Assis; BUSO, Wilian Henrique Diniz. Desempenho produtivo de soja inoculada e co-inoculada em domínio Cerrado. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 8, p. e479985099-e479985099, 2020.

CARVALHO, Patricia Aparecida de. Suplementação artificial de luz na cultura do milho. 2023.

CRUZ, Dennis Ricardo Cabral *et al.*, Utilização de microrganismos multifuncionais na cultura do milho. *Revista Caatinga*, v. 36, n. 2, p. 349-361, 2023.

DE BARROS, Gustavo *et al.*, Inoculação e co-inoculação de bactérias do gênero bacillus, pseudomonas e azospirillum no cultivo de milho no noroeste paulista. *Unifunec científica multidisciplinar*, v. 12, n. 14, p. 1-13, 2023.

DE FACCIO CARVALHO, Paulo César *et al.*, Reconectando o gado de pasto às paisagens agrícolas: revertendo tendências de especialização para restaurar a multifuncionalidade da paisagem. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 5, p. 750765, 2021.

DE QUEIROZ B., Daniel *et al.*, Composição de plantas invasoras em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária. *Agropecuária Catarinense*, v. 34, n. 3, p. 33-36, 2021.

DOMINSCHEK, R. *et al.*, Sistemas integrados de produção agropecuária na promoção da intensificação sustentável. *Boletim Técnico do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária*. Curitiba: UFPR, 2018.

DOMINSCHEK, Rubia *et al.*, Crop rotations with temporary grassland shifts weed patterns and allows herbicide-free management without crop yield loss. *Journal of Cleaner Production*, v. 306, p. 127140, 2021.

DREBENSTEDT, Ireen *et al.*, A precipitação ambiental cumulativa anual determina os efeitos das alterações climáticas na biomassa e no rendimento de três importantes culturas agrícolas. *Pesquisa de Culturas de Campo*, v. 108766, 2023.

EMATER - Empresa de assistência técnica e extensão rural de minas gerais - MG. Regulamento do concurso estadual de produtividade de milho ano 2000/2001. Belo Horizonte, 2000. 11 p.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

FERNANDES, João Pedro Tavares *et al.*, Microrganismos promotores de crescimento de plantas-Trichoderma e Azospirillum: otimizando a cultura do milho em sistemas integrados de produção agropecuária. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 17, n. 2, p. e5090-e5090, 2024.

FERNANDES, João Pedro Tavares *et al.*, Physio-agronomic characterization of upland rice inoculated with mix of multifunctional microorganisms. *Revista Caatinga*, v. 33, p. 679-689, 2020.

FERNANDES, João Pedro Tavares *et al.*, Upland rice seedling performance promoted by multifunctional microorganisms. 2021.

FERRAZ, Marcelo Araújo Junqueira *et al.*, Determinação de altura de plantas de milho através da análise de imagens aéreas obtidas com ARP. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 1, p. 6900-6917, 2022.

FERREIRA, Daniel Furtado. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Brazilian Journal of Biometrics*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FERREIRA, Daniel Soares. *Melhoramento genético e sustentabilidade: uma revisão*. 2023.

GONZAGA, Benedito Alves; DE ANDRADE, Christiano Lima Lobo; CABRAL FILHO, Fernando Rodrigues. Tratamento de sementes de milho com bioestimulante. *Revista Brasileira de Ciência*, v. 3, pág. 46-53, 2023.

GRESPLAN, Daniel Silva *et al.*, Correlações e Análise de Trilha em Caracteres Agronômicos de Híbridos de Milho Segunda Safra Cultivados em Balsas-MA. *Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde*, v. 27, n. 1, p. 49-54, 2023.

HUF, Flávia Levinski *et al.*, Adubação de sistemas e comportamento dos nutrientes em sistema de integração lavoura-pecuária. 2018.

IDR- Paraná. Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR-EMATER. Atlas Climático do Estado do Paraná. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 2019. 210p. Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/system/files/publico/agrometeorologia/atlas-cli-maco/atlas-climatico-do-parana-2019>.

JAN, Bisma *et al.*, 2023. Acúmulo de massa seca do milho doce (*Zea mays*) sob condições variáveis de idade das mudas e fornecimento integrado de nutrientes. *Revista Indiana de Agronomia*, v. 2, pág. 223-226.

KONAI, Mauro Seyji Zanelli. Inoculação e Coinoculação de Solubilizadores de Fosfato no Cultivo de Milho com Residual de Fósforo. 2023.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der erde*. Gotha: verlag justus perthes. Wall-map 150cmx200cm, p. 91-102, 1928.

KRUCHELSKI, Silvano *et al.*, Crescimento e densidade de madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage em sistemas integrados lavoura-pecuária. *Sistemas Agroflorestais*, v. 95, n. 8, pág. 1577-1588, 2021.

MARTINS, Lucas Oliveira; ARCHANGELO, Eliane Regina. Crescimento e desenvolvimento da mandioca e do milho em cultivo solteiro e consorciado. *Agrico-environmental sciences*, v. 9, n. 2, p. 13-13, 2023.

MORAES, Anibal de *et al.*, Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 45, p. 1024-1031, 2014.

MORAES, Aníbal de *et al.*, Sistemas integrados de produção agropecuária. Conceitos básicos e histórico no Brasil. Souza ED, Silva FD, Assmann TS, Carneiro MAC, Carvalho PCF, Paulino HB, organizadores. *Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil*. Tubarão: Copiart, p. 13-28, 2018.

MOUROUZIDOU, Snezhana *et al.*, Apresentando o poder dos microrganismos promotores do crescimento das plantas em sistemas sem solo: uma alternativa promissora para a agricultura sustentável. *Sustentabilidade*, v. 15, n. 7, pág. 5959, 2023.

NASCENTE, Adriano Stephan *et al.*, Caracterização bioquímica de micro-organismos promotores de crescimento de plantas individuais e combinados. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 53, p. e75376, 2023a.

NASCENTE, Adriano Stephan *et al.*, Microrganismos benéficos que afetam o desenvolvimento radicular do arroz de terras altas. 2023b.

OLIVEIRA, Carlos Eduardo da Silva *et al.*, Leaf inoculation of *Azospirillum brasilense* and *Trichoderma harzianum* in hydroponic arugula improve productive components and plant nutrition and reduce leaf nitrate. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 52, p. e72755, 2022.

OLIVEIRA, Danielly Terra Monteiro *et al.*, Avaliação biométrica do uso de diferentes fontes de nitrogênio no milho safrinha. *Brazilian Journal of Science*, v. 2, n. 1, p. 63-71, 2023.

PATHANIA, Priyanka *et al.*, Papel das bactérias promotoras do crescimento das plantas na agricultura sustentável. *Biocatálise e Biotecnologia Agrícola*, v. 30, p. 101842, 2020.

PAULETTI, V., & MOTTA, A. C. V. (2019). Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. SBCS - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Curitiba-PR. 289 p.

PORFÍRIO DA SILVA, Vanderley *et al.*, Componente arbóreo nos sistemas integrados de produção agropecuária em área de proteção ambiental. 2018.

POSADA, A., MEJÍA, D., POLANCO-ECHEVERRY, D. & CARDONA, J. (2021). Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): Una revisión sistemática 1990-2019. *Revista de Investigación Agraria y ambiental*, 12 (2), 161 – 178.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

RASPE, Cristian Rafael; RASPE, Djéssica Tatiane. Inoculação e aplicação de diferentes doses de *Azospirillum brasilense* e sua influência no desenvolvimento da cultura do milho. *Uningá Review*, v. 36, p. eURJ3638-eURJ3638, 2021.

RODRIGUES, Aline Beatriz *et al.*, Caracterização morfológica e desempenho produtivo do milho (*Zea mays* L.) inoculado com bactérias promotoras de crescimento vegetal. 2023.

RUTHES, Barbara Elis Santos *et al.*, Soil Microbial Biomass, N Nutrition Index, and Yield of Maize Cultivated Under eucalyptus Shade in Integrated crop-livestock-forestry Systems. *International Journal of Plant Production*, v. 17, n. 2, p. 323-335, 2023.

SLIMANI, Aiman *et al.*, Isolamento e caracterização de PGPR e seu potencial para alívio da seca em plantas de cevada. *Gesunde Pflanzen*, v. 2, pág. 377-391, 2023.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*, 5ª Edição. Artmed, Porto Alegre, p. 954, 2013.

WU, Kaixian *et al.*, Farming ducks in a maize field: a new and potential crop-livestock system from China. ***Agronomy for Sustainable Development***, v. 41, p. 1-12, 2021.

### Capítulo III

**Desempenho morfológico e de rendimento de grãos do milho híbrido em sistema puro e integrado de produção agropecuário submetido a inoculação e coinoculação com *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum***

**Morphological performance and grain yield of hybrid maize in pure and integrated agricultural production systems submitted to inoculation and co-inoculation with *Azospirillum brasilense* and *Trichoderma asperellum***

**El rendimiento morfológico y de granos del maíz híbrido en un sistema puro e integrado de producción agropecuaria sometido a la inoculación y coinoculación con *Azospirillum brasilense* y *Trichoderma asperellum***

#### RESUMO

Com o aumento da população humana e do consumo de alimentos, o setor agropecuário está cada vez mais sendo questionado. Desse modo, cabe a este setor fazer o melhor uso das tecnologias disponíveis para atender à grande demanda populacional e preservar os recursos ambientais. A intensificação por meio de monocultivos, através da especialização na agricultura, gera impactos negativos aos recursos naturais. Da mesma forma, o uso excessivo de insumos tem levado a profundos questionamentos sobre a real importância dessas práticas. Nesse sentido, o uso de Microrganismos Promotores de Crescimento em Plantas (MPCPs) somado a implementação dos Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) pode ser alternativa estratégica para uma produção agropecuária intensiva e sustentável. Objetivou-se determinar o efeito do uso de MPCPs, inoculado ou coinoculado no desempenho agrônomico da cultura do milho em ambiente de sistemas de produção puro e SIPA. Para isso, foram conduzidas duas pesquisas no Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA), a distribuição dos tratamentos foi realizada segundo o delineamento em blocos casualizados - DBC, fatorial duplo (2x4), com três repetições, sendo fator (A) Sistemas de cultivo (monocultivo Lavoura – L, e sistema de cultivo integrado Lavoura Pecuária – LP), e fator (B) manejo com coinoculação (*Trichoderma asperellum* + *Azospirillum brasilense*) e controle (ausência da aplicação de microrganismos), avaliados em plantas de milho híbrido. O

sistema LP associado à coinoculação foi o tratamento mais eficaz, resultando em incrementos significativos nos componentes NFO, M1000 e Prod. Em comparação ao tratamento monocultural L + controle, o tratamento LP + coinoculação aumentou NFO em 66% e 77%, M1000 em 18% e 29%, e Prod. em 60% e 63% nas safras avaliadas. A análise de componentes principais (PCA) revelou correlações significativas entre AIE, DC e AP na safra de 2021, e entre PROD, MMG e NGF na safra de 2022, destacando a inter-relação entre características morfológicas e de produção de grãos. Portanto, a coinoculação em sistemas integrados de produção Lavoura-Pecuária se mostra uma estratégia eficiente para otimizar a produção de milho, melhorando tanto os componentes morfológicos quanto o rendimento de grãos.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade, promotores de crescimento em plantas, bioinsumos, produção vegetal

## ABSTRACT

With the increasing human population and rising food consumption, the agricultural sector is facing growing scrutiny. Thus, it is incumbent upon this sector to make the best use of available technologies to meet the high population demand while preserving environmental resources. Intensification through monoculture, by means of agricultural specialization, has negative impacts on natural resources. Similarly, the excessive use of inputs has led to serious questioning of the real importance of these practices. In this context, the use of Plant Growth-Promoting Microorganisms (PGPMs), combined with the implementation of Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS), may offer a strategic alternative for intensive and sustainable agricultural production. The objective was to determine the effect of PGPMs, inoculated or co-inoculated, on the agronomic performance of maize in pure crop and ICLS environments. To this end, two studies were conducted at the Agricultural Technological Innovation Center (NITA), where treatments were distributed according to a randomized block design (RBD), in a 2x4 factorial arrangement, with three replications. Factor (A) consisted of cropping systems (monoculture—Crops, and integrated crop-livestock system—ICLS), and factor (B) consisted of management practices with co-inoculation (*Trichoderma asperellum* + *Azospirillum brasilense*) and control (absence of microorganism application), evaluated in hybrid maize plants. The ICLS system combined with co-inoculation was the most effective treatment, resulting in significant increases in the NFO, M1000, and Prod. components. Compared to the

monoculture + control treatment, the ICLS + co-inoculation treatment increased NFO by 66% and 77%, M1000 by 18% and 29%, and Prod. by 60% and 63% in the evaluated seasons. Principal component analysis (PCA) revealed significant correlations between AIE, DC, and AP in the 2021 season, and between PROD, MMG, and NGF in the 2022 season, highlighting the interrelationship between morphological characteristics and grain production. Therefore, co-inoculation in integrated crop-livestock systems proves to be an efficient strategy to optimize maize production, improving both morphological components and grain yield.

**Keywords:** Sustainability, plant growth promoters, bioinputs, plant production

## RESUMEN

Con el aumento de la población humana y del consumo de alimentos, el sector agropecuario está siendo cada vez más cuestionado. De este modo, corresponde a este sector hacer el mejor uso de las tecnologías disponibles para satisfacer la gran demanda poblacional y preservar los recursos ambientales. La intensificación mediante monocultivos, a través de la especialización en la agricultura, genera impactos negativos en los recursos naturales. De la misma manera, el uso excesivo de insumos ha llevado a profundos cuestionamientos sobre la verdadera importancia de estas prácticas. En este sentido, el uso de Microorganismos Promotores del Crecimiento de Plantas (MPCP), sumado a la implementación de los Sistemas Integrados de Producción Agropecuaria (SIPA), puede ser una alternativa estratégica para una producción agropecuaria intensiva y sostenible. El objetivo fue determinar el efecto del uso de MPCP, inoculados o coinoculados, en el desempeño agronómico del cultivo de maíz en ambientes de sistemas de producción puro y SIPA. Para ello, se llevaron a cabo dos investigaciones en el Núcleo de Innovación Tecnológica en Agropecuaria (NITA), donde la distribución de los tratamientos se realizó según un diseño en bloques al azar (DBA), con un arreglo factorial doble (2x4) y tres repeticiones. El factor (A) fue sistemas de cultivo (monocultivo Lavoura - L, y sistema de cultivo integrado Lavoura-Pecuaria - LP), y el factor (B) fue el manejo con coinoculación (*Trichoderma asperellum* + *Azospirillum brasilense*) y control (ausencia de aplicación de microorganismos), evaluados en plantas de maíz híbrido. El sistema LP asociado a la coinoculación fue el tratamiento más eficaz, resultando en incrementos significativos en los componentes NFO, M1000 y Prod. En comparación con el tratamiento monocultural L + control, el tratamiento LP + coinoculación aumentó NFO en un 66% y 77%, M1000 en un 18% y 29%, y Prod. en un 60% y 63% en las cosechas evaluadas. El análisis de componentes

principales (ACP) reveló correlaciones significativas entre AIE, DC y AP en la cosecha de 2021, y entre PROD, MMG y NGF en la cosecha de 2022, destacando la interrelación entre características morfológicas y de producción de grano. Por lo tanto, la coinoculación en sistemas integrados de producción Lavoura-Pecuaria demuestra ser una estrategia eficaz para optimizar la producción de maíz, mejorando tanto los componentes morfológicos como el rendimiento de grano.

**Palabras clave:** Sostenibilidad, promotores de crecimiento en plantas, bioinsumos, producción vegetal.

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda por práticas agrícolas conservacionistas tem crescido significativamente nos últimos anos, impulsionada por uma crescente conscientização sobre a importância da sustentabilidade e a necessidade de mitigar os impactos ambientais da agricultura. Esse movimento está estreitamente correlacionado com a crescente demanda por alimentos saudáveis, refletindo uma mudança nos hábitos de consumo e nas expectativas dos consumidores (Fernandes *et al.*; 2024).

Os modelos atuais de produção agrícola a nível mundial estão sendo repensados, buscando-se alternativas que melhor atendam às demandas atuais por alimentos, com menor uso de produtos sintéticos e a adoção de boas práticas para a intensificação sustentável da produção. Dentre essas práticas agrícolas de intensificação sustentável, destacam-se os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) e os microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCPs), pois oferecem melhores resultados em termos sociais, econômicos e ambientais (Fernandes, *et al.*, 2020).

Mais especificamente sobre os SIPA, esses agroecossistemas podem explorar diferentes atividades agrárias como agricultura, criação de animais e espécies florestais ou arbóreas e compor arranjos de diferentes modelos como agropastoris, silvipastoris, agrofloresta e agrossilvipastoris dentro da mesma área, buscando os sinergismos dos diferentes componentes produtivos (Moraes, 2014; Carvalho *et al.*, 2010).

Além disso, os SIPA, são também uma alternativa em detrimento dos sistemas de monocultivo, isso porque, os sistemas nonoculturais tem demonstrado que podem potencializar a seleção de pragas, doenças e plantas daninhas, além de requerer alto gastos em insumo e altos custo de produção e menor lucratividade comparação ao SIPA (Lang & Moraes 2018, Dominschek R., *et al.*, 2021).

A título de exemplo, um estudo conduzido por Bartmeyer *et al.*, (2011) avaliou a produtividade de grãos da cultivar de trigo de duplo propósito e o ganho de peso de bovinos em função de diferentes períodos de pastejo, levando em consideração a intensidade do pastejo. Os tratamentos foram divididos em quatro períodos de pastejo: T-0 (zero dias); T-15 (15 dias); T-30 (30 dias); e T-45 (45 dias). Novilhos com peso inicial de 260 kg foram mantidos em pastoreio contínuo, com lotação variável e uma oferta diária de forragem equivalente a 8% do peso vivo dos animais.

Os resultados dessa pesquisa mostraram que a produtividade de grãos a título de exemplo foi de 4.154 kg ha<sup>-1</sup> para T-15; 3.210 kg ha<sup>-1</sup> para T-30. Em termos de ganho de peso vivo, os valores foram de 181 kg ha<sup>-1</sup> para T-15; 351 kg ha<sup>-1</sup> para T-30. Esses resultados indicam alto potencial de produção de grãos da cultura do trigo duplo propósito, mesmo sob pastejo, e tolerância a diferentes intensidades de desfolha, demonstrando uma interação positiva entre os componentes animal e agrícola, com características de maior resiliência ambiental e econômica.

Outra forma de manejo produtivo visando à intensificação da produção com sustentabilidade são os MPCPs, que podem proporcionar maiores benefícios para diferentes tipos de plantas como maior desenvolvimento radicular, aumento da biomassa seca e produtividade de grãos (Machado *et al.*, 2020; Lopes *et al.*, 2021b; Sales *et al.*, 2021). Esses bioagente podem ser colocados em contato com as plantas na forma inoculação (um único MPCPs) ou na forma de coinoculação (dois ou mais MPCPs) com o intuito de proporcionar benefícios sinérgicos ou complementares para as plantas (Souza *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2021a).

Outro ponto interessante no contexto dos MPCPs é o manejo da inoculação ou coinoculação, que tem apresentado benefícios variados conforme o modelo adotado. A inoculação consiste em colocar em contato com a planta um MPCPs, como uma bactéria ou

fungo. Já a coinoculação consiste em colocar em contato a planta dois ou mais MPCPs, como bactérias e/ou fungos, explorando os benefícios sinérgicos dos microrganismos (Fernandes et al 2024).

Como exemplo, Bakhshandeh (2020) avaliou a eficácia de três MPCPs (*Pantoea ananatis*, *Enterobacter* sp. e *Piriformospora indica*) associados à adubação e seus efeitos no desenvolvimento e produtividade do arroz (*Oryza sativa* L.) sob diferentes níveis de fertilizante de sulfato de potássio (PSF) em dois experimentos de campo. Os resultados mostraram que esses microrganismos aumentaram significativamente a biomassa seca do arroz em comparação ao tratamento controle, além de melhorar a absorção de fósforo e potássio e a eficiência do uso de nutrientes.

Além disso, observou-se que a coinoculação de *P. ananatis* e *P. indica* no primeiro experimento, assim como a aplicação combinada (semente + raiz da muda) no segundo experimento, foram particularmente benéficas para a cultura do arroz. O rendimento de grãos aumentou linearmente com a adição de PSF até 110 kg ha<sup>-1</sup>, alcançando um máximo de 5.348 kg ha<sup>-1</sup> (32% maior que o controle) com 180 kg ha<sup>-1</sup> no primeiro experimento. No segundo experimento, o rendimento máximo foi de 5.330 kg ha<sup>-1</sup> (20% maior que o controle) com 100 kg ha<sup>-1</sup> de PSF. Assim, os métodos de coinoculação e inoculação combinada demonstraram ser estratégias eficazes para melhorar a eficiência do uso de nutrientes, o crescimento da cultura do arroz e a intensificação produtiva sustentável.

No contexto da busca por uma intensificação produtiva sustentável, a cultura do milho (*Zea mays* L.) merece destaque, pois, sendo uma cultura exigente em tecnologia e manejo, pode obter ganhos produtivos significativos com a implementação de práticas de manejo sustentável como os SIPA e os MPCPs. Esta cultura figura como o cereal mais cultivados globalmente, conforme indicado por Romero Flores *et al.*, (2023). Apesar do notável crescimento da produção de milho no Brasil ao longo das últimas décadas, observa-se que as produtividades ainda se mantêm aquém do desejado (Almeida, 2023) Diante desse cenário, torna-se imperativo adotar práticas alternativas que possam efetivamente contribuir para a otimização da produtividade dessa cultura, visando atender à crescente demanda por alimentos de forma sustentável e eficiente.

Nesse sentido, ainda existem questionamentos se o uso de MPCP em coinoculação associado ao cultivo em SIPA poderia apresentar resultados superiores comparado a não utilização de MPCP e sistema de monocultivo do milho.

Este trabalho tem como hipóteses: i.. A cultura do milho apresenta melhor desempenho em termos de características morfológicas quando coinoculada com MPCPs; ii.. A cultura do milho tem maior rendimento de grãos quando cultivada em sistemas SIPA; iii. A combinação de coinoculação com MPCPs e cultivo em sistemas SIPA resulta no melhor desempenho geral da cultura do milho.

Assim, o objetivo deste trabalho é determinar os efeitos morfológicos e a produtividade de grãos na cultura do milho quando submetida a à aplicação com MPCPs e cultivo em SIPA.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização da área experimental**

Foram realizadas duas pesquisas durante as safras 2021-22 e 2022-23 na unidade da estação experimental da Fazenda Canguiri, especificamente no Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA) da Universidade Federal do Paraná - UFPR, localizado em Pinhais, Paraná, nas coordenadas 25°24'05"S 49°07'14"W. O NITA abriga agroecossistemas que incluem tanto sistemas de monocultivo convencionais quanto SIPA, os quais foram gradualmente implementados a partir de 2012, conforme descrito por Lang & Moraes (2018).

### **2.2 Características Climáticas e Ambientais**

Apresenta clima oceânico temperado (Cfb), média anual de precipitação de 1.400 mm e temperaturas mínimas e máximas médias de 12,5°C e 22,5°C, respectivamente, sujeito a geadas, conforme classificação de Köppen-Geiger (1928) e dados do IAPAR (2013). O NITA adere às restrições regulamentares relacionadas ao uso de defensivos agrícolas, conforme

estabelecido pelo decreto estadual nº 1.753/96 e pela lei 6.938/81, que regulamentam a Área de Proteção Ambiental (APA), como descrito por Lang & Moraes (2018).

### 2.3 Caracterização do Solo

O solo é caracterizado como do tipo cambissolo háplico Tb distrófico típico (Embrapa, 2006) e características químicas do solo a saber na Tabela 1. demais Informações históricas dos usos do solo antes da NITA são apresentadas por Kruchelski *et al.*, (2021).

Tabela 1. Atributos químicos do solo 0-10 cm em diferentes sistemas agrícolas. Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA), Pinhais, Paraná.

| Sistemas* | pH                | P                      | MO                    | K <sup>+</sup>                | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | H<br>+Al | SB   | CTC<br>Potencial | R C                |
|-----------|-------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|------------------|----------|------|------------------|--------------------|
|           | CaCl <sub>2</sub> | mg<br>dm <sup>-3</sup> | g<br>dm <sup>-3</sup> | ----cmol dm <sup>-3</sup> --- |                  |                  |          |      |                  | t ha <sup>-1</sup> |
| L         | 5,00              | 4,18                   | 40,07                 | 0,39                          | 5,47             | 2,72             | 4,44     | 8,58 | 13,02            | 3,60               |
| LP        | 5,07              | 4,37                   | 39,09                 | 0,19                          | 3,60             | 2,77             | 7,97     | 6,56 | 13,01            | 3,40               |

\* Abreviaturas: (Monocultivo lavoura, L), (lavoura-pecuária, LP). (matéria orgânica, MO); (resíduo cultural, RC). Conforme Pauletti e Motta (2019) e Ruths *et al.*, (2023). Os teores de fósforo (P) são considerados baixos, MO médios, K, Ca e Mg altos.

### 2.4 Delineamento da pesquisa de longa duração

É do tipo delineamento em blocos casualizados (DBC), com três repetições e sete tratamentos distintos: I - Lavoura (L); II - Floresta (F); III - Pecuária (P); IV - Lavoura-Pecuária (LP); V - Lavoura-Floresta (LF); VI - Pecuária-Floresta (PF); e VII - Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF). A declividade do terreno e os padrões de drenagem foram considerados como fatores de bloqueio.

### 2.5 Delineamento de pesquisa de curta duração – “Sistemas de Cultivo” e “Manejos Microbiológicos”

O delineamento experimental utilizado nas duas safras foi do tipo delineamento em blocos casualizados (DBC), com três repetições, em um esquema fatorial, com os níveis (2x4). O fator A representou os sistemas de cultivo (L e LP), enquanto o fator B representou os

manejos (inoculação com *T. asperellum*; inoculação com *A. brasilense*; coinoculação com *T. asperellum* + *A. brasilense*; e um controle sem aplicação de microrganismos). Foram coletadas sete amostras aleatórias em cada tratamento, totalizando 21 amostras para cada variável estudada na cultura do milho híbrido.

### 2.5.1 Manejo do tratamento L

No protocolo de pesquisas do NITA, no verão cultiva-se as culturas do milho e/ou girassol (*Helianthus annuus*) enquanto a aveia preta (*Avena strigosa Schreb.*) é semeada no inverno para fins de cobertura do solo, conforme detalhado por Lang & Moraes (2018).

### 2.5.2 Manejo do tratamento LP

No NITA, para o tratamento LP adota-se o sistema ley farming, que é uma abordagem agroecológica que visa aumentar a produtividade e a sustentabilidade das propriedades agrícolas por meio da integração de culturas anuais (como cereais ou oleaginosas) e pastagens perenes (como gramíneas e leguminosas) em um sistema de rotação planejada, visando melhoria na fertilidade do solo; maior controle de pragas e doenças; e diversificação da produção, a título de exemplo (Edwards, *et al.*, 2019).

Durante três anos consecutivos o tratamento LP é ocupado com atividade pecuária bovina de corte com predominância de raças europeias. O pastejo é do tipo extensivo seguindo os preceitos do pastoreio rotatínuo. No verão, a composição botânica da pastagem é composta predominantemente pela forrageira perene *M. maximus* cv. Áries. No inverno, devido aos efeitos do vazio forrageiro utiliza-se a forrageira aveia preta em sobresemeadura no capim Áries.

Durante o inverno anterior a semeadura do milho o pasto é vedado, sem pastejo, pois busca-se a formação de biomassa vegetal para cobertura do solo e semeadura da cultura de verão em plantio direto.

### 2.5.3 Protocolo de inoculação e coinoculação

As aplicações do MPCPs ocorreram em três momentos: I - microbiolização de sementes de milho no dia da semeadura, com 0,5 ml por microrganismo para o tratamento de 500 sementes; II e III - rega de 100 ml de suspensão em 10 metros na linha de semeadura aos 7 e 21 dias após a semeadura (DAS).

Para aplicação dos MPCPs utilizou-se pulverizador manual costal, com pressão constante de CO<sub>2</sub>, com bico tipo cônico (TX VS2). Entre as aplicações de cada tratamento o pulverizador era desinfetado com água mais detergente líquido e também com álcool 70%, adaptado de Fernandes, *et al.*, 2020.

### 2.6 Adubações

As adubações na cultura do milho foram realizadas em três momentos distintos por safra. Primeiramente, com fosfato reativo natural (29% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) a uma dose de 60 kg ha<sup>-1</sup>, distribuído de forma mecanizada a lanço, com trator e implemento distribuidor de insumos pendular, uma semana antes das semeaduras. Em seguida, com adubação de base simultaneamente às semeaduras, em 15 de outubro das respectivas safras, com ureia (46% de N) a uma dose de 60 kg ha<sup>-1</sup>, de forma mecanizada com trator e semeadoura-adubadora a 0,45 m de espaçamento entre linhas. Por fim, no estágio V3 da cultura do milho, em ambas as safras, aplicou-se cloreto de potássio (60% de K<sub>2</sub>O) e ureia (46% de N) a uma dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> por adubo.

Adicionalmente, conforme os princípios da adubação de sistemas, as mesmas doses dos adubos foram aplicadas de maneira simultânea nos demais tratamentos em ambas as safras.

### 2.7 Semeaduras

Nas duas safras utilizou-se sementes do milho híbrido VTPRO Biomatrix, sem dessecação e em sobresemeadura na cultura da aveia. Essas operações nas datas 15 de outubro das respectivas safras, utilizou-se trator e implemento semeadoura.

## 2.8 Desbaste de plantas

Nas datas de novembro de 2021 e 2022, quando as plantas estavam no estágio V3, com três folhas expandidas, realizou-se o desbaste de plantas na área útil de coleta de amostras, mantendo-se três plantas por metro linear, obtendo-se uma densidade de 66 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

## 2.9 Manejo fitossanitário

Durante as safras não foi necessário a intervenção de para controle fitossanitário de insetos e doenças. No entanto, as plantas de milho sofreram competição com plantas espontâneas, o estudo da composição e feitos em produtividade de plantas espontâneas no NITA é destacado por Dominschek *et al.*, 2020 na cultura do girassol e Barbosa *et al.*, 2021 na cultura do milho.

## 2.10 Componentes de rendimento morfológico

Nas duas safras foram avaliados os componentes: 1. altura de planta AP (cm); 2. diâmetro de colmo DC (cm); 3. altura de inserção da espiga AIE (cm); 4. número de folhas NFO (unid.); 5. massa verde parte aérea MVPA por planta (kg); 6. produtividade de massa seca da parte aérea por ha<sup>-1</sup> MSPA (kg).

## 2.11 Coleta de dados componentes morfológicos

Todas as avaliações de rendimento morfológico ocorreram em 70% de densidade de plantio no florescimento pleno nas respectivas safras, com metodologia de coleta de dados a saber:

1. AP: Medida em centímetros (cm) a partir do solo até a ponta da folha mais alta da planta, utilizando uma trena;
2. DC: Medido em centímetros (cm) na parte inferior do colmo, próximo ao solo, utilizando um paquímetro;
3. AIE: Medida em centímetros (cm) a partir do solo até o ponto de inserção da espiga na planta, utilizando uma trena;
4. NFO: Contagem do

número total de folhas por planta; 5. MVPA: Massa em quilogramas (kg) da parte aérea verde de cada planta, obtido através da colheita e pesagem individual das plantas em balança digital; 6. MSPA: Massa em quilogramas (kg) da parte aérea seca de cada planta, obtido após secagem em estufa a 60° C por 72 horas e aferição em balança de precisão.

## **2.12 Componentes de rendimento de grãos**

Para as duas safras os componentes de rendimentos de grãos foram: 1. número de espigas NE (unid.); 2. número de fileiras NFI (unid.); 3. número de grãos por fileira NGF (unid.); 3. massa de 1.000 grãos M1000 (kg); 4. Produtividade por ha Prod. (t ha<sup>-1</sup>).

## **2.13 Coleta de dados de rendimento de grãos**

Nas duas safras a coleta de dados ocorreu no estágio reprodutivo (R6). Todas as avaliações foram aferidas durante o estágio de maturação plena de grãos e corrigido umidade para 13%. Para as variáveis NE, NFI, NGF, M1000 (kg), PROD, foi estimado pelo método Emater-MG (2000).

## **2.13 Análise de dados**

Os dados brutos foram submetidos à análise de variância (ANANVA) e teste comparativo de médias Tukey a 5% de probabilidade e adicionalmente foi feita uma análise multivariada de componentes principais (PCA) para comparar a correlação entre as variáveis resposta dos componentes morfológicos e de rendimento de grãos, utilizou-se os pacotes estatísticos Sisvar e R (Ferreira, 2020; R, 2020).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Teste F da ANOVA – Para componentes morfológicos e de rendimento de grãos - Primeira e Segunda Safra

Os dados da ANOVA para os componentes morfológicos e de rendimento de grãos são apresentados na Tabela 2. Após a verificação do atendimento aos pressupostos da análise, as médias foram comparadas pelo teste post-hoc de Tukey.

Tabela 2. Valores do teste de F (ANAVA) da primeira e segunda safra, para a altura de planta - AP; altura de inserção da espiga - AIE; número de folhas - NFO; diâmetro de colmo - DC; massa verde parte aérea - MVPA; massa seca parte aérea - MSPA; número de espigas - NE; número de fileiras - NFI; número de grãos por fileira - NGF; massa de mil grãos - MMG; produção - PROD)

| Fatores        | AP | AIE | DC | NFO  | MVPA | MSPA | NE                 | NFI   | NGF | MMIL | PROD               |
|----------------|----|-----|----|------|------|------|--------------------|-------|-----|------|--------------------|
|                |    | cm  |    | und. | kg   |      |                    | unid. |     | kg   | t ha <sup>-1</sup> |
| Primeira safra |    |     |    |      |      |      |                    |       |     |      |                    |
| Sistema (S)    | -- | --  | -- | --   | --   | --   | 0,47 <sup>ns</sup> | --    | --  | --   | --                 |
| Manejo (M)     | -- | --  | -- | --   | --   | --   | 0,07 <sup>ns</sup> | --    | --  | --   | --                 |
| S x M          | -- | --  | -- | --   | --   | --   | 0,07 <sup>ns</sup> | --    | --  | --   | --                 |
| Segunda safra  |    |     |    |      |      |      |                    |       |     |      |                    |
| Sistema (S)    | -- | --  | -- | --   | --   | --   | --                 | --    | --  | --   | --                 |
| Manejo (M)     | -- | --  | -- | --   | --   | --   | 0,18 <sup>ns</sup> | --    | --  | --   | --                 |
| S x M          | -- | --  | -- | --   | --   | --   | 0,32 <sup>ns</sup> | --    | --  | --   | --                 |

ns: Não significativo, P<0,05; -- = (P<0,01)

Em relação aos valores do teste F da ANOVA, todos os componentes foram analisados conforme os fatores individuais (S) e (M), bem como a interação entre eles (S x M). No que diz respeito à variável NE, esta apresentou (p>0,05), indicando ausência de significância estatística. Já os demais componentes apresentaram (p<0,01), indicando significância estatística elevada. Essas observações são discutidas com mais detalhes a seguir.

#### 3.2 Componentes Morfológicos

Nas tabelas 3 e 4, são apresentadas as médias, o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação (CV %) dos diferentes componentes morfológicos AP, DC, AIE, NFO, MVPA, MSPA

na cultura do milho, submetida a diferentes sistemas de produção e manejos com MPCPs, na primeira e segunda safra, respectivamente.

Tabela 3. Médias geral ( $\mu$ ); desvio padrão ( $\sigma$ ); e coeficiente de variação (CV %) dos componentes morfológicos da cultura do milho sob os fatores: “Sistemas de Cultivo” (i. Lavoura – L; e ii. Lavoura-Pecuária – LP); e “Manejos Microbiológicos” (i. *Azospirillum brasilense*; ii. *Trichoderma asperellum*; iii. Coinoculação: *A. brasilense* + *T. asperellum*; iv. controle: ausência de aplicação de microrganismos) nos componentes de altura de planta (AP, cm), diâmetro de colmo (DC, cm), altura de inserção da espiga (AIE, cm), número de folhas (NFO, un.), massa verde parte aérea (MVPA, kg pl-1), massa seca da parte aérea (MSPA, kg pl-1). Safra 2021-22, Pinhais, Paraná

| Sistemas | Manejos              | AP           | AIE   | DC     | NFO       | MVPA       | MSPA   |
|----------|----------------------|--------------|-------|--------|-----------|------------|--------|
|          |                      | -----cm----- |       |        | --unid.-- | ----Kg---- |        |
| L        | <i>T. asperellum</i> | 230Bb        | 102Ac | 3,50Ac | 11Bc      | 0,119Ac    | 0,62Bc |
| L        | <i>A. brasilense</i> | 235Bb        | 106Ab | 3,60Ab | 12Bb      | 0,123Ab    | 0,65Bb |
| L        | Coinoculado          | 250Ba        | 110Aa | 4,00Aa | 13Ba      | 0,142Aa    | 0,79Ba |
| L        | Controle             | 225Bc        | 98Ad  | 3,40Ad | 9Bd       | 0,115Ad    | 0,58Bd |
| LP       | <i>T. asperellum</i> | 250Ab        | 105Ac | 3,60Ac | 12Ac      | 0,112Bc    | 0,63Ac |
| LP       | <i>A. brasilense</i> | 252Ab        | 110Ab | 3,80Ab | 12Ab      | 0,128Bb    | 0,69Ab |
| LP       | Coinoculado          | 275Aa        | 120Aa | 4,20Aa | 15Aa      | 0,158Aa    | 0,82Aa |
| LP       | Controle             | 230Ac        | 102Ad | 3,40Ad | 10Ad      | 0,108Bd    | 0,61Ad |
|          | $\mu$                | 243          | 106   | 3,69   | 11,75     | 12,56      | 6,74   |
|          | $\sigma$             | 16,6         | 6,78  | 0,29   | 1,83      | 1,68       | 0,87   |
|          | CV %                 | 6,82         | 6,36  | 7,86   | 15,59     | 13,39      | 12,96  |

Nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas referem-se ao fator Sistema e letras minúsculas referem-se ao fator Manejo.

Tabela 4. Médias geral ( $\mu$ ); desvio padrão ( $\sigma$ ); e coeficiente de variação (CV %) dos componentes morfológicos da cultura do milho sob os fatores: “Sistemas de Cultivo” (i. Lavoura – L; e ii. Lavoura-Pecuária – LP); e “Manejos Microbiológicos” (i. *Azospirillum brasilense*; ii. *Trichoderma asperellum*; iii. Coinoculação: *A. brasilense* + *T. asperellum*; iv. controle: ausência de aplicação de microrganismos) nos componentes de altura de planta (AP), diâmetro de colmo (DC), altura de inserção da espiga (AIE), número de folhas (NFO), massa verde parte aérea (MVPA), massa seca da parte aérea (MSPA). Safra 2022-23, Pinhais, Paraná

| Sistemas | Manejos               | AP           | AIE   | DC     | NFO     | MVPA         | MSPA    |
|----------|-----------------------|--------------|-------|--------|---------|--------------|---------|
|          |                       | -----cm----- |       |        | --un.-- | -----kg----- |         |
| L        | <i>T. asperellum</i>  | 228Bd        | 106Bb | 3,60Bb | 12Bb    | 0,124Bc      | 0,84Ac  |
| L        | <i>A. brasillense</i> | 245Bb        | 104Bc | 3,40Bc | 11Bb    | 0,137Bb      | 0,108Ab |
| L        | Coinoculado           | 245Ba        | 108Ba | 4,00Ba | 15Ba    | 0,149Ba      | 0,112Aa |
| L        | Controle              | 229Bc        | 102Bd | 3,10Bd | 9Bc     | 0,119Bd      | 0,81Ad  |
| LP       | <i>T. asperellum</i>  | 240Ad        | 125Ab | 3,60Ab | 12Ab    | 0,124Ac      | 0,68Bc  |
| LP       | <i>A. brasillense</i> | 245Ab        | 118Ac | 3,60Ac | 14Ab    | 0,139Ab      | 0,72Bb  |
| LP       | Coinoculado           | 260Aa        | 125Aa | 4,00Aa | 16Aa    | 0,165Aa      | 0,114Aa |
| LP       | Controle              | 240Ac        | 115Ad | 3,10Ad | 12Ac    | 0,111Bd      | 0,63Bd  |
|          | $\mu$ geral           | 241          | 112   | 3,55   | 12      | 13,35        | 9,2     |
|          | $\sigma$              | 10,16        | 9,2   | 0,35   | 2,26    | 1,76         | 2,88    |
|          | CV %                  | 4,21         | 8,15  | 9,76   | 17,93   | 13,19        | 31,27   |

Nível de 5% de significância pelo teste de Tukey; Letras maiúsculas referem-se ao fator Sistema e letras minúsculas referem-se ao fator Manejo.

Os maiores incrementos nos componentes AP, AIE e DC foram observados no sistema de cultivo LP, que diferiu estatisticamente do sistema L. Adicionalmente, também houve diferença significativa para todos os níveis do fator manejo no sistema de cultivo LP, sendo que o tratamento LP + coinoculação apresentou as maiores médias de 260, 125 e 4 cm, respectivamente, para os componentes supramencionados.

Nossos achados estão alinhados com os trabalhos de Ferreira (2018) e Oliveira (2024), que também observaram maiores incrementos em AP e AIE. Ademais, Konai (2023) e Da Cruz *et al.*, (2024) também reportaram maiores incrementos no DC em plantas de milho submetidas a diferentes MPCPs, em comparação ao tratamento controle (ausência de utilização de microrganismos), e indicaram um possível incremento na produção de auxina estimulado pelos MPCPs. Assim como, nossos resultados são comparáveis às descobertas de Kang (2008) e Simão *et al.*, (2018), que observaram menores médias em componentes morfológicos de plantas de milho cultivadas em sistema de cultivo que tem em sua composição o componente arbóreo.

Com relação ao componente NFO, o tratamento que apresentou as maiores médias nas duas safras avaliadas foi o LP + coinoculação, com diferença significativa entre os níveis de sistema e de manejo. Quanto à MVPA, os tratamentos que obtiveram as maiores médias foram: i. L + coinoculado, com 0,158 kg pl<sup>-1</sup>, e ii. LP + coinoculado, com 0,142 kg pl<sup>-1</sup>, ambos na primeira safra. Na segunda safra, o tratamento LP + coinoculado apresentou a maior média, com 0,165 kg pl<sup>-1</sup>. Outro destaque é que o tratamento sistema integrado LP + coinoculação apresentou incrementos na ordem de 66 e 77% em NFO em comparação ao tratamento monocultural L + controle, nas respectivas safras supramencionadas.

Outro destaque é que o NFO e a MVPA são componentes vitais, uma vez que plantas que apresentam um valor acumulado adequado desses componentes exibem uma maior taxa fotossintética. Essa condição pode resultar em uma produção mais elevada de fotoassimilados, o que potencialmente está relacionado a um maior desempenho produtivo de grãos, especialmente quando associado às MPCPs (Gonzaga *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2023; Cruz *et al.*, 2023).

Nossos dados condizem com estudo de Klein *et al.*, 2018, que observou quantidade média NFO em plantas de milho semelhante aos verificados no tratamento LP + coinoculação. Ademais, no que diz respeito aos sistemas de cultivo, Bernis-Fonteneau *et al.*, (2024) avaliaram

o papel da diversidade intraespecífica de culturas, gado e espécies aquáticas cultivadas na manutenção dos serviços ecossistêmicos. Seus resultados indicam que a diversidade intraespecífica fornece benefícios diretos e indiretos tanto à, componentes morfológicos, produtividade agrícola quanto à saúde do ecossistema, o que está em alinhamento com os nossos achados.

O tratamento que apresentou a maior produção em MSPA foi o LP + coinoculação, com 0,82 kg pl<sup>-1</sup> para a primeira safra e, para a segunda safra, i. LP + coinoculação e ii. L + coinoculação, com 0,114 e 0,112 kg pl<sup>-1</sup>, respectivamente. A MSPA, que representa a porção da biomassa seca da parte aérea, é um componente cuja quantificação é essencial para entender vários aspectos do crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura (Jan *et al.*, 2023). Nossa pesquisa corrobora os achados de Cruz *et al.*, (2023) e Anunciação *et al.*, (2024), que também observaram maiores incrementos em MSPA em plantas de milho e trigo quando associadas a MPCPs.

### 3.3 Componentes de rendimento de grãos

Nas tabelas 5 e 6, apresentam-se as médias, o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação (CV %) dos diferentes componentes morfológicos NE, NFI, NGF, M1000 e Prod. na cultura do milho, submetida a diferentes sistemas de produção e manejos com MPCPs, na primeira e segunda safra, respectivamente.

Tabela 5. Médias geral ( $\mu$ ); desvio padrão ( $\sigma$ ); e coeficiente de variação (CV %) dos componentes de rendimento de grãos da cultura do milho sob os fatores: “Sistemas de Cultivo” (i. Lavoura – L; e ii. Lavoura-Pecuária – LP); e “Manejos Microbiológicos” (i. *Azospirillum brasilense*; ii. *Trichoderma asperellum*; iii. Coinoculação: *A. brasilense* + *T. asperellum*; iv. controle: ausência de aplicação de microrganismos) nos componentes de número de espigas NE, número de fileiras NF, número de grãos por fileira NGF, massa de 1000 grãos M1000 (kg), Produtividade por ha Prod. (t ha<sup>-1</sup>), safra 2021-22, Pinhais, Paraná.

| Sistema     | Manejo                | NE                | NFI    | NGF    | M1000  | PROD.                   |
|-------------|-----------------------|-------------------|--------|--------|--------|-------------------------|
|             |                       | -----un.-----     |        |        | --kg-- | --t ha <sup>-1</sup> -- |
| L           | <i>T. asperellum</i>  | 1,1 <sup>ns</sup> | 15,0Ba | 24,0Bc | 0,34Bd | 8,8Bc                   |
| L           | <i>A. brasillense</i> | 1,1 <sup>ns</sup> | 14,0Bb | 25,2Bb | 0,35Bc | 8,9Bb                   |
| L           | Coinoculado           | 1,1 <sup>ns</sup> | 14,2Bb | 26,8Ba | 0,35Ba | 9,6Ba                   |
| L           | Controle              | 1,1 <sup>ns</sup> | 12,8Bc | 26,2Bc | 0,33Bb | 8,0Bd                   |
| LP          | <i>T. asperellum</i>  | 1,1 <sup>ns</sup> | 16,3Aa | 29,3Ac | 0,35Ad | 12,1Ac                  |
| LP          | <i>A. brasillense</i> | 1,2 <sup>ns</sup> | 14,2Ab | 30,3Ab | 0,36Ac | 12,2Ab                  |
| LP          | Coinoculado           | 1,1 <sup>ns</sup> | 15,2Ab | 29,9Aa | 0,39Aa | 12,8Aa                  |
| LP          | Controle              | 1,1 <sup>ns</sup> | 14,9Ac | 27,0Ac | 0,38Ab | 11,0Ad                  |
| $\mu$ geral |                       | 1,11              | 14,58  | 27,34  | 0,36   | 10,44                   |
| $\sigma$    |                       | 0,04              | 1,03   | 2,29   | 0,02   | 1,84                    |
| CV %        |                       | 3,18              | 7,06   | 8,36   | 5,6    | 17,58                   |

Nível de 5% de significância pelo teste de Tukey; ns: Não significativo ( $p > 0,05$ ); Letras maiúsculas referem-se ao fator Sistema e letras minúsculas referem-se ao fator Manejo.

Tabela 6. Médias geral ( $\mu$ ); desvio padrão ( $\sigma$ ); e coeficiente de variação (CV %) dos componentes de rendimento de grãos da cultura do milho sob os fatores: “Sistemas de Cultivo” (i. Lavoura – L; e ii. Lavoura-Pecuária – LP); e “Manejos Microbiológicos” (i. *Azospirillum brasilense*; ii. *Trichoderma asperellum*; iii. Coinoculação: *A. brasilense* + *T. asperellum*; iv. controle: ausência de aplicação de microrganismos) nos componentes de número de espigas NE, número de fileiras NF, número de grãos por fileira NGF, massa de 1000 grãos M1000 (kg), Produtividade por ha Prod. ( $t\ ha^{-1}$ ), safra 2022-23, Pinhais, Paraná

| Sistema | Manejo                | NE                | NFI    | NGF    | M1000  | Prod.                   |
|---------|-----------------------|-------------------|--------|--------|--------|-------------------------|
|         |                       | -----un.-----     |        |        | --kg-- | --t ha <sup>-1</sup> -- |
| L       | <i>T. asperellum</i>  | 1,1 <sup>ns</sup> | 15,4Ac | 27,3Bc | 0,30Bc | 9,1Ac                   |
| L       | <i>A. brasillense</i> | 1,2 <sup>ns</sup> | 15,1Ab | 26,1Bb | 0,30Bb | 9,3Ab                   |
| L       | Coinoculado           | 1,2 <sup>ns</sup> | 16,9Aa | 28,9Ba | 0,32Ba | 12,3Aa                  |
| L       | Controle              | 1,3 <sup>ns</sup> | 13,2Ac | 25,5Bd | 0,27Ad | 7,7Ac                   |
| LP      | <i>T. asperellum</i>  | 1,2 <sup>ns</sup> | 11,9Bc | 27,5Ac | 0,28Ac | 7,2Bc                   |
| LP      | <i>A. brasillense</i> | 1,1 <sup>ns</sup> | 12,8Bb | 29,8Ab | 0,31Ab | 8,5Bb                   |
| LP      | Coinoculado           | 1,2 <sup>ns</sup> | 14,2Ba | 32,1Aa | 0,35Aa | 12,6Aa                  |
| LP      | Controle              | 1,1 <sup>ns</sup> | 15,2Bc | 27,3Ad | 0,29Ad | 8,7Bc                   |
|         | $\mu$ geral           | 1,18              | 14,34  | 28,06  | 0,3    | 9,43                    |
|         | $\sigma$              | 0,07              | 1,63   | 2,14   | 0,02   | 1,99                    |
|         | CV %                  | 6,02              | 11,38  | 7,61   | 8,24   | 21,13                   |

Nível de 5% de significância pelo teste de Tukey; ns: Não significativo ( $p>0,05$ ); Letras maiúsculas referem-se ao fator Sistema e letras minúsculas referem-se ao fator Manejo.

Em relação ao componente NE, esse apresentou ( $p > 0,05$ ), indicando ausência de significância estatística. Nossos resultados assemelham-se aos achados de Klein, *et al.*, 2018 visto que também não observaram diferença significativa em diferentes plantas de milho híbrido. Adicionalmente o componente NFI apresentou maiores valores médios nos tratamentos i. LP + *T. asperellum* e em ii. L + coinoculação, com respectivos valores médios de 16,3 e 16,9, nas respectivas safras avaliadas. Em referência ao componente NGF os maiores valores no sistema de cultivo LP + coinoculação para as duas safras, com médias respectivas de 29,90 e 32,1.

Observou-se que a M1000 apresentou maiores valores médios no sistema de cultivo LP em associação com a coinoculação, com médias de 0,39 kg e 0,35 kg para a primeira e segunda safra, respectivamente. Adicionalmente, além das diferenças estatísticas significativas, o tratamento integrado LP + coinoculação apresentou incrementos expressivos de 18% e 29% em relação ao tratamento de monocultivo L + controle (sem utilização de microrganismos) nas respectivas safras avaliadas.

Da mesma forma, o componente Prod. apresentou maiores valores médios no sistema de cultivo LP associado à coinoculação, com médias de 12,8 e 12,6 t ha<sup>-1</sup> nas respectivas safras avaliadas. Entretanto, na segunda safra, o tratamento L + coinoculação obteve uma média de 12,3 t ha<sup>-1</sup>, com desempenho estatístico comparável ao tratamento LP + coinoculação nos fatores sistema e manejo. Além disso, o sistema integrado LP + coinoculação apresentou incrementos superiores de 60% e 63% em Prod. (t ha<sup>-1</sup>) em comparação ao tratamento de monocultivo L + controle nas respectivas safras avaliadas.

Com relação ao NFI, NGG, M1000 e Prod, destaca-se que são indicadores essenciais da qualidade dos grãos produzidos e do rendimento produtivo (Grespan *et al.*, 2023; Gonzaga *et al.*, 2023). Comparativamente Fernandes *et al.*, 2020; Fernandes *et al.*, 2021 também observaram maiores rendimentos em componentes de rendimento de grãos na cultura do arroz de terras altas quando submetido a diferentes MPCPs. Adicionalmente, estudo conduzido por Maughan *et al.*, (2009) também destaca que a integração LP é uma estratégia eficiente para melhorar a qualidade do solo e a produtividade do milho, corroborando com nosso estudo. Esse mesmo autor também destaca que a utilização de culturas de cobertura e pastagens perenes em

sistemas integrados resulta em maior matéria orgânica, melhor estrutura do solo e maior rendimento de grãos de milho.

### 3.4 Análise de Componentes Principais

Na figura 1 é apresentado os mapas de contribuição das variáveis para os componentes Dim-1 e Dim-2, em forma de gráfico de barras, Safra 2021 – (a), Safra 2022 – (b).

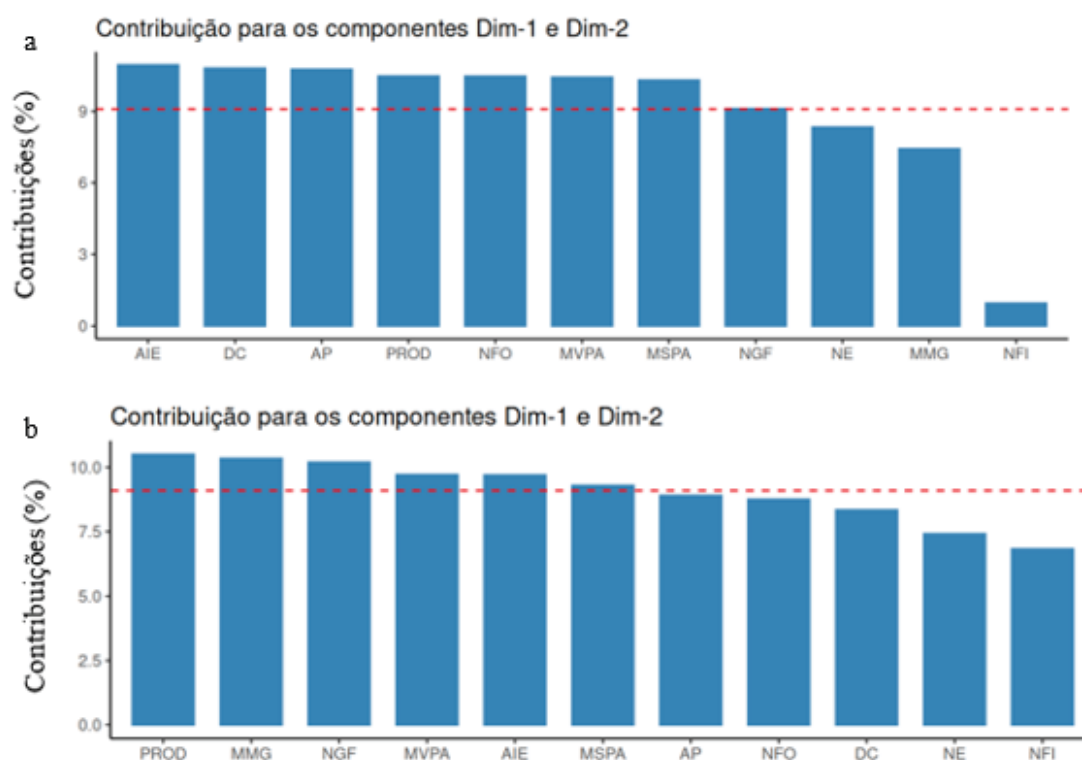
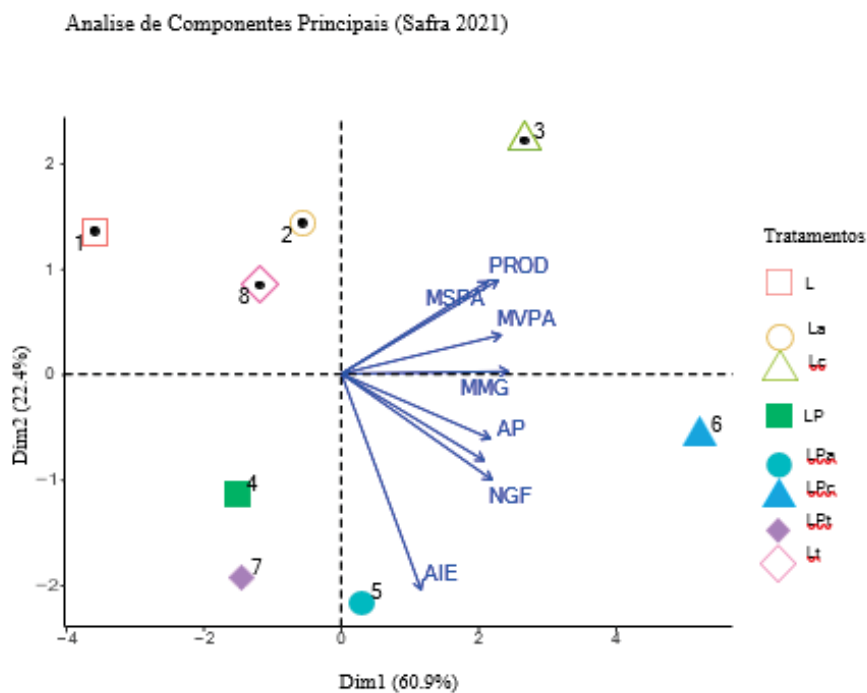


Figura 1. Análise de Componentes Principais e correlação entre os tratamentos e as variáveis independentes. Dimensão – Dim; dos componentes de rendimento de grãos da cultura do milho sob os fatores: “Sistemas de Cultivo” (i. Lavoura – L; e ii. Lavoura-Pecuária – LP); e “Manejos Microbiológicos” (i. *Azospirillum brasilense*; ii. *Trichoderma asperellum*; iii. Coinoculação: *A. brasilense* + *T. asperellum*; iv. controle: ausência de aplicação de microrganismos) para as variáveis resposta - altura de planta AP, diâmetro de colmo DC, altura de inserção da espiga AIE, número de folhas NFO, massa seca da parte aérea (MS.PA) número de espigas (NE), número de fileiras (NFI), número de grãos por fileira (NGF), massa de 1.000 grãos (MMG), Produtividade por ha (Prod.).

Conforme a Figura 1, observa-se uma correlação significativa entre as variáveis AIE, DC e AP na Figura 1 – item (a), e entre PROD, MMG e NGF na Figura 1 – item (b), com as maiores contribuições. Isso é compreensível, pois as variáveis AIE e DC são aspectos morfológicos inter-relacionados. Da mesma forma, a produtividade (PROD) está diretamente

ligada à massa de mil grãos (MMG) e ao número de grãos por fileira (NGF), uma vez que, para alcançar maiores produtividades, é necessário que esses parâmetros apresentem valores médios elevados.

É apresentado na figura 2. o gráfico referente a SAFRA 2021, apresenta a PCA e a correlação entre os tratamentos e as oito variáveis independentes que mais contribuíram para os componentes. O ângulo entre os vetores indica o grau de correlação, sendo que o ângulo de  $90^\circ$  representa ausência de correlação e maior que  $90^\circ$ , correlação negativa. No quadrante superior-direito são apresentados os tratamentos com melhor resultado (LPa e LPt). No quadrante inferior-esquerdo se encontram os tratamentos com resultado inferior (L, Lt, La). A variável Prod. apresenta melhor resultado nos tratamentos LPa e LPt. Há pouca correlação entre a variável Prod. com as variáveis morfológicas (AP, AIE).



Análise de Componentes Principais (Safrá 2022)

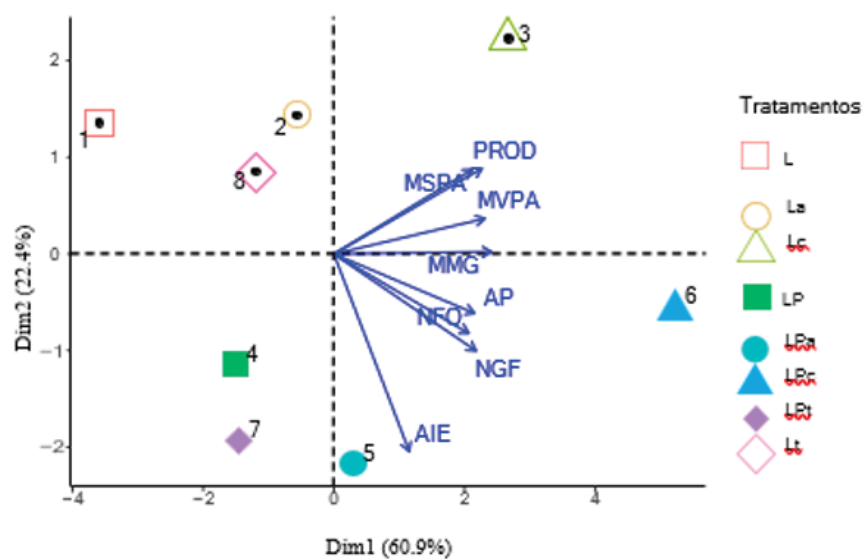


Figura 2. Análise de Componentes Principais apresentando a correlação entre os tratamentos e as variáveis independentes. Correlação de variáveis através do mapa de contribuição individual. Dimensão – Dim; L – Lavoura; La – Lav. + *Azospirillum brasilense*; Lc – Lav. + (Coinoculação com *Trichoderma asperellum* com *A. brasilense*). Lt – Lav. + *T. asperellum*; Lavoura Pecuária – LP; LPa – LP + *A. brasilense*; LPC – LP + coinoculação; LPt – LP + *T. asperellum*. Variáveis resposta - altura de planta AP (cm), diâmetro de colmo DC, altura de inserção da espiga AIE, número de folhas NFO, massa verde da parte aérea MVPA, massa seca da parte aérea MS.PA, número de espigas NE, número de fileiras NFI, número de grãos por fileira NGF, massa de 1.000 grãos M1000, Produtividade de grãos por ha Prod.

As variáveis morfológicas (AP, AIE, NFO, DC) apresentaram melhor resultado no tratamento LPc. As variáveis MSPA e MVPA apresentaram melhor resultado no tratamento Lc. Observação semelhante foi destacado por Rezende *et al.*, 2021, verificando diferentes microrganismos e seus efeitos no incremento de biomassa da parte aérea e das raízes, e nos níveis de N, P e K, com efeitos diretos nos componentes de rendimento e na produção de grãos das plantas de feijão comum. Com destaque para os microrganismos avaliados destaca-se *A. brasilense*, *T. koningiopsis*, dentre outros.

No que se referente a SAFRA 2022, apresenta a PCA e a correlação entre os tratamentos e as variáveis independentes que mais contribuíram para os componentes. No quadrante superior-direito são apresentados o tratamento com melhor resultado (Lc). No quadrante inferior-esquerdo se encontram os tratamentos com resultado inferior (LP e LPt). A variável Prod. apresenta melhor resultado nos tratamentos Lc e LPc. Há pouca ou nenhuma correlação entre a variável Prod. e as variáveis morfológica (AP, AIE).

Observa-se uma forte correlação entre a variável produção (Prod.) e as variáveis de rendimento (MSPA, MVPA, M1000). As variáveis morfológicas (AP, NFO) apresentaram melhor desempenho no tratamento LPc. Adicionalmente, a variável AIE apresentou melhor resultado no tratamento LPa. Resultado semelhante foi obtido por Fernandes *et al.*, (2020), que observou o efeito de microrganismos isolados ou em coinoculação aplicados em plantas de arroz e verificou os componentes morfofisiológicos e de rendimento de grãos. O uso da mistura de microrganismos multifuncionais foi mais eficaz em potencializar os efeitos benéficos do que os microrganismos aplicados isoladamente em plantas de arroz de terras altas. Os tratamentos 1301 + Ab-V5 e BRM 32114 + pool de *T. asperellum* foram os mais eficazes em proporcionar um melhor desenvolvimento das plantas de arroz, resultando em maior número de perfilhos, biomassa da parte aérea, biomassa das raízes e biomassa total, culminando em maior rendimento de grãos.

#### 4. CONCLUSÃO

Conclui-se que o sistema integrado LP + coinoculação foi o mais expressivo, apresentando incrementos significativos nos componentes NFO, M1000 e Prod. Em comparação ao tratamento monocultural L + controle, o tratamento LP + coinoculação resultou em aumentos de 66% e 77% em NFO nas safras avaliadas. A M1000 também apresentou

valores médios superiores, com incrementos de 18% e 29% em relação ao tratamento L + controle. No componente Prod., o sistema LP + coinoculação alcançou médias de 12,8 e 12,6 t ha<sup>-1</sup>, com incrementos de 60% e 63% em comparação ao monocultivo L + controle nas respectivas safras.

A análise de componentes principais (PCA) revelou correlações significativas entre as variáveis AIE, DC e AP na safra de 2021, e entre PROD, MMG e NGF na safra de 2022, com estas variáveis apresentando as maiores contribuições para os componentes Dim-1 e Dim-2. Isso reflete a inter-relação entre características morfológicas (AIE e DC) e a influência direta de MMG e NGF na produtividade (PROD). Os tratamentos LPa e LPt mostraram os melhores resultados em produtividade, enquanto os tratamentos L, Lt e La apresentaram desempenho inferior. A variável Prod. demonstrou pouca correlação com as variáveis morfológicas (AP, AIE), indicando que outros fatores podem estar influenciando a produtividade.

Nossa pesquisa sugere que a coinoculação em associação à sistemas integrados de produção “Lavoura- Pecuária” é uma estratégia eficiente para otimizar a produção de milho em no que diz respeito aos componentes morfológicos e de rendimento de grãos.

## AGRADECIMENTOS

À UFPR e ao NITA, pelo fornecimento da área experimental e pelo suporte nas pesquisas, e à CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

## REFERÊNCIAS

Almeida, Felipe Miranda de Souza. Decomposição da produtividade total dos fatores da produção de milho no Brasil, 1995/96 a 2017. 2023. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo.

Anghinoni, I.; Carvalho, P. C. F.; Costa, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e Pecuária no subtropical brasileiro, 2013.

Bakhshandeh, Esmail *et al.*, Efeitos de inóculos de microrganismos promotores do crescimento de plantas na nutrição mineral, crescimento e produtividade do arroz (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Nutrition*, v. 43, n. 11, p. 1643-1660, 2020.

Balbino, Luiz Carlos; Barcellos, Alexandre de Oliveira; Stone, Luís Fernando. MARCO REFERENCIAL: Crop-Livestock-Forestry Integration. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, 2011.

Bartmeyer, Tarcísio Nicolau *et al.*, Trigo de duplo propósito submetido ao pastejo de bovinos nos Campos Gerais do Paraná. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 46, p. 1247-1253, 2011.

Bernis-Fonteneau, Agnès *et al.*, O papel da diversidade intraespecífica de cultivos, gado e água cultivada na manutenção de serviços ecossistêmicos. Diversity, v. 16, n. 7, p. 420, 2024.

Carvalho, P. C. F. *et al.*, (2010). Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 88(2), 259-273. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9360-x>.

Carvalho, Paulo César de Faccio. Reconnectando a natureza com a produção agrícola: a via da intensificação sustentável. In: Carmona, Felipe de Campos *et al.*, Sistemas Integrados de Produção Agropecuária em Terras Baixas. Porto Alegre - RS: Editora RJR Ltda., 2018b. Cap. 1, p. 1-9. ISBN: 978-85-67302-72- 0.

Chouhan, D. K., Jaiswal, D. K., Gaurav, A. K., Mukherjee, A. & Verma, J. P. PGPM as a potential bioinoculant for enhancing crop productivity under sustainable agriculture. In: Rakshit, A., Meena, V. S. M. P., Singh, H.B. & Singh A.K. (Org.). Biofertilizers, Woodhead Publishing, 221-237, (2021).

Conab | Acompanhamento da safra brasileira de grãos | v.9 – Safra 2021/22, Nº10 – Décimo levantamento, 2022.

Da Cruz, Jozângelo Fernandes *et al.*, Desempenho agrônômico de variedades crioulas de milho na região do Vale do Juruá, AC. Contribuciones a las Ciencias Sociales, v. 17, n. 1, p. 6437-6451, 2024.

De Barros, Gustavo *et al.*, Inoculação e co-inoculação de bactérias do gênero bacillus, pseudomonas e azospirillum no cultivo de milho no noroeste paulista. Unifunec Científica Multidisciplinar, v. 12, n. 14, p. 1-13, 2023.

Dominchek, R., *et al.*, Crop rotations with temporary grassland shifts weed patterns and allows herbicide-free management without crop yield loss. Journal of Cleaner Production, v. 306. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127140>.

Erenstein, O. *et al.*, (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security*, 14, 1295–1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>.

Fernandes, João Pedro Tavares *et al.*, Caracterização fisio-agronômica do arroz de terras altas inoculado com mix de microrganismos multifuncionais. *Revista Caatinga*, v. 33, n. 3, p. 679-689, 2020a.

Fernandes, João Pedro Tavares *et al.*, Microrganismos promotores de crescimento de plantas-Trichoderma e Azospirillum: otimizando a cultura do milho em sistemas integrados de produção agropecuária. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 17, n. 2, p. e5090-e5090, 2024.

Fernandes, João Pedro Tavares *et al.*, Microrganismos promotores de crescimento de plantas-Trichoderma e Azospirillum: otimizando a cultura do milho em sistemas integrados de produção agropecuária. *Contribuciones a las ciencias sociales*, v. 17, n. 2, p. e5090-e5090, 2024.

Fernandes, T. J. P. Physio-agronomic characterization of upland rice inoculated with mix of multifunctional microorganisms. *Revista Caatinga, Mossoró*, v. 33, p. 3, 2020b.

Ferreira, D. S. A. Inoculação do *Bacillus amyloliquefaciens* na promoção de crescimento e produtividade no milho. 2018. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, 2018.

Ferreira, Daniel Furtado (2020). SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *revista brasileira de biometria*. [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019. ISSN 1983-0823. doi: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.

Gomes, Luiz Savelli *et al.*, Resistência ao acamamento de plantas e ao quebramento do colmo em milho tropical. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, p. 140-145, 2010.

Gonzaga, Benedito Alves; de Andrade, Christiano Lima Lobo; Cabral Filho, Fernando Rodrigues. Tratamento de sementes de milho com bioestimulante. *Brazilian Journal of Science*, v. 2, n. 3, p. 46-53, 2023.

Grespan, Daniel Silva *et al.*, Correlações e Análise de Trilha em Caracteres Agronômicos de Híbridos de Milho Segunda Safra Cultivados em Balsas-MA. *Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde*, v. 27, n. 1, p. 49-54, 2023.

Hesham, A. E. L., Kaur, T., Devi, R., Kour, D., Prasad, S., Yadav, N., Singh, C., Singh, J. & Yadav, A. J. (2021). Current trends in microbial biotechnology for agricultural sustainability: Conclusion and future challenges. *Environmental and Microbial Biotechnology*. Elsevier, 555–572.

Khosru, B., Mitra, D., Khoshmanzar, E., Myo, E. M., Uniyal, N., Mahakur, B., *et al.*, (2020). Current scenario and future prospects of plant growth-promoting rhizobacteria: An economic valuable resource for the agriculture revival under stressful conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 43, 3062–3092.

Klein, John Lenon *et al.*, Desempenho produtivo de híbridos de milho para a produção de silagem da planta inteira. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 17, n. 1, p. 101-110, 2018.

Köppen, W.; Geiger, R. 1928. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlagcondicionadas. Justus Perthes. n.p.

Lopes, M. J. S, Dias-Filho, M. B., Castro, T. H. R., Gurgel, E. S. & Silva, G. B. (2021b). Efficiency of biostimulants for alleviating shade effects on forage grass. *Journal of Agricultural Studies*, 9, 14-30.

Lopes, M. J. S., Dias-Filho, M. B. & Gurgel, E. S. C. (2021a). Successful plant growth-promoting microbes: Inoculation methods and abiotic factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5 (606454), 1-13.

Machado, R., Calvi, V., Paccola, E., Schmdit Filho, E., & Gasparotto, F. (2020). Inoculação foliar de plantas de milho com *Bacillus subtilis* e *Azospirillum brasilense*. *Enciclopédia Biosfera*, 17(34), 289-298.

Martins, Lucas Oliveira; Archangelo, Eliane Regina. Crescimento e desenvolvimento da mandioca e do milho em cultivo solteiro e consorciado. *Agri-environmental sciences*, v. 9, n. 2, p. 13-13, 2023.

Maughan, Matthew W. *et al.*, Qualidade do solo e rendimento de milho sob integração lavoura-pecuária em Illinois. *Agronomy journal* , v. 101, n. 6, p. 1503-1510, 2009.

Moraes, A. de., Carvalho, P. C. de F., Lustosa, S. B. C., Lang, C. R., & Deiss, L.(2014). Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, 45(5spe), 1024–1031. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500018>.

Moraes, A.; Carvalho, P.C.F.; Anghinoni, I.; Lustosa, S.C.; Costa, S.E.V.G.A. & Kunrath, T.R. Crop-livestock integration in Brazilian subtropics II. In: International symposium on integrated crop-livestock systems. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. CD ROM.

Moraes, Anibal *et al.*, Sistemas Integrados de produção Agropecuária: Conceitos básicos e histórico no Brasil. In: Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil. 1. ed. Tubarão - SC: Copiart, p. 13-28. 2018. ISBN 9788583881117.

Msimbira, L. A., & Smith, D. L. (2020). The roles of Plant Growth Promoting Microbes in enhancing plant tolerance to acidity and alkalinity stresses. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 1–14.

Norman G, Streiner D, editores. *Biostatistics: the bare essentials*. 3. ed. Hamilton: B.C. Decker; 2014.

Oliveira, D. T. M. *et al.*, Avaliação biométrica do uso de diferentes fontes de nitrogênio no milho safrinha. *Brazilian Journal of Science*, v. 2, n. 1, p. 63-71, 2023.

OLIVEIRA, Juliete de Sousa *et al.*, Microrganismos associados à adubação na promoção de crescimento em plantas de milho crioulo (*Zea mays* L.). 2024. Tese de Doutorado.

Posada, A., Mejía, D., Polanco-Echeverry, D. & Cardona, J. (2021). Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): Una revisión sistemática 1990- 2019. *Revista de Investigación Agraria y ambiental*, 12 (2), 161 – 178.

Posada, A., Mejía, D., Polanco-Echeverry, D. & Cardona, J. (2021). Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): Una revisión sistemática 1990-2019. *Revista de Investigación Agraria y ambiental*, 12 (2), 161–178.

Repke, R. A. *et al.*, Altura de planta, altura de inserção de espiga e número de plantas acamadas de cinco híbridos de milho. In: XXIX Congresso Nacional de Milho e Sorgo. 2012. p. 1940-1943.

Rezende, C. C. Silva, M. A., Frasca, L. L. M., Faria, D. R., Filippi, M. C. C., Lanna, A. C. & Nascente, A. S. (2021). Microrganismos multifuncionais: Utilização na agricultura. *Research, Society and Development*, 10, 2, e50810212725.

Rezende, C. C., Frasca, L. L. de M., Silva, M. A., Pires, R. A. C., Lanna, A. C., Filippi, M. C. C. de, & Nascente, A. S. (2021). Características fisiológicas e agrônômicas do feijão comum influenciados por microrganismos multifuncionais. *Semina: Ciências Agrárias*, 42(2), 599–618. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n2p599>

Rodrigues, A. B. *et al.*, Caracterização morfológica e desempenho produtivo do milho (*Zea mays* L.) inoculado com bactérias promotoras de crescimento vegetal. 2023.

Rodrigues, V. N. *et al.*, Comparação entre métodos para estimar a produtividade de grãos de milho. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 29, n. 1, p. 35, 2005.

Romero Flores, L. L., López Nevárez, V., Peinado Guevara, V. M., Chinchillas Chinchillas, M. de J., Perea Dominguez, X. P., & Arciniega Galaviz, M. A. (2023). Possibilities for Sustainable Development in Corn Intensification Scenarios. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 10, 106–130. <https://doi.org/10.47577/technium.v10i.9095>.

Sales, L. Z. S., Garcia, N. F. S., Martins, J. T., Buzo, F. S., Garé, L. M., Rodrigues, R. A. F. & Arf, O. (2021). Inoculation with *Azospirillum brasilense* and fertilizer reduction in upland rice. *Research, Society and Development*, 10 (7), e9110716345.

Silva, A.F.; Schoninger, E.L.; Caione, G.; Kuffel, C.; Carvalho, M.A.C. Produtividade de Híbridos de Milho em Função do Espaçamento e da População de Plantas em Sistema de Plantio Convencional. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 13, n. 2, p. 162-173. DOI: <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v13n2p162-173>.

Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia Vegetal*, 5ª Edição. Artmed, Porto Alegre, p. 954, 2013.

Torman VBL, Coster R, Riboldi J. Normality of variables: diagnosis methods and comparison of some nonparametric tests by simulation. *Rev HCPA*. 32:227-34. 2012.

Umesha, S., Singh, K. P., & Singh, R. P. (2018). Microbial Biotechnology and Sustainable Agriculture. *Biotechnology for Sustainable Agriculture*, 185–205.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que a utilização de Microrganismos Promotores de Crescimento das Plantas (MPCPs) é uma técnica comprovada que oferece benefícios significativos para o aumento da produtividade e a sustentabilidade na agricultura. A coinoculação de *Trichoderma* e *Azospirillum* na cultura do milho mostra-se uma estratégia promissora, com potencial para aumentar o rendimento dos grãos, melhorar sua qualidade e reduzir a dependência de fertilizantes químicos. Em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), a aplicação de MPCPs também se revela vantajosa além de diminuir os impactos ambientais negativos. No entanto, apesar dos resultados promissores, ainda há lacunas no conhecimento científico e na disponibilidade de literatura específica sobre a coinoculação em milho e em ambientes SIPA, o que aponta para a necessidade de mais estudos nessa área.

A coinoculação de *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma asperellum* é eficaz na melhoria dos componentes morfológicos e no rendimento de grãos na cultura do milho, tanto em monocultivo quanto em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), com destaque para os sistemas Lavoura-Pecuária (LP) e Lavoura (L). O tratamento LP + coinoculação foi o mais expressivo, apresentando incrementos significativos em MSPA (17,14%), M1000 (43%) e Prod. (9,56%) superior ao tratamento L + controle. Por outro lado, sistemas que incluem o componente arbóreo *Eucalyptus benthamii*, como Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF), mostraram menores rendimentos, possivelmente devido à menor taxa fotossintética resultante do espaçamento inadequado. A análise de componentes principais revelou uma alta correlação entre as variáveis de produtividade e os tratamentos LP e L, confirmando a eficácia da coinoculação em sistemas integrados para otimizar a produção de milho.

O sistema integrado Lavoura-Pecuária (LP) combinado com a coinoculação foi o mais eficiente, apresentando aumentos significativos nos componentes NFO, M1000 e Prod. Em comparação ao tratamento monocultural L + controle, o tratamento LP + coinoculação resultou em incrementos de até 77% em NFO, 29% em M1000 e 63% em Prod. A análise de componentes principais (PCA) destacou correlações significativas entre as variáveis AIE, DC e AP na safra de 2021, e entre PROD, MMG e NGF na safra de 2022, evidenciando a influência dessas características na produtividade. Os tratamentos LP associados à coinoculação mostraram os melhores resultados, enquanto os tratamentos sem coinoculação tiveram

desempenho inferior. Assim, a coinoculação em sistemas integrados de produção se mostra uma estratégia eficaz para otimizar a produção de milho, tanto em aspectos morfológicos quanto em rendimento de grãos.

## 6 REFERÊNCIAS GERAIS

Abdel latef, A. A H., Alhmad, M. F. A., Kordrostami M., Abo–Baker A. A. & Zakir A. Inoculation with *Azospirillum lipoferum* or *Azotobacter chroococcum* Reinforces Maize Growth by Improving Physiological Activities Under Saline Conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39, 1293–1306. (2020).

Abdelaal, K; Alkahtani, M; Attia, K; Hafez, Y; Király, L; & Künstler, A. (2021). The Role of Plant Growth-Promoting Bacteria in Alleviating the Adverse Effects of Drought on Plants. *Biology (Basel)*, 10(6), 520.

Abdul M, N. A; Kumar, I. S; & Nadarajah, K. (2020). Elicitor and Receptor Molecules: Orchestrators of Plant Defense and Immunity. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(3), 963.

Abdul Rahman, N. S. N; Abdul H, N. W; & Nadarajah, K. (2021). Effects of Abiotic Stress on Soil Microbiome. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16), 9036.

Abreu, M; *et al.*, (2022). Low Indirect Land Use Change (ILUC) Energy Crops to Bioenergy and Biofuels—A Review. *Energies*, 15(12), 4348.

Alfiky, A; & Weisskopf, L. (2021). Deciphering *Trichoderma*–Plant–Pathogen Interactions for Better Development of Biocontrol Applications. *Journal of Fungi*, 7(1), 61.

Almeida, Felipe Miranda de Souza. Decomposição da produtividade total dos fatores da produção de milho no Brasil, 1995/96 a 2017. 2023. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo.

Al-tammar, F. K., & Khalifa, A. Y. Z. (2022). Plant growth promoting bacteria drive food security. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e267257, <https://doi.org/10.1590/1519-6984.267257>.

Anghinoni, I.; Carvalho, P. C. F.; Costa, S. E. V. G. A. Tópicos em Ciência do Solo. In: Araújo, A. P.; Avelar, B. J. R., (Eds.) Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. 8. ed. Viçosa: UFV, 2013. cap. 8, p. 221-278.

Arora, N. K; Tewari, S; & SINGH, R. (2013). Multifaceted plant-associated microbes and their mechanisms diminish the concept of direct and indirect PGPRs. In Plant microbe symbiosis: Fundamentals and advances (pp. 411-449). New Delhi: Springer India.

Aslam, M. M. *ET AL.*, (2019). Piriformospora indica colonization reprograms plants to improved P-uptake, enhanced crop performance, and biotic/abiotic stress tolerance. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 106, 232-237.

Athul, P. P; Patra, R. K; Sethi, D; Panda, N; Mukhi, S.K, Padhan, K; Sahoo, S. K; Sahoo, T. R; Mangaraj, S; Pradhan, S. R; & Pattanayak, S. K. (2022). Efficient native strains of rhizobia improved nodulation and productivity of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under rainfed condition. *Front Plant Sci.* 13, 1048696.

Bakhshandeh, Esmail *et al.*, Efeitos de inóculos de microrganismos promotores do crescimento de plantas na nutrição mineral, crescimento e produtividade do arroz (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Nutrition*, v. 43, n. 11, p. 1643-1660, 2020.

Balbino, Luiz Carlos; Barcellos, Alexandre de Oliveira; Stone, Luís Fernando. MARCO REFERENCIAL: Crop-Livestock-Forestry Integration. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, 2011.

Baldani, J. I. *ET AL.*, (1986). Characterization of *Herbaspirillum seropedicae* gen. nov. sp. nov. a Root-Associated Nitrogen-Fixing Bacterium. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 36(1), 86-93.

Barbosa, J. Z. *et al.*, (2022). Improving yield and health of legume crops via co-inoculation with rhizobia and *Trichoderma*: A global meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 176. 104493.

Bartmeyer, Tarcísio Nicolau *et al.*, Trigo de duplo propósito submetido ao pastejo de bovinos nos Campos Gerais do Paraná. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, p. 1247-1253, 2011.

Basso, R. F. (2023). Adoção de sistemas integrados de produção agropecuária como estratégia para intensificação sustentável.

Basu, A. *et al.*, (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Green Bioinoculants: Recent Developments, Constraints, and Prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>.

Bernis-Fonteneau, Agnès *et al.*, O papel da diversidade intraespecífica de cultivos, gado e água cultivada na manutenção de serviços ecossistêmicos. *Diversity*, v. 16, n. 7, p. 420, 2024.

Blake, C; Christensen, M. N; & Kovács, Á. T. (2021). Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(1), 15-25, <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-20-0225-CR>.

Blake, C; Christensen, M. N; & Kovács, Á. T. (2021). Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(1), 15-25, <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-20-0225-CR>.

Bonini, Carolina dos Santos Batista *et al.*, Produção de forragem e atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 51, p. 1695-1698, 2016.

Buso P. H de M, *et al.*, (2021). Plant growth analysis describing the soybean plants response on dryland field to seed co-inoculation. *Cienc Rural*. 51(9) e20190642. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190642>.

Carvalho, P. C. F. *et al.*, (2010). Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88(2), 259-273, <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9360-x>.

Carvalho, Paulo César de Faccio *et al.*, Definições e terminologias para sistema integrado de produção agropecuária. *Revista Ciência Agronômica*, v. 45, p. 1040-1046, 2014.

Carvalho, Paulo César de Faccio. Reconnectando a natureza com a produção agrícola: a via da intensificação sustentável. In: Carmona, Felipe de Campos *et al.*, *Sistemas Integrados de Produção Agropecuária em Terras Baixas*. Porto Alegre - RS: Editora RJR Ltda., 2018. Cap. 1, p. 1-9. ISBN: 978-85-67302-72- 0.

Chenthamara, K. *et al.*, (2021). Ecological Genomics and Evolution of *Trichoderma reesei*. In: MACH-AIGNER, A. R.; MARTZY, R. (Eds.). *Trichoderma reesei. Methods in Molecular Biology*, 2234, 3-20. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1048-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1048-0_1).

Chouhan, D. K., Jaiswal, D. K., Gaurav, A. K., Mukherjee, A. & Verma, J. P. PGPM as a potential bioinoculant for enhancing crop productivity under sustainable agriculture. In: Rakshit, A., Meena, V. S. M. P., Singh, H.B. & Singh A.K. (Org.). *Biofertilizers*, Woodhead Publishing, 221-237, (2021).

Cochard B; Giroud B; Crovadore J; Chablais R; Arminjon L; & Lefort F. (2022). Endophytic PGPR from tomato roots: isolation, in vitro characterization and in vivo evaluation of treated tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *Microorganisms*, 10(4), 765. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040765>.

Coêlho, Jackson Dantas. MILHO. Caderno Setorial ETENE, Fortaleza, v. 9, 2024. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/etene/article/view/2700>. Acesso em: 10 jul. 2024.

Conab | Acompanhamento da safra brasileira de grãos | v.9 – Safra 2021/22, Nº10 – Décimo levantamento, 2022.

Cruz, Dennis RC *et al.*, Use of multifunctional microorganisms in corn crop. *Revista Caatinga*, v. 36, n. 2, p. 349-361, 2023.

Da Anunciação, A. A. *et al.*, Agronomical performance of wheat crops (*Triticum* spp) subjected to Bacillus treatments in field environmental conditions: Desempenho agronomico da cultura do trigo (*Triticum* spp) submetido a tratamentos com Bacillus em condições ambientais de campo. *Concilium*, v. 24, n. 4, p. 326-335, 2024.

Da Cruz, Jozângelo Fernandes *et al.*, Desempenho agrônômico de variedades crioulas de milho na região do Vale do Juruá, AC. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 17, n. 1, p. 6437-6451, 2024.

Da Silva, J. H. B., da Silva, A. V., da Silva, C. M., Gomes, T. R. V. R., dos Santos Araújo, V. F., Nóbrega, J. S., ... & da Silva Leal, M. P. (2023). Uso de bioestimulantes na cultura do milho (*Zea mays* L.): uma revisão. *Scientific Electronic Archives*, 16(5).

Danish S; Zafar-ul-Hye M; Mohsin F; Hussain M. (2020). ACC-deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize growth. 15(4), e0230615, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230615>.

De Barros, Gustavo *et al.*, Inoculação e co-inoculação de bactérias do gênero bacillus, pseudomonas e azospirillum no cultivo de milho no noroeste paulista. Unifunec Científica Multidisciplinar, v. 12, n. 14, p. 1-13, 2023.

De Queiroz Barbosa, Daniel *et al.*, Composição de plantas invasoras em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária. Agropecuária Catarinense , v. 34, n. 3, pág. 33-36, 2021.

De Souza, Willian Cleisson Lopes *et al.*, Aspectos comparativos entre milho (*Zea mays* L.) e sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench): diferenças e semelhanças. Diversitas Journal, v. 5, n. 4, p. 2337-2357, 2020.

Degani, O., & Dor, S. (2021). Trichoderma Biological Control to Protect Sensitive Maize Hybrids against Late Wilt Disease in the Field. Journal of Fungi, 7(4), 315, <https://doi.org/10.3390/jof7040315>.

Díaz-Urbano M; Goicoechea N; Velasco P; & Poveda J. (2023). Development of agricultural bio-inoculants based on mycorrhizal fungi and endophytic filamentous fungi: Co-inoculants for improve plant-physiological responses in sustainable agriculture. *Biological Control*, 182, 105223, <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105223>.

Dobo, B. (2022). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and rhizobium inoculation on growth and yield of Glycine max L. Varieties. *International Journal of Agronomy*. <https://doi.org/10.1155/2022/9520091>.

Dominchek, R., *et al.*, Crop rotations with temporary grassland shifts weed patterns and allows herbicide-free management without crop yield loss. Journal of Cleaner Production, v. 306. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127140>.

Dos Anjos, Mariana Moreira *et al.*, Sistemas integrados de produção agropecuária e os efeitos do componente animal. Research, Society and Development, v. 10, n. 16, p. e498101624014-e498101624014, 2021.

Dowarah, B.; Gill, S. S; & Agarwala, N. (2022). Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Conferring Tolerance to Biotic Stresses in Plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 1429-1444, <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10392-5>.

Elejalde, Denise Adelaide Gomes *et al.*, Viabilidade econômica em sistema integrado de produção agropecuária. 2023.

El-Saadony, M. T. *et al.*, (2022). Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: Mechanisms, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 13, 923880, <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923880>.

Enespa, Prakash, J; & Chandra, P. (2020). Halophilic Microbes from Plant Growing Under the Hypersaline Habitats and Their Application for Plant Growth and Mitigation of Salt Stress. *Sustainable Development and Biodiversity*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38453-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38453-1_11).

Erenstein, O. *et al.*, (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Sec.* 14, 1295–1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>.

Etesami, H.; Jeong, B. R; & Glick, B. R. (2021). Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Phosphate-Solubilizing Bacteria, and Silicon to P Uptake by Plant. *Frontiers in Plant Science*, 12, 699618, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699618>.

Fernandes, A. C. V; Lisboa, P. H. G; de Andrade, P. H. M; Vigna, B. B. Z; Nogueira, S. R; Fávero, A. P; & Lacava, P. T. (2023). Bactérias endofíticas associadas a *Paspalum vaginatum* Swartz com potencial para promoção de crescimento vegetal e biocontrole: Endophytic bacteria associated with *Paspalum vaginatum* Swartz with potential for plant growth promotion and biocontrol. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(2), 1071–1089. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n2-010>.

Fernandes, A. C. V; Lisboa, P. H. G; de Andrade, P. H. M; Vigna, B. B. Z; Nogueira, S. R; Fávero, A. P; & Lacava, P. T. (2023). Bactérias endofíticas associadas a *Paspalum vaginatum* Swartz com potencial para promoção de crescimento vegetal e biocontrole: Endophytic bacteria associated with *Paspalum vaginatum* Swartz with potential for plant growth promotion and biocontrol. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(2), 1071–1089. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n2-010>.

Fernandes, João PT *et al.*, Efeito de microrganismos na performance do arroz de terras altas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, p. 156-162, 2021.

Fernandes, João Pedro Tavares *et al.*, Caracterização físi-agronômica do arroz de terras altas inoculado com mix de microrganismos multifuncionais. *Revista Caatinga*, v. 33, n. 3, p. 679-689, 2020.

Fernandes, João Pedro Tavares *et al.*, Microrganismos promotores de crescimento de plantas-Trichoderma e Azospirillum: otimizando a cultura do milho em sistemas integrados de produção agropecuária. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 17, n. 2, p. e5090-e5090, 2024.

Fernandes, T. J. P. Physio-agronomic characterization of upland rice inoculated with mix of multifunctional microorganisms. *Revista Caatinga, Mossoró*, v. 33, p. 3, 2020b.

Ferreira, D. S. A. Inoculação do *Bacillus amyloliquefaciens* na promoção de crescimento e produtividade no milho. 2018. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, 2018.

Ferreira, Daniel Furtado (2020). SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *revista brasileira de biometria*. [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019. ISSN 1983-0823. doi: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.

Ferreira, F. V; & Musumeci, M. A. (2021). *Trichoderma* as biological control agent: scope and prospects to improve efficacy. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(4), 90, <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03058-7>.

Gade, R. M; & Koche, M. D. (2022). Enhancing the growth and disease suppression ability of *Pseudomonas fluorescens*. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 351-368). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85577-8.00012-3>.

Galindo, F. S; Rodrigues W. L; Fernandes G. C; Boleta E. H. M; Jalal A; Rosa P. A. L; Buzetti S; Lavres J; & Filho M. C. M. T. (2022). Enhancing agronomic efficiency and maize grain yield with *Azospirillum brasilense* inoculation under Brazilian savannah conditions. *European Journal of Agronomy*, 134, 126471, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126471>.

Garland G; Edlinger A; Banerjee S; Degruene F; García-Palacios P; Pescador D. S; Herzog C; Romdhane S; Saghai A; Spor A; Wagg C; Hallin S; Maestre F. T; Philippot L; Rillig M. C. & Heijden M. G. A. V. D (2021). Crop cover is more important than rotational diversity for soil

multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nat Food*, 2, 28–37, <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00210-8>.

Gavilanes F. Z; Andrade D. S; Zucareli C; Horácio E. H; Yunes J. S; Barbosa A. P; Alves L. A. R; Cruzatty L. G; Maddela N. R; & Guimarães M. de F. (2020). Co-inoculation of *Anabaena cylindrica* with *Azospirillum brasilense* increases grain yield of maize hybrids. *Rhizosphere*, 15, 100224, <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100224>.

Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.

Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.

Gomes, Luiz Savelli *et al.*, Resistência ao acamamento de plantas e ao quebraamento do colmo em milho tropical. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, p. 140-145, 2010.

Gonzaga, Benedito Alves; de Andrade, Christiano Lima Lobo; Cabral Filho, Fernando Rodrigues. Tratamento de sementes de milho com bioestimulante. *Brazilian Journal of Science*, v. 2, n. 3, p. 46-53, 2023.

Grabka, R; D'Entremont, T.W; Adams, S.J; Walker, A.K; Tanney, J.B; Abbasi, P.A; & Ali, S. (2022). Fungal endophytes and their role in agricultural plant protection against pests and pathogens. *Plants*, 11(3), 384, <https://doi.org/10.3390/plants11030384>.

Grespan, Daniel Silva *et al.*, Correlações e Análise de Trilha em Caracteres Agronômicos de Híbridos de Milho Segunda Safra Cultivados em Balsas-MA. *Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde*, v. 27, n. 1, p. 49-54, 2023.

Guimarães, Daniel Pereira. 2024 Artigo: Impactos do clima na atual safra de milho. Disponível em: [www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/90138806/artigo-impactos-do-clima-na-atual-safra-de-milho](http://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/90138806/artigo-impactos-do-clima-na-atual-safra-de-milho).

Guo R; Ji S; Wang Z; Zhang H; Wang Y; & Liu Z. (2021). *Trichoderma asperellum* xylanases promote growth and induce resistance in poplar. *Microbiological Research*, 248, 126767, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126767>.

Gupta G. D; Bansal R; Mistry H; Pandey B; & Mukherjee P. K; (2021). Structure-function analysis reveals *Trichoderma virens* Tsp1 to be a novel fungal effector protein modulating plant defence. *International Journal of Biological Macromolecules*, 191, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.085>.

Harman G; Khadka R; Doni F; & Uphoff N. (2020). Benefits to Plant Health and Productivity From Enhancing Plant Microbial Symbionts. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.610065>.

Hartmann, M; & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 4-18, <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>.

Hesham, A. E. L., Kaur, T., Devi, R., Kour, D., Prasad, S., Yadav, N., Singh, C., Singh, J. & Yadav, A. J. (2021). Current trends in microbial biotechnology for agricultural sustainability: Conclusion and future challenges. *Environmental and Microbial Biotechnology*. Elsevier, 555–572.

Junior, V. C. do N; Prete, C. E. C; Hungria M; & Nogueira M. A. (2023). Fixação biológica de nitrogênio em soja com diferentes níveis de tolerância à seca. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 18(3), e3268-e3268. <https://doi.org/10.5039/agraria.v18i3a3268>.

Khammas, K. M; Ageron, E; Grimont, P. A. D; & Kaiser, P. (1989). *Azospirillum irakense* sp. nov; a nitrogen-fixing bacterium associated with rice roots and rhizosphere soil. *Research in Microbiology*, 140(9), 679-693. [https://doi.org/10.1016/0923-2508\(89\)90199-X](https://doi.org/10.1016/0923-2508(89)90199-X).

Kholssi, R; Marks Evan A.N; Miñón J; Maté, A. P; Sacristán, G; Montero O; Debdoubi A; & Rad C. (2021). A consortium of cyanobacteria and plant growth promoting rhizobacteria for wheat growth improvement in a hydroponic system. *South African Journal of Botany*, 142, 247-258, <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.06.035>.

Khosru, B., Mitra, D., Khoshmanzar, E., Myo, E. M., Uniyal, N., Mahakur, B., *et al.*, (2020). Current scenario and future prospects of plant growth-promoting rhizobacteria: An economic valuable resource for the agriculture revival under stressful conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 43, 3062–3092.

Klein, John Lenon *et al.*, Desempenho produtivo de híbridos de milho para a produção de silagem da planta inteira. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 17, n. 1, p. 101-110, 2018.

Klepa, M. S; Helene L. C. F; O'Hara G., & Hungria M. (2021). *Bradyrhizobium agreste* sp. nov; *Bradyrhizobium glycinis* sp. nov. and *Bradyrhizobium diversitatis* sp. nov; isolated from a biodiversity hotspot of the genus *Glycine* in Western Australia. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 71, 3 <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004742>.

Köppen, W.; Geiger, R. 1928. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlagcondicionadas. Justus Perthes. n.p.

Kour D; Rana K. L; Yadav A. N; Yadav N; Kumar M; Kumar V; Vyas P; Dhaliwal H. S; & Saxena A. K; (2020). Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101487, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487>.

Koza, N; Adedayo, A; Babalola, O; & Kappo, A. (2022). Microorganisms in Plant Growth and Development: Roles in Abiotic Stress Tolerance and Secondary Metabolites Secretion. *Microorganisms*, 10(8), 1528. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081528>.

Kumawat, K. C; Razdan, N; & Saharan, K. (2022). Rhizospheric microbiome: Bio-based emerging strategies for sustainable agriculture development and future perspectives. *Microbiological Research*, 254, 126901, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126901>.

Lemaire G., Franzluebbers A., Carvalho P. C. de F., & Dedieu B. (2014). Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 4-8, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>.

Li Y; Li Q; Guan G; & Chen S. (2020). Phosphate solubilizing bacteria stimulate wheat rhizosphere and endosphere biological nitrogen fixation by improving phosphorus content. *PeerJ*, 8, e9062, <https://doi.org/10.7717/peerj.9062>.

Lima, A. F. S. *et al.*, (2022). Eficiência fisiológica e desempenho do amendoim sob estresse salino e inoculado com *Bradyrhizobium*. *Water Resources and Irrigation Management-WRIM*, 11(1-3), 22-35. <https://doi.org/10.19149/wrim.v11i1-3.2819>.

Lopes, M. J. S, Dias-Filho, M. B., Castro, T. H. R., Gurgel, E. S. & Silva, G. B. (2021b). Efficiency of biostimulants for alleviating shade effects on forage grass. *Journal of Agricultural Studies*, 9, 14-30.

Lopes, M. J. S., Dias-Filho, M. B. & Gurgel, E. S. C. (2021a). Successful plant growth-promoting microbes: Inoculation methods and abiotic factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5 (606454), 1-13.

Machado, R., Calvi, V., Paccola, E., Schmdit Filho, E., & Gasparotto, F. (2020). Inoculação foliar de plantas de milho com *Bacillus subtilis* e *Azospirillum brasilense*. *Enciclopédia Biosfera*, 17(34), 289-298.

Mahmud, K; Makaju, S; Ibrahim, R; & Missaoui, A. (2020). Current Progress in Nitrogen Fixing Plants and Microbiome Research. *Plants*, 9(1), 97. <https://doi.org/10.3390/plants9010097>.

Marra, Daniel Felipe *et al.*, Um estudo prospectivo da cadeia produtiva do milho no Brasil. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 40, p. 27368, 2024.

Martins, A.; Kunrath, T. R.; Anghinoni, I.; Carvalho, P. C. de F. (eds.). Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil. Porto Alegre: Ufrgs, 2015. (Boletim Técnico, 2. Edição) 102p.

Martins, Lucas Oliveira; Archangelo, Eliane Regina. Crescimento e desenvolvimento da mandioca e do milho em cultivo solteiro e consorciado. *Agri-environmental sciences*, v. 9, n. 2, p. 13-13, 2023.

Mastan A; Rane D; Dastager S. G; & Babu C. S. V; (2021). Molecular insights of fungal endophyte co-inoculation with *Trichoderma viride* for the augmentation of forskolin biosynthesis in *Coleus forskohlii*. *Phytochemistry*, 184, 112654, <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112654>.

Matar N., Macadré C., Ammar GAG., Peres A., Collet B., Boustany NE., Rajjou L., As-Sadi F., Dufresne M., & Ratet P. (2022). Identification of beneficial Lebanese *Trichoderma* spp. wheat endophytes. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1017890 <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1017890>.

Maughan, Matthew W. *et al.*, Qualidade do solo e rendimento de milho sob integração lavoura-pecuária em Illinois. *Agronomy journal*, v. 101, n. 6, p. 1503-1510, 2009.

Mazoyer, M.; Roudart, L. A história das agriculturas no mundo: Do Neolítico à crise contemporânea. São Paulo: UNESP, 2010. 568 p.

Mei C., Zhou D., Chretien R. L., Turner A., Hou G; Evans M. R., & Lowman S. (2023). A Potential Application of *Pseudomonas psychrotolerans* IALR632 for Lettuce Growth Promotion in Hydroponics. *Microorganisms*, 11(2), 376 <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020376>.

Mendonça, J; Lira Junior, M; Carvalho, E; Fracetto, G; Fracetto, F; Alves, M; & Oliveira, J. (2021). Diversidade, mecanismos de atuação e potencial agrícola de bactérias promotoras de crescimento de plantas, usando milho como cultura exemplo. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, 25(2). <https://doi.org/10.12661/pap.2020.010>.

Minakshi G; Shrey B; Abha S; Pushpendra S; Jyoti S; & Lata N. (2020). PGPR Mediated Alterations in Root Traits: Way Toward Sustainable Crop Production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.618230>.

Moraes, A. de, Carvalho, P. C. de F., Lustosa, S. B. C., Lang, C. R., & Deiss, L. (2014). Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, 45(5spe), 1024–1031. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500018>.

Moraes, A. de; Carvalho, P. C. de F; Lustosa, S. B. C; Lang, C. R; & Deiss, L. (2014). Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, 45(5spe), 1024–1031. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500018>.

Moraes, A.; Carvalho, P.C.F.; Anghinoni, I.; Lustosa, S.C.; Costa, S.E.V.G.A. & Kunrath, T.R. Crop-livestock integration in Brazilian subtropics II. In: International symposium on integrated crop-livestock systems. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. CD ROM.

Moraes, Anibal *et al.*, Sistemas Integrados de produção Agropecuária: Conceitos básicos e histórico no Brasil. In: *Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil*. 1. ed. Tubarão - SC: Copiart, p. 13-28. 2018. ISBN 9788583881117.

Moreira, F. M. S; & Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. (2<sup>o</sup> edição) Lavras: UFLA.

Mourouzidou, S., Ntinis, G. K., Tsaballa, A., & Monokrousos, N. (2023). Introducing the Power of Plant Growth Promoting Microorganisms in Soilless Systems: A Promising Alternative for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 15, 5959, <https://doi.org/10.3390/su15075959>.

Msimbira, L. A., & Smith, D. L. (2020). The roles of Plant Growth Promoting Microbes in enhancing plant tolerance to acidity and alkalinity stresses. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 1–14.

Mukherjee, P. K; Mendoza-Mendoza, A; Zeilinger, S; Horwitz, B. A. (2022). Mycoparasitism as a mechanism of Trichoderma-mediated suppression of plant diseases. *Fungal Biology Reviews*, 39, 15-33, <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.004>.

Mwenda, G. M; Hill, Y. J; O'Hara, G. W; Reeve, W. G; Howieson, J. G. & Terpolilli, J. J. (2023). Competição na simbiose *Phaseolus vulgaris* - Rhizobium e o papel dos rizóbios residentes no solo na determinação dos resultados da inoculação. *Plant Soil*, 487, 61–77, <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05903-0>.

Nascimento, V. C; Rodrigues-Santos, K. C; Carvalho-Alencar, K. L; Castro, M. B; Kruger, R. H; & Lopes, F. A. C.. (2022). *Trichoderma*: biological control efficiency and perspectives for the Brazilian Midwest states and Tocantins. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e260161. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.260161>.

Ngwenya, Z. D; Mohammed, M; Jaiswal, S. K; & Dakora, F. D. (2022). Phylogenetic relationships among Bradyrhizobium species nodulating groundnut (*Arachis hypogea* L.), jack bean (*Canavalia ensiformis* L.) and soybean (*Glycine max* Merr.) in Eswatini. *Scientific reports*, 12(1), 10629. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14455-9>.

Norman G, Streiner D, editores. *Biostatistics: the bare essentials*. 3. ed. Hamilton: B.C. Decker; 2014.

Okon, Y. (1985). Azospirillum as a potential inoculant for agriculture. *Trends in Biotechnology*, 3(9), 223-228, [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(85\)90012-5](https://doi.org/10.1016/0167-7799(85)90012-5).

Olanrewaju, O. S; Glick, B. R; & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(11), 197, <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>.

Oliveira, C. E. da S; Jalal, A; Oliveira, J. R; Tamburi, K. V; & Teixeira Filho, M. C. M. (2022). Leaf inoculation of *Azospirillum brasilense* and *Trichoderma harzianum* in hydroponic arugula improve productive components and plant nutrition and reduce leaf nitrate. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 52, e72755. <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272755>.

Oliveira, D. T. M. *et al.*, Avaliação biométrica do uso de diferentes fontes de nitrogênio no milho safrinha. *Brazilian Journal of Science*, v. 2, n. 1, p. 63-71, 2023.

OLIVEIRA, Juliete de Sousa *et al.*, Microrganismos associados à adubação na promoção de crescimento em plantas de milho crioulo (*Zea mays* L.). 2024. Tese de Doutorado.

Orozco-Mosqueda, M. D. C; Santoyo, G; & Glick, B. R. (2023). Recent Advances in the Bacterial Phytohormone Modulation of Plant Growth. *Plants Basel*, 12(3), 606. <https://doi.org/10.3390/plants12030606>.

Palamar, Natália Giehl. Da pesquisa ao campo: estudo de tecnologias baseadas no conceito de intensificação sustentável. 2023.

Pathania P., Rajta A., Singh P. C., & Bhatia R., (2020). Role of plant growth-promoting bacteria in sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 30, 101842 <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101842>.

Pereira, Caroline Nascimento; De Castro, César Nunes. Expansão da produção agrícola, novas tecnologias de produção, aumento de produtividade e o desnível tecnológico no meio rural. Texto para Discussão, 2022.

Posada, A., Mejía, D., Polanco-Echeverry, D. & Cardona, J. (2021). Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): Una revisión sistemática 1990- 2019. *Revista de Investigación Agraria y ambiental*, 12 (2), 161 – 178.

Puech, T; & Stark, F. (2023). Diversification of an integrated crop-livestock system: Agroecological and food production assessment at farm scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 344, 108300, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108300>

Rawat, P; Das, S; Shankhdhar, D; & Shankhdhar, S. (2021). Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 49-68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>.

Ray, P; Lakshmanan, V; Labbé, J. L; & Craven, K. D. (2020). Microbe to Microbiome: A Paradigm Shift in the Application of Microorganisms for Sustainable Agriculture. *Frontiers in microbiology*, 11, 622926. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.622926>.

Renoud, S; Abrouk, D; Prigent-Combaret, C; Wisniewski-Dyé, F; Legendre, L; Moënnelocoz, Y; & Muller, D. (2022). Effect of Inoculation Level on the Impact of the PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1 on Selected Microbial Functional Groups in the Rhizosphere of Field Maize. *Microorganisms*, 10(2), 325. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020325>.

Repke, R. A. *et al.*, Altura de planta, altura de inserção de espiga e número de plantas acamadas de cinco híbridos de milho. In: XXIX Congresso Nacional de Milho e Sorgo. 2012. p. 1940-1943.

Rezende, C. C. Silva, M. A., Frasca, L. L. M., Faria, D. R., Filippi, M. C. C., Lanna, A. C. & Nascente, A. S. (2021). Microrganismos multifuncionais: Utilização na agricultura. *Research, Society and Development*, 10, 2, e50810212725.

Rezende, C. C., Frasca, L. L. de M., Silva, M. A., Pires, R. A. C., Lanna, A. C., Filippi, M. C. C. de, & Nascente, A. S. (2021). Características fisiológicas e agronômicas do feijão comum influenciados por microrganismos multifuncionais. *Semina: Ciências Agrárias*, 42(2), 599–618. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n2p599>

Rezende, C. C; Silva, M. A; Frasca, L. L. de M; Faria, D. R., Filippi, M. C. C. de., Lanna, A. C., & Nascente, A. S. (2021). Multifunctional microorganisms: use in agriculture. *Research, Society and Development*, 10(2), e50810212725. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12725>.

Rodrigues, A. B. *et al.*, Caracterização morfológica e desempenho produtivo do milho (*Zea mays* L.) inoculado com bactérias promotoras de crescimento vegetal. 2023.

Rodrigues, V. N. *et al.*, Comparação entre métodos para estimar a produtividade de grãos de milho. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 29, n. 1, p. 35, 2005.

Romero Flores, L. L.; López Nevárez, V.; Peinado Guevara, V. M.; Chinchillas Chinchillas, M. de J.; Perea Dominguez, X. P.; & Arciniega Galaviz, M. A. (2023). Possibilities for Sustainable Development in Corn Intensification Scenarios. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 10, 106–130. <https://doi.org/10.47577/technium.v10i.9095>.

Ruthes B. E. S., Kaschuk G., Moraes A. de, Lang C. R., Crestani C. & Oliveira L. B. de. (2023). Soil Microbial Biomass, N Nutrition Index, and Yield of Maize Cultivated Under eucalyptus Shade in Integrated crop-livestock-forestry Systems. *Int. J. Plant Prod.* 17, 323–335, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42106-023-00242-7>.

Saeed, Q.; Xiukang, W.; Haider, F. U.; Kučerik, J.; Mumtaz, M. Z.; Holatko, J.; Naseem, M.; Kintl, A.; Ejaz, M.; Naveed, M.; Brtnicky, M.; & Mustafa, A. (2021). Rhizosphere Bacteria in Plant Growth Promotion, Biocontrol, and Bioremediation of Contaminated Sites: A Comprehensive Review of Effects and Mechanisms. *International journal of molecular sciences*, 22(19), 10529. <https://doi.org/10.3390/ijms221910529>.

Sales, L. Z. S., Garcia, N. F. S., Martins, J. T., Buzo, F. S., Garé, L. M., Rodrigues, R. A. F. & Arf, O. (2021). Inoculation with *Azospirillum brasilense* and fertilizer reduction in upland rice. *Research, Society and Development*, 10 (7), e9110716345.

Samuels Gary J. (1996). *Trichoderma*: a review of biology and systematics of the genus. *Mycological Research*, 100(8), 923-935. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(96\)80043-8](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(96)80043-8).

Samuels Gary J. (2006). *Trichoderma*: systematics, the sexual state, and ecology. *Phytopathology*, 96(2), 195-206. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0195>.

Sant'Anna F. H.; Almeida, L. G. P.; Cecagno, R.; Reolon, L. A.; Siqueira, F. M.; Machado, M. R. S.; Vasconcelos A. T. R.; & Schrank, I. S. (2011). Genomic insights into the versatility of the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum amazonense*. *BMC Genomics*, 12, 409, <https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-409>.

Santoyo, G.; Urtis-Flores, C. A.; Loeza-Lara, P. D.; Orozco-Mosqueda, Ma. del C.; & Glick, B. R. (2021). Rhizosphere Colonization Determinants by Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR). *Biology (Basel)*, 10(6), 475, [doi.org/10.3390/biology10060475](https://doi.org/10.3390/biology10060475).

Sarkar D; Singh S; Parihar M; & Rakshit A. (2021). Seed bio-priming with microbial inoculants: A tailored approach towards improved crop performance, nutritional security, and agricultural sustainability for smallholder farmers. *Current Research in Environmental Sustainability*, <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100093>.

Schuster, A; & Schmoll, M. (2010). Biology and biotechnology of *Trichoderma*. *Applied microbiology and biotechnology*, 87(3), 787–799. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2632-1>.

Schweiger, R; Padilla-Arizmendi, F; Nogueira-López, G; Rostás, M; Lawry, R; Brown, C; Hampton, J; Steyaert, J. M; Müller, C; & Mendoza-Mendoza, A. (2021). Insights into Metabolic Changes Caused by the *Trichoderma virens*–Maize Root Interaction. *IS-MPMI* 34(5), 524–537. <https://doi.org/10.1094/MPMI-04-20-0081-R>.

Sekaran, U; Lai, L; Ussiri, D; Kumar, S; & Clay, S. (2021). Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security -A review. *Journal of Agriculture and Food Research*. 5. 100190. [10.1016/j.jafr.2021.100190](https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100190).

Sgarioni, Thayná Santos. Sistema alimentar e sustentabilidade ambiental: uma revisão narrativa. 2021.

Sgarioni, Thayná Santos. Sistema alimentar e sustentabilidade ambiental: uma revisão narrativa. 2021.

Shahzad, S; Arif, M; Yasmeen, T; & Ali, B. (2020). Inoculation of potassium solubilizing bacteria with different potassium fertilization sources mediates maize growth and productivity. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 57(4), 1045-1055. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/20.9788>.

Sheoran, S; Kumar, S; Kumar, P; Meena, R. S. & Rakshit, S. (2021). Nitrogen fixation in maize: breeding opportunities. *Theor Appl Genet*, 134, 1263–1280, <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03791-5>.

Silva, A.F.; Schoninger, E.L.; Caione, G.; Kuffel, C.; Carvalho, M.A.C. Produtividade de Híbridos de Milho em Função do Espaçamento e da População de Plantas em Sistema de Plantio Convencional. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 13, n. 2, p. 162-173. DOI: <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v13n2p162-173>.

Silva, L. E. B. *et al.*, Desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays* L.): revisão de literatura. *Diversitas Journal*, v. 5, n. 3, p. 1636-1657, 2020.

Silva, Mariana Aguiar *et al.*, Screening of beneficial microorganisms to improve soybean growth and yield. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 63, p. e20190463, 2020.

Singh, P; Singh, R. K; Zhou, Y; Wang, J; Jiang, Y; Shen, N; Wang, Y; Yang, L. & Jiang, M. (2022). Unlocking the strength of plant growth promoting *Pseudomonas* in improving crop productivity in normal and challenging environments: a review, *Journal of Plant Interactions*, 17(1), 220-238, <https://doi.org/10.1080/17429145.2022.2029963>.

Sousa, W. dos S; Teixeira, I. R; Campos T. S; Silva G. Ca. da, Silva M. B. da & Moreira, S. G. (2022). Supplementary reinoculation in topdressing of *Rhizobium tropici* in common bean crop: effects on nodulation, morphology, and grain yield, *Journal of Plant Nutrition*, 45(20), 3094-3108, <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.2020833>.

Stockmans De N. F; Chiomento, J. C; Rosiani T; Nicolas T; Thomas, L; & Giuseppina, C. E. (2023). Alterações morfofisiológicas promovidas pela micorriza arbuscular em plantas hortícolas: uma revisão integrativa. <https://doi.org/10.37885/230212152>.

Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia Vegetal*, 5ª Edição. Artmed, Porto Alegre, p. 954, 2013.

Teixeira, Elaine Cristina *et al.*, Sistemas integrados de produção agropecuária com inclusão da leguminosa cratília. 2023.

Teixeira, I. R; Lopes, P. R; Sousa, W. S; & Teixeira, G. C. da S. (2022). Response of common bean to *Rhizobium* reinoculation in topdressing. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, 26(4), 274–282. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n4p274-282>.

Tiku, A. R. (2020). Antimicrobial Compounds (Phytoanticipins and Phytoalexins) and Their Role in Plant Defense. In: Mérillon, J.-M; Ramawat, K. (eds). *Co-Evolution of Secondary Metabolites*. Reference Series in Phytochemistry. Cham: Springer, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96397-6\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96397-6_63).

Timofeeva, A. M; Galyamova, M. R; & Sedykh, S. E. (2022). Bacterial Siderophores: Classification, Biosynthesis, Perspectives of Use in Agriculture. *Plants*, 11(22), 3065. <https://doi.org/10.3390/plants11223065>.

Torman VBL, Coster R, Riboldi J. Normality of variables: diagnosis methods and comparison of some nonparametric tests by simulation. *Rev HCPA*. 32:227-34. 2012.

Tosi, M; Ogilvie, C. M; Spagnoletti, F. N; Fournier, S; Martin, R. C; & Dunfield, K. E. (2023). Cover Crops Modulate the Response of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Water Supply: A Field Study in Corn. *Plants*, 12(5), 1015. <http://dx.doi.org/10.3390/plants12051015>.

Trivedi, P; Leach J. E; Tringe, S. G; Sa, T; & Singh B. K. (2020). Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 18, 607-621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>.

Tyśkiewicz, R; Nowak, A; Ozimek, E; & Jaroszuk-Ściśeł, J. (2022). *Trichoderma*: The Current Status of Its Application in Agriculture for the Biocontrol of Fungal Phytopathogens and Stimulation of Plant Growth. *International journal of molecular sciences*, 23(4), 2329. <https://doi.org/10.3390/ijms23042329>.

Umesha, S., Singh, K. P., & Singh, R. P. (2018). Microbial Biotechnology and Sustainable Agriculture. *Biotechnology for Sustainable Agriculture*, 185–205.

Valani, G. P; Martíni, A. F; da Silva, L. F. S; Bovi, R. C; & Cooper, M. (2021). Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. *Soil Use and Management*, 37(1), 22-36. <https://doi.org/10.1111/sum.12667>.

Vejan, P; Abdullah, R; Khadiran, T; Ismail, S; & Nasrulhaq Boyce, A. (2016). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agricultural Sustainability—A Review. *Molecules*, 21(5), 573. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules21050573>.

Ventura, M. V. A; de Menezes Filho, A. C. P; & Batista-Ventura, H. R. F. (2023). Chemical, physical, and biological attributes of the soil in integrated systems. *Brazilian Journal of Science*, 2(4), 90-98. <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i4.300>.

Vishwakarma, K., Kumar, N., Shandilya, C., Mohapatra, S., Bhayana, S., & Varma, A. (2020). Revisiting Plant-Microbe Interactions and Microbial Consortia Application for Enhancing Sustainable Agriculture: A Review. *Frontiers in Microbiology*, 11, 560406. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.560406>.

Wu, H; Wang, B; Hao, X; Zhang, Y; Wang, T; Lu, Z; ... & Cheng, C. (2022). *Piriformospora indica* promotes the growth and enhances the root rot disease resistance of gerbera. *Scientia Horticulturae*, 297, 110946, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110946>.

Yang, J; Lan, L; Jin, Y; Yu, N; Wang, D; & Wang, E. (2022). Mechanisms underlying legume–rhizobium symbioses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 64(2), 244-267. <https://doi.org/10.1111/jipb.13207>.

Yasuda, M., Dastogeer, K. M., Sarkodee-Addo, E., Tokiwa, C., Isawa, T., Shinozaki, S., & Okazaki, S. (2022). Impact of *Azospirillum* sp. B510 on the rhizosphere microbiome of rice under field conditions. *Agronomy*, 12(6), 1367.

Yasuda, M; Dastogeer, K. M; Sarkodee-Addo, E; Tokiwa, C; Isawa, T; Shinozaki, S; & Okazaki, S. (2022). Impact of *Azospirillum* sp. B510 on the rhizosphere microbiome of rice under field conditions. *Agronomy*, 12(6), 1367. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061367>.

Zhou, J; Chai, X; Zhang, L; George, T. S; Wang, F; & Feng, G. (2020). Different Arbuscular Mycorrhizal Fungi Cocolonizing on a Single Plant Root System Recruit Distinct Microbiomes. *mSystems*, 5(6), e00929-20. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00929-20>.

Zilli, J. É; Pacheco, R. S; Gianluppi, V; Smiderle, O. J; Urquiaga, S; & Hungria, M. (2021). Biological N<sub>2</sub> fixation and yield performance of soybean inoculated with *Bradyrhizobium*. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 119(3), 323-336. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10128-7>.

Zin, N. A; & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2), 168-178, <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2020.09.003>.

Zvinavashe, A. T; Mardad, I; Mhada, M; Kouisni, L; & Marelli, B. (2021). Engineering the plant microenvironment to facilitate plant-growth-promoting microbe association. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(45), 13270-13285. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00138>.

Abdel latef, A. A H., Alhmad, M. F. A., Kordrostami M., Abo–Baker A. A. & Zakir A. Inoculation with *Azospirillum lipoferum* or *Azotobacter chroococcum* Reinforces Maize Growth by Improving Physiological Activities Under Saline Conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39, 1293–1306. (2020).

Abdelaal, K; Alkahtani, M; Attia, K; Hafez, Y; Király, L; & Künstler, A. (2021). The Role of Plant Growth-Promoting Bacteria in Alleviating the Adverse Effects of Drought on Plants. *Biology (Basel)*, 10(6), 520.

Abdul M, N. A; Kumar, I. S; & Nadarajah, K. (2020). Elicitor and Receptor Molecules: Orchestrators of Plant Defense and Immunity. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(3), 963.

Abdul Rahman, N. S. N; Abdul H, N. W; & Nadarajah, K. (2021). Effects of Abiotic Stress on Soil Microbiome. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16), 9036.

Abreu, M; *et al.*, (2022). Low Indirect Land Use Change (ILUC) Energy Crops to Bioenergy and Biofuels—A Review. *Energies*, 15(12), 4348.

Alfiky, A; & Weisskopf, L. (2021). Deciphering *Trichoderma*–Plant–Pathogen Interactions for Better Development of Biocontrol Applications. *Journal of Fungi*, 7(1), 61.

Almeida, Felipe Miranda de Souza. Decomposição da produtividade total dos fatores da produção de milho no Brasil, 1995/96 a 2017. 2023. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo.

Al-tammar, F. K., & Khalifa, A. Y. Z. (2022). Plant growth promoting bacteria drive food security. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e267257, <https://doi.org/10.1590/1519-6984.267257>.

Anghinoni, I.; Carvalho, P. C. F.; Costa, S. E. V. G. A. Tópicos em Ciência do Solo. In: Araújo, A. P.; Avelar, B. J. R., (Eds.) *Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro*. 8. ed. Viçosa: UFV, 2013. cap. 8, p. 221-278.

Arora, N. K; Tewari, S; & SINGH, R. (2013). Multifaceted plant-associated microbes and their mechanisms diminish the concept of direct and indirect PGPRs. In *Plant microbe symbiosis: Fundamentals and advances* (pp. 411-449). New Delhi: Springer India.

Aslam, M. M. *ET AL.*, (2019). Piriformospora indica colonization reprograms plants to improved P-uptake, enhanced crop performance, and biotic/abiotic stress tolerance. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 106, 232-237.

Athul, P. P; Patra, R. K; Sethi, D; Panda, N; Mukhi, S.K, Padhan, K; Sahoo, S. K; Sahoo, T. R; Mangaraj, S; Pradhan, S. R; & Pattanayak, S. K. (2022). Efficient native strains of rhizobia improved nodulation and productivity of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under rainfed condition. *Front Plant Sci.* 13, 1048696.

Bakhshandeh, Esmail *et al.*, Efeitos de inóculos de microrganismos promotores do crescimento de plantas na nutrição mineral, crescimento e produtividade do arroz (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Nutrition*, v. 43, n. 11, p. 1643-1660, 2020.

Balbino, Luiz Carlos; Barcellos, Alexandre de Oliveira; Stone, Luís Fernando. MARCO REFERENCIAL: Crop-Livestock-Forestry Integration. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, 2011.

Baldani, J. I. *ET AL.*, (1986). Characterization of *Herbaspirillum seropedicae* gen. nov. sp. nov. a Root-Associated Nitrogen-Fixing Bacterium. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 36(1), 86-93.

Barbosa, J. Z. *et al.*, (2022). Improving yield and health of legume crops via co-inoculation with rhizobia and *Trichoderma*: A global meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 176. 104493.

Bartmeyer, Tarcísio Nicolau *et al.*, Trigo de duplo propósito submetido ao pastejo de bovinos nos Campos Gerais do Paraná. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, p. 1247-1253, 2011.

Basso, R. F. (2023). Adoção de sistemas integrados de produção agropecuária como estratégia para intensificação sustentável.

Basu, A. *et al.*, (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Green Bioinoculants: Recent Developments, Constraints, and Prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>.

Bernis-Fonteneau, Agnès *et al.*, O papel da diversidade intraespecífica de cultivos, gado e água cultivada na manutenção de serviços ecossistêmicos. *Diversity*, v. 16, n. 7, p. 420, 2024.

Blake, C; Christensen, M. N; & Kovács, Á. T. (2021). Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(1), 15-25, <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-20-0225-CR>.

Blake, C; Christensen, M. N; & Kovács, Á. T. (2021). Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(1), 15-25, <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-20-0225-CR>.

Bonini, Carolina dos Santos Batista *et al.*, Produção de forragem e atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 51, p. 1695-1698, 2016.

Buso P. H de M, *et al.*, (2021). Plant growth analysis describing the soybean plants response on dryland field to seed co-inoculation. *Cienc Rural*. 51(9) e20190642. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190642>.

Carvalho, P. C. F. *et al.*, (2010). Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88(2), 259-273, <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9360-x>.

Carvalho, Paulo César de Faccio *et al.*, Definições e terminologias para sistema integrado de produção agropecuária. *Revista Ciência Agronômica*, v. 45, p. 1040-1046, 2014.

Carvalho, Paulo César de Faccio. Reconnectando a natureza com a produção agrícola: a via da intensificação sustentável. In: Carmona, Felipe de Campos *et al.*, *Sistemas Integrados de Produção Agropecuária em Terras Baixas*. Porto Alegre - RS: Editora RJR Ltda., 2018. Cap. 1, p. 1-9. ISBN: 978-85-67302-72- 0.

Chenthamara, K. *et al.*, (2021). Ecological Genomics and Evolution of *Trichoderma reesei*. In: MACH-AIGNER, A. R.; MARTZY, R. (Eds.). *Trichoderma reesei. Methods in Molecular Biology*, 2234, 3-20. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1048-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1048-0_1).

Chouhan, D. K., Jaiswal, D. K., Gaurav, A. K., Mukherjee, A. & Verma, J. P. PGPM as a potential bioinoculant for enhancing crop productivity under sustainable agriculture. In: Rakshit, A., Meena, V. S. M. P., Singh, H.B. & Singh A.K. (Org.). Biofertilizers, Woodhead Publishing, 221-237, (2021).

Cochard B; Giroud B; Crovadore J; Chablais R; Arminjon L; & Lefort F. (2022). Endophytic PGPR from tomato roots: isolation, in vitro characterization and in vivo evaluation of treated tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *Microorganisms*, 10(4), 765. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040765>.

Coêlho, Jackson Dantas. MILHO. Caderno Setorial ETENE, Fortaleza, v. 9, 2024. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/etene/article/view/2700>. Acesso em: 10 jul. 2024.

Conab | Acompanhamento da safra brasileira de grãos | v.9 – Safra 2021/22, Nº10 – Décimo levantamento, 2022.

Cruz, Dennis RC *et al.*, Use of multifunctional microorganisms in corn crop. Revista Caatinga, v. 36, n. 2, p. 349-361, 2023.

Da Anunciação, A. A. *et al.*, Agronomical performance of wheat crops (*Triticum* spp) subjected to Bacillus treatments in field environmental conditions: Desempenho agronomico da cultura do trigo (*Triticum* spp) submetido a tratamentos com Bacillus em condições ambientais de campo. Concilium, v. 24, n. 4, p. 326-335, 2024.

Da Cruz, Jozângelo Fernandes *et al.*, Desempenho agrônômico de variedades crioulas de milho na região do Vale do Juruá, AC. Contribuciones a las Ciencias Sociales, v. 17, n. 1, p. 6437-6451, 2024.

Da Silva, J. H. B., da Silva, A. V., da Silva, C. M., Gomes, T. R. V. R., dos Santos Araújo, V. F., Nóbrega, J. S., ... & da Silva Leal, M. P. (2023). Uso de bioestimulantes na cultura do milho (*Zea mays* L.): uma revisão. Scientific Electronic Archives, 16(5).

Danish S; Zafar-ul-Hye M; Mohsin F; Hussain M. (2020). ACC-deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize growth. 15(4), e0230615, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230615>.

De Barros, Gustavo *et al.*, Inoculação e co-inoculação de bactérias do gênero bacillus, pseudomonas e azospirillum no cultivo de milho no noroeste paulista. *Unifunec Científica Multidisciplinar*, v. 12, n. 14, p. 1-13, 2023.

De Queiroz Barbosa, Daniel *et al.*, Composição de plantas invasoras em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária. *Agropecuária Catarinense*, v. 34, n. 3, pág. 33-36, 2021.

De Souza, Willian Cleisson Lopes *et al.*, Aspectos comparativos entre milho (*Zea mays* L.) e sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench): diferenças e semelhanças. *Diversitas Journal*, v. 5, n. 4, p. 2337-2357, 2020.

Degani, O., & Dor, S. (2021). Trichoderma Biological Control to Protect Sensitive Maize Hybrids against Late Wilt Disease in the Field. *Journal of Fungi*, 7(4), 315, <https://doi.org/10.3390/jof7040315>.

Díaz-Urbano M; Goicoechea N; Velasco P; & Poveda J. (2023). Development of agricultural bio-inoculants based on mycorrhizal fungi and endophytic filamentous fungi: Co-inoculants for improve plant-physiological responses in sustainable agriculture. *Biological Control*, 182, 105223, <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105223>.

Dobo, B. (2022). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and rhizobium inoculation on growth and yield of Glycine max L. Varieties. *International Journal of Agronomy*. <https://doi.org/10.1155/2022/9520091>.

Dominchek, R., *et al.*, Crop rotations with temporary grassland shifts weed patterns and allows herbicide-free management without crop yield loss. *Journal of Cleaner Production*, v. 306. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127140>.

Dos Anjos, Mariana Moreira *et al.*, Sistemas integrados de produção agropecuária e os efeitos do componente animal. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 16, p. e498101624014-e498101624014, 2021.

Dowarah, B.; Gill, S. S; & Agarwala, N. (2022). Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Conferring Tolerance to Biotic Stresses in Plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 1429-1444, <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10392-5>.

Elejalde, Denise Adelaide Gomes *et al.*, Viabilidade econômica em sistema integrado de produção agropecuária. 2023.

El-Saadony, M. T. *et al.*, (2022). Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: Mechanisms, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 13, 923880, <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923880>.

Enespa, Prakash, J; & Chandra, P. (2020). Halophilic Microbes from Plant Growing Under the Hypersaline Habitats and Their Application for Plant Growth and Mitigation of Salt Stress. *Sustainable Development and Biodiversity*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38453-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38453-1_11).

Erenstein, O. *et al.*, (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Sec.* 14, 1295–1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>.

Etesami, H.; Jeong, B. R; & Glick, B. R. (2021). Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Phosphate-Solubilizing Bacteria, and Silicon to P Uptake by Plant. *Frontiers in Plant Science*, 12, 699618, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699618>.

Fernandes, A. C. V; Lisboa, P. H. G; de Andrade, P. H. M; Vigna, B. B. Z; Nogueira, S. R; Fávero, A. P; & Lacava, P. T. (2023). Bactérias endofíticas associadas a *Paspalum vaginatum* Swartz com potencial para promoção de crescimento vegetal e biocontrole: Endophytic bacteria associated with *Paspalum vaginatum* Swartz with potential for plant growth promotion and biocontrol. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(2), 1071–1089. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n2-010>.

Fernandes, A. C. V; Lisboa, P. H. G; de Andrade, P. H. M; Vigna, B. B. Z; Nogueira, S. R; Fávero, A. P; & Lacava, P. T. (2023). Bactérias endofíticas associadas a *Paspalum vaginatum* Swartz com potencial para promoção de crescimento vegetal e biocontrole: Endophytic bacteria associated with *Paspalum vaginatum* Swartz with potential for plant growth promotion and biocontrol. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(2), 1071–1089. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n2-010>.

Fernandes, João PT *et al.*, Efeito de microrganismos na performance do arroz de terras altas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, p. 156-162, 2021.

Fernandes, João Pedro Tavares *et al.*, Caracterização fisio-agronômica do arroz de terras altas inoculado com mix de microrganismos multifuncionais. *Revista Caatinga*, v. 33, n. 3, p. 679-689, 2020.

Fernandes, João Pedro Tavares *et al.*, Microrganismos promotores de crescimento de plantas-Trichoderma e Azospirillum: otimizando a cultura do milho em sistemas integrados de produção agropecuária. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 17, n. 2, p. e5090-e5090, 2024.

Fernandes, T. J. P. Physio-agronomic characterization of upland rice inoculated with mix of multifunctional microorganisms. *Revista Caatinga, Mossoró*, v. 33, p. 3, 2020b.

Ferreira, D. S. A. Inoculação do *Bacillus amyloliquefaciens* na promoção de crescimento e produtividade no milho. 2018. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, 2018.

Ferreira, Daniel Furtado (2020). SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *revista brasileira de biometria*. [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019. ISSN 1983-0823. doi: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.

Ferreira, F. V; & Musumeci, M. A. (2021). *Trichoderma* as biological control agent: scope and prospects to improve efficacy. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(4), 90, <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03058-7>.

Gade, R. M; & Koche, M. D. (2022). Enhancing the growth and disease suppression ability of *Pseudomonas fluorescens*. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 351-368). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85577-8.00012-3>.

Galindo, F. S; Rodrigues W. L; Fernandes G. C; Boleta E. H. M; Jalal A; Rosa P. A. L; Buzetti S; Lavres J; & Filho M. C. M. T. (2022). Enhancing agronomic efficiency and maize grain yield with *Azospirillum brasilense* inoculation under Brazilian savannah conditions. *European Journal of Agronomy*, 134, 126471, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126471>.

Garland G; Edlinger A; Banerjee S; Degrun F; García-Palacios P; Pescador D. S; Herzog C; Romdhane S; Saghai A; Spor A; Wagg C; Hallin S; Maestre F. T; Philippot L; Rillig M. C. & Heijden M. G. A. V. D (2021). Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nat Food*, 2, 28–37, <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00210-8>.

Gavilanes F. Z; Andrade D. S; Zucareli C; Horácio E. H; Yunes J. S; Barbosa A. P; Alves L. A. R; Cruzatty L. G; Maddela N. R; & Guimarães M. de F. (2020). Co-inoculation of *Anabaena cylindrica* with *Azospirillum brasilense* increases grain yield of maize hybrids. *Rhizosphere*, 15, 100224, <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100224>.

Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.

Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.

Gomes, Luiz Savelli *et al.*, Resistência ao acamamento de plantas e ao quebraamento do colmo em milho tropical. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, p. 140-145, 2010.

Gonzaga, Benedito Alves; de Andrade, Christiano Lima Lobo; Cabral Filho, Fernando Rodrigues. Tratamento de sementes de milho com bioestimulante. *Brazilian Journal of Science*, v. 2, n. 3, p. 46-53, 2023.

Grabka, R; D'Entremont, T.W; Adams, S.J; Walker, A.K; Tanney, J.B; Abbasi, P.A; & Ali, S. (2022). Fungal endophytes and their role in agricultural plant protection against pests and pathogens. *Plants*, 11(3), 384, <https://doi.org/10.3390/plants11030384>.

Grespan, Daniel Silva *et al.*, Correlações e Análise de Trilha em Caracteres Agronômicos de Híbridos de Milho Segunda Safra Cultivados em Balsas-MA. *Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde*, v. 27, n. 1, p. 49-54, 2023.

Guimarães, Daniel Pereira. 2024 Artigo: Impactos do clima na atual safra de milho. Disponível em: [ww.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/90138806/artigo-impactos-do-clima-na-atual-safra-de-milho](http://ww.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/90138806/artigo-impactos-do-clima-na-atual-safra-de-milho).

Guo R; Ji S; Wang Z; Zhang H; Wang Y; & Liu Z. (2021). *Trichoderma asperellum* xylanases promote growth and induce resistance in poplar. *Microbiological Research*, 248, 126767, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126767>.

Gupta G. D; Bansal R; Mistry H; Pandey B; & Mukherjee P. K; (2021). Structure-function analysis reveals *Trichoderma virens* Tsp1 to be a novel fungal effector protein modulating plant

defence. *International Journal of Biological Macromolecules*, 191, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.085>.

Harman G; Khadka R; Doni F; & Uphoff N. (2020). Benefits to Plant Health and Productivity From Enhancing Plant Microbial Symbionts. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.610065>.

Hartmann, M; & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 4-18, <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>.

Hesham, A. E. L., Kaur, T., Devi, R., Kour, D., Prasad, S., Yadav, N., Singh, C., Singh, J. & Yadav, A. J. (2021). Current trends in microbial biotechnology for agricultural sustainability: Conclusion and future challenges. *Environmental and Microbial Biotechnology*. Elsevier, 555–572.

Junior, V. C. do N; Prete, C. E. C; Hungria M; & Nogueira M. A. (2023). Fixação biológica de nitrogênio em soja com diferentes níveis de tolerância à seca. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 18(3), e3268-e3268. <https://doi.org/10.5039/agraria.v18i3a3268>.

Khammas, K. M; Ageron, E; Grimont, P. A. D; & Kaiser, P. (1989). *Azospirillum irakense* sp. nov; a nitrogen-fixing bacterium associated with rice roots and rhizosphere soil. *Research in Microbiology*, 140(9), 679-693. [https://doi.org/10.1016/0923-2508\(89\)90199-X](https://doi.org/10.1016/0923-2508(89)90199-X).

Kholssi, R; Marks Evan A.N; Miñón J; Maté, A. P; Sacristán, G; Montero O; Debdoubi A; & Rad C. (2021). A consortium of cyanobacteria and plant growth promoting rhizobacteria for wheat growth improvement in a hydroponic system. *South African Journal of Botany*, 142, 247-258, <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.06.035>.

Khosru, B., Mitra, D., Khoshmanzar, E., Myo, E. M., Uniyal, N., Mahakur, B., *et al.*, (2020). Current scenario and future prospects of plant growth-promoting rhizobacteria: An economic valuable resource for the agriculture revival under stressful conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 43, 3062–3092.

Klein, John Lenon *et al.*, Desempenho produtivo de híbridos de milho para a produção de silagem da planta inteira. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 17, n. 1, p. 101-110, 2018.

Klepa, M. S; Helene L. C. F; O'Hara G., & Hungria M. (2021). *Bradyrhizobium agreste* sp. nov; *Bradyrhizobium glycinis* sp. nov. and *Bradyrhizobium diversitatis* sp. nov; isolated from a biodiversity hotspot of the genus *Glycine* in Western Australia. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 71, 3 <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004742>.

Köppen, W.; Geiger, R. 1928. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlagcondicionadas. Justus Perthes. n.p.

Kour D; Rana K. L; Yadav A. N; Yadav N; Kumar M; Kumar V; Vyas P; Dhaliwal H. S; & Saxena A. K; (2020). Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101487, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487>.

Koza, N; Adedayo, A; Babalola, O; & Kappo, A. (2022). Microorganisms in Plant Growth and Development: Roles in Abiotic Stress Tolerance and Secondary Metabolites Secretion. *Microorganisms*, 10(8), 1528. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081528>.

Kumawat, K. C; Razdan, N; & Saharan, K. (2022). Rhizospheric microbiome: Bio-based emerging strategies for sustainable agriculture development and future perspectives. *Microbiological Research*, 254, 126901, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126901>.

Lemaire G., Franzluebbers A., Carvalho P. C. de F., & Dedieu B. (2014). Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 4-8, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>.

Li Y; Li Q; Guan G; & Chen S. (2020). Phosphate solubilizing bacteria stimulate wheat rhizosphere and endosphere biological nitrogen fixation by improving phosphorus content. *PeerJ*, 8, e9062, <https://doi.org/10.7717/peerj.9062>.

Lima, A. F. S. *et al.*, (2022). Eficiência fisiológica e desempenho do amendoim sob estresse salino e inoculado com *Bradyrhizobium*. *Water Resources and Irrigation Management-WRIM*, 11(1-3), 22-35. <https://doi.org/10.19149/wrim.v11i1-3.2819>.

Lopes, M. J. S, Dias-Filho, M. B., Castro, T. H. R., Gurgel, E. S. & Silva, G. B. (2021b). Efficiency of biostimulants for alleviating shade effects on forage grass. *Journal of Agricultural Studies*, 9, 14-30.

Lopes, M. J. S., Dias-Filho, M. B. & Gurgel, E. S. C. (2021a). Successful plant growth-promoting microbes: Inoculation methods and abiotic factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5 (606454), 1-13.

Machado, R., Calvi, V., Paccola, E., Schmdit Filho, E., & Gasparotto, F. (2020). Inoculação foliar de plantas de milho com *Bacillus subtilis* e *Azospirillum brasilense*. *Enciclopédia Biosfera*, 17(34), 289-298.

Mahmud, K; Makaju, S; Ibrahim, R; & Missaoui, A. (2020). Current Progress in Nitrogen Fixing Plants and Microbiome Research. *Plants*, 9(1), 97. <https://doi.org/10.3390/plants9010097>.

Marra, Daniel Felipe *et al.*, Um estudo prospectivo da cadeia produtiva do milho no Brasil. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 40, p. 27368, 2024.

Martins, A.; Kunrath, T. R.; Anghinoni, I.; Carvalho, P. C. de F. (eds.). Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil. Porto Alegre: Ufrgs, 2015. (Boletim Técnico, 2. Edição) 102p.

Martins, Lucas Oliveira; Archangelo, Eliane Regina. Crescimento e desenvolvimento da mandioca e do milho em cultivo solteiro e consorciado. *Agri-environmental sciences*, v. 9, n. 2, p. 13-13, 2023.

Mastan A; Rane D; Dastager S. G; & Babu C. S. V; (2021). Molecular insights of fungal endophyte co-inoculation with *Trichoderma viride* for the augmentation of forskolin biosynthesis in *Coleus forskohlii*. *Phytochemistry*, 184, 112654, <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112654>.

Matar N., Macadré C., Ammar GAG., Peres A., Collet B., Boustany NE., Rajjou L., As-Sadi F., Dufresne M., & Ratet P. (2022). Identification of beneficial Lebanese *Trichoderma* spp. wheat endophytes. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1017890 <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1017890>.

Maughan, Matthew W. *et al.*, Qualidade do solo e rendimento de milho sob integração lavoura-pecuária em Illinois. *Agronomy journal*, v. 101, n. 6, p. 1503-1510, 2009.

Mazoyer, M.; Roudart, L. A história das agriculturas no mundo: Do Neolítico à crise contemporânea. São Paulo: UNESP, 2010. 568 p.

Mei C., Zhou D., Chretien R. L., Turner A., Hou G; Evans M. R., & Lowman S. (2023). A Potential Application of *Pseudomonas psychrotolerans* IALR632 for Lettuce Growth Promotion in Hydroponics. *Microorganisms*, 11(2), 376 <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020376>.

Mendonça, J; Lira Junior, M; Carvalho, E; Fracetto, G; Fracetto, F; Alves, M; & Oliveira, J. (2021). Diversidade, mecanismos de atuação e potencial agrícola de bactérias promotoras de crescimento de plantas, usando milho como cultura exemplo. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, 25(2). <https://doi.org/10.12661/pap.2020.010>.

Minakshi G; Shrey B; Abha S; Pushpendra S; Jyoti S; & Lata N. (2020). PGPR Mediated Alterations in Root Traits: Way Toward Sustainable Crop Production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.618230>.

Moraes, A. de, Carvalho, P. C. de F., Lustosa, S. B. C., Lang, C. R., & Deiss, L. (2014). Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, 45(5spe), 1024–1031. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500018>.

Moraes, A. de; Carvalho, P. C. de F; Lustosa, S. B. C; Lang, C. R; & Deiss, L. (2014). Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, 45(5spe), 1024–1031. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500018>.

Moraes, A.; Carvalho, P.C.F.; Anghinoni, I.; Lustosa, S.C.; Costa, S.E.V.G.A. & Kunrath, T.R. Crop-livestock integration in Brazilian subtropics II. In: International symposium on integrated crop-livestock systems. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. CD ROM.

Moraes, Anibal *et al.*, Sistemas Integrados de produção Agropecuária: Conceitos básicos e histórico no Brasil. In: *Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil*. 1. ed. Tubarão - SC: Copiart, p. 13-28. 2018. ISBN 9788583881117.

Moreira, F. M. S; & Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. (2<sup>o</sup> edição) Lavras: UFLA.

Mourouzidou, S., Ntinis, G. K., Tsaballa, A., & Monokrousos, N. (2023). Introducing the Power of Plant Growth Promoting Microorganisms in Soilless Systems: A Promising Alternative for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 15, 5959, <https://doi.org/10.3390/su15075959>.

Msimbira, L. A., & Smith, D. L. (2020). The roles of Plant Growth Promoting Microbes in enhancing plant tolerance to acidity and alkalinity stresses. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 1–14.

Mukherjee, P. K; Mendoza-Mendoza, A; Zeilinger, S; Horwitz, B. A. (2022). Mycoparasitism as a mechanism of Trichoderma-mediated suppression of plant diseases. *Fungal Biology Reviews*, 39, 15-33, <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.004>.

Mwenda, G. M; Hill, Y. J; O'Hara, G. W; Reeve, W. G; Howieson, J. G. & Terpolilli, J. J. (2023). Competição na simbiose *Phaseolus vulgaris* - Rhizobium e o papel dos rizóbios residentes no solo na determinação dos resultados da inoculação. *Plant Soil*, 487, 61–77, <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05903-0>.

Nascimento, V. C; Rodrigues-Santos, K. C; Carvalho-Alencar, K. L; Castro, M. B; Kruger, R. H; & Lopes, F. A. C.. (2022). *Trichoderma*: biological control efficiency and perspectives for the Brazilian Midwest states and Tocantins. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e260161. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.260161>.

Ngwenya, Z. D; Mohammed, M; Jaiswal, S. K; & Dakora, F. D. (2022). Phylogenetic relationships among Bradyrhizobium species nodulating groundnut (*Arachis hypogea* L.), jack bean (*Canavalia ensiformis* L.) and soybean (*Glycine max* Merr.) in Eswatini. *Scientific reports*, 12(1), 10629. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14455-9>.

Norman G, Streiner D, editores. *Biostatistics: the bare essentials*. 3. ed. Hamilton: B.C. Decker; 2014.

Okon, Y. (1985). Azospirillum as a potential inoculant for agriculture. *Trends in Biotechnology*, 3(9), 223-228, [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(85\)90012-5](https://doi.org/10.1016/0167-7799(85)90012-5).

Olanrewaju, O. S; Glick, B. R; & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(11), 197, <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>.

Oliveira, C. E. da S; Jalal, A; Oliveira, J. R; Tamburi, K. V; & Teixeira Filho, M. C. M. (2022). Leaf inoculation of *Azospirillum brasilense* and *Trichoderma harzianum* in hydroponic arugula improve productive components and plant nutrition and reduce leaf nitrate. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 52, e72755. <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272755>.

Oliveira, D. T. M. *et al.*, Avaliação biométrica do uso de diferentes fontes de nitrogênio no milho safrinha. *Brazilian Journal of Science*, v. 2, n. 1, p. 63-71, 2023.

OLIVEIRA, Juliete de Sousa *et al.*, Microrganismos associados à adubação na promoção de crescimento em plantas de milho crioulo (*Zea mays* L.). 2024. Tese de Doutorado.

Orozco-Mosqueda, M. D. C; Santoyo, G; & Glick, B. R. (2023). Recent Advances in the Bacterial Phytohormone Modulation of Plant Growth. *Plants Basel*, 12(3), 606. <https://doi.org/10.3390/plants12030606>.

Palamar, Natália Giehl. Da pesquisa ao campo: estudo de tecnologias baseadas no conceito de intensificação sustentável. 2023.

Pathania P., Rajta A., Singh P. C., & Bhatia R., (2020). Role of plant growth-promoting bacteria in sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 30, 101842 <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101842>.

Pereira, Caroline Nascimento; De Castro, César Nunes. Expansão da produção agrícola, novas tecnologias de produção, aumento de produtividade e o desnível tecnológico no meio rural. Texto para Discussão, 2022.

Posada, A., Mejía, D., Polanco-Echeverry, D. & Cardona, J. (2021). Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): Una revisión sistemática 1990- 2019. *Revista de Investigación Agraria y ambiental*, 12 (2), 161 – 178.

Puech, T; & Stark, F. (2023). Diversification of an integrated crop-livestock system: Agroecological and food production assessment at farm scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 344, 108300, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108300>

Rawat, P; Das, S; Shankhdhar, D; & Shankhdhar, S. (2021). Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 49-68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>.

Ray, P; Lakshmanan, V; Labbé, J. L; & Craven, K. D. (2020). Microbe to Microbiome: A Paradigm Shift in the Application of Microorganisms for Sustainable Agriculture. *Frontiers in microbiology*, 11, 622926. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.622926>.

Renoud, S; Abrouk, D; Prigent-Combaret, C; Wisniewski-Dyé, F; Legendre, L; Moënnelocoz, Y; & Muller, D. (2022). Effect of Inoculation Level on the Impact of the PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1 on Selected Microbial Functional Groups in the Rhizosphere of Field Maize. *Microorganisms*, 10(2), 325. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020325>.

Repke, R. A. *et al.*, Altura de planta, altura de inserção de espiga e número de plantas acamadas de cinco híbridos de milho. In: XXIX Congresso Nacional de Milho e Sorgo. 2012. p. 1940-1943.

Rezende, C. C. Silva, M. A., Frasca, L. L. M., Faria, D. R., Filippi, M. C. C., Lanna, A. C. & Nascente, A. S. (2021). Microrganismos multifuncionais: Utilização na agricultura. *Research, Society and Development*, 10, 2, e50810212725.

Rezende, C. C., Frasca, L. L. de M., Silva, M. A., Pires, R. A. C., Lanna, A. C., Filippi, M. C. C. de, & Nascente, A. S. (2021). Características fisiológicas e agronômicas do feijão comum influenciados por microrganismos multifuncionais. *Semina: Ciências Agrárias*, 42(2), 599–618. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n2p599>

Rezende, C. C; Silva, M. A; Frasca, L. L. de M; Faria, D. R., Filippi, M. C. C. de., Lanna, A. C., & Nascente, A. S. (2021). Multifunctional microorganisms: use in agriculture. *Research, Society and Development*, 10(2), e50810212725. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12725>.

Rodrigues, A. B. *et al.*, Caracterização morfológica e desempenho produtivo do milho (*Zea mays* L.) inoculado com bactérias promotoras de crescimento vegetal. 2023.

Rodrigues, V. N. *et al.*, Comparação entre métodos para estimar a produtividade de grãos de milho. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 29, n. 1, p. 35, 2005.

Romero Flores, L. L.; López Nevárez, V.; Peinado Guevara, V. M.; Chinchillas Chinchillas, M. de J.; Perea Dominguez, X. P.; & Arciniega Galaviz, M. A. (2023). Possibilities for Sustainable Development in Corn Intensification Scenarios. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 10, 106–130. <https://doi.org/10.47577/technium.v10i.9095>.

Ruthes B. E. S., Kaschuk G., Moraes A. de, Lang C. R., Crestani C. & Oliveira L. B. de. (2023). Soil Microbial Biomass, N Nutrition Index, and Yield of Maize Cultivated Under eucalyptus Shade in Integrated crop-livestock-forestry Systems. *Int. J. Plant Prod.* 17, 323–335, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42106-023-00242-7>.

Saeed, Q.; Xiukang, W.; Haider, F. U.; Kučerik, J.; Mumtaz, M. Z.; Holatko, J.; Naseem, M.; Kintl, A.; Ejaz, M.; Naveed, M.; Brtnicky, M.; & Mustafa, A. (2021). Rhizosphere Bacteria in Plant Growth Promotion, Biocontrol, and Bioremediation of Contaminated Sites: A Comprehensive Review of Effects and Mechanisms. *International journal of molecular sciences*, 22(19), 10529. <https://doi.org/10.3390/ijms221910529>.

Sales, L. Z. S., Garcia, N. F. S., Martins, J. T., Buzo, F. S., Garé, L. M., Rodrigues, R. A. F. & Arf, O. (2021). Inoculation with *Azospirillum brasilense* and fertilizer reduction in upland rice. *Research, Society and Development*, 10 (7), e9110716345.

Samuels Gary J. (1996). *Trichoderma*: a review of biology and systematics of the genus. *Mycological Research*, 100(8), 923-935. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(96\)80043-8](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(96)80043-8).

Samuels Gary J. (2006). *Trichoderma*: systematics, the sexual state, and ecology. *Phytopathology*, 96(2), 195-206. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0195>.

Sant'Anna F. H.; Almeida, L. G. P.; Cecagno, R.; Reolon, L. A.; Siqueira, F. M.; Machado, M. R. S.; Vasconcelos A. T. R.; & Schrank, I. S. (2011). Genomic insights into the versatility of the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum amazonense*. *BMC Genomics*, 12, 409, <https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-409>.

Santoyo, G.; Urtis-Flores, C. A.; Loeza-Lara, P. D.; Orozco-Mosqueda, Ma. del C.; & Glick, B. R. (2021). Rhizosphere Colonization Determinants by Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR). *Biology (Basel)*, 10(6), 475, [doi.org/10.3390/biology10060475](https://doi.org/10.3390/biology10060475).

Sarkar D; Singh S; Parihar M; & Rakshit A. (2021). Seed bio-priming with microbial inoculants: A tailored approach towards improved crop performance, nutritional security, and agricultural sustainability for smallholder farmers. *Current Research in Environmental Sustainability*, <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100093>.

Schuster, A; & Schmoll, M. (2010). Biology and biotechnology of *Trichoderma*. *Applied microbiology and biotechnology*, 87(3), 787–799. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2632-1>.

Schweiger, R; Padilla-Arizmendi, F; Nogueira-López, G; Rostás, M; Lawry, R; Brown, C; Hampton, J; Steyaert, J. M; Müller, C; & Mendoza-Mendoza, A. (2021). Insights into Metabolic Changes Caused by the *Trichoderma virens*–Maize Root Interaction. *IS-MPMI* 34(5), 524–537. <https://doi.org/10.1094/MPMI-04-20-0081-R>.

Sekaran, U; Lai, L; Ussiri, D; Kumar, S; & Clay, S. (2021). Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security -A review. *Journal of Agriculture and Food Research*. 5. 100190. [10.1016/j.jafr.2021.100190](https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100190).

Sgarioni, Thayná Santos. Sistema alimentar e sustentabilidade ambiental: uma revisão narrativa. 2021.

Sgarioni, Thayná Santos. Sistema alimentar e sustentabilidade ambiental: uma revisão narrativa. 2021.

Shahzad, S; Arif, M; Yasmeen, T; & Ali, B. (2020). Inoculation of potassium solubilizing bacteria with different potassium fertilization sources mediates maize growth and productivity. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 57(4), 1045-1055. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/20.9788>.

Sheoran, S; Kumar, S; Kumar, P; Meena, R. S. & Rakshit, S. (2021). Nitrogen fixation in maize: breeding opportunities. *Theor Appl Genet*, 134, 1263–1280, <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03791-5>.

Silva, A.F.; Schoninger, E.L.; Caione, G.; Kuffel, C.; Carvalho, M.A.C. Produtividade de Híbridos de Milho em Função do Espaçamento e da População de Plantas em Sistema de Plantio Convencional. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 13, n. 2, p. 162-173. DOI: <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v13n2p162-173>.

Silva, L. E. B. *et al.*, Desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays* L.): revisão de literatura. *Diversitas Journal*, v. 5, n. 3, p. 1636-1657, 2020.

Silva, Mariana Aguiar *et al.*, Screening of beneficial microorganisms to improve soybean growth and yield. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 63, p. e20190463, 2020.

Singh, P; Singh, R. K; Zhou, Y; Wang, J; Jiang, Y; Shen, N; Wang, Y; Yang, L. & Jiang, M. (2022). Unlocking the strength of plant growth promoting *Pseudomonas* in improving crop productivity in normal and challenging environments: a review, *Journal of Plant Interactions*, 17(1), 220-238, <https://doi.org/10.1080/17429145.2022.2029963>.

Sousa, W. dos S; Teixeira, I. R; Campos T. S; Silva G. Ca. da, Silva M. B. da & Moreira, S. G. (2022). Supplementary reinoculation in topdressing of *Rhizobium tropici* in common bean crop: effects on nodulation, morphology, and grain yield, *Journal of Plant Nutrition*, 45(20), 3094-3108, <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.2020833>.

Stockmans De N. F; Chiomento, J. C; Rosiani T; Nicolas T; Thomas, L; & Giuseppina, C. E. (2023). Alterações morfofisiológicas promovidas pela micorriza arbuscular em plantas hortícolas: uma revisão integrativa. <https://doi.org/10.37885/230212152>.

Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia Vegetal*, 5ª Edição. Artmed, Porto Alegre, p. 954, 2013.

Teixeira, Elaine Cristina *et al.*, Sistemas integrados de produção agropecuária com inclusão da leguminosa cratília. 2023.

Teixeira, I. R; Lopes, P. R; Sousa, W. S; & Teixeira, G. C. da S. (2022). Response of common bean to *Rhizobium* reinoculation in topdressing. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, 26(4), 274–282. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n4p274-282>.

Tiku, A. R. (2020). Antimicrobial Compounds (Phytoanticipins and Phytoalexins) and Their Role in Plant Defense. In: Mérillon, J.-M; Ramawat, K. (eds). *Co-Evolution of Secondary Metabolites*. Reference Series in Phytochemistry. Cham: Springer, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96397-6\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96397-6_63).

Timofeeva, A. M; Galyamova, M. R; & Sedykh, S. E. (2022). Bacterial Siderophores: Classification, Biosynthesis, Perspectives of Use in Agriculture. *Plants*, 11(22), 3065. <https://doi.org/10.3390/plants11223065>.

Torman VBL, Coster R, Riboldi J. Normality of variables: diagnosis methods and comparison of some nonparametric tests by simulation. *Rev HCPA*. 32:227-34. 2012.

Tosi, M; Ogilvie, C. M; Spagnoletti, F. N; Fournier, S; Martin, R. C; & Dunfield, K. E. (2023). Cover Crops Modulate the Response of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Water Supply: A Field Study in Corn. *Plants*, 12(5), 1015. <http://dx.doi.org/10.3390/plants12051015>.

Trivedi, P; Leach J. E; Tringe, S. G; Sa, T; & Singh B. K. (2020). Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 18, 607-621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>.

Tyśkiewicz, R; Nowak, A; Ozimek, E; & Jaroszuk-Ściśeł, J. (2022). *Trichoderma*: The Current Status of Its Application in Agriculture for the Biocontrol of Fungal Phytopathogens and Stimulation of Plant Growth. *International journal of molecular sciences*, 23(4), 2329. <https://doi.org/10.3390/ijms23042329>.

Umesha, S., Singh, K. P., & Singh, R. P. (2018). Microbial Biotechnology and Sustainable Agriculture. *Biotechnology for Sustainable Agriculture*, 185–205.

Valani, G. P; Martíni, A. F; da Silva, L. F. S; Bovi, R. C; & Cooper, M. (2021). Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. *Soil Use and Management*, 37(1), 22-36. <https://doi.org/10.1111/sum.12667>.

Vejan, P; Abdullah, R; Khadiran, T; Ismail, S; & Nasrulhaq Boyce, A. (2016). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agricultural Sustainability—A Review. *Molecules*, 21(5), 573. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules21050573>.

Ventura, M. V. A; de Menezes Filho, A. C. P; & Batista-Ventura, H. R. F. (2023). Chemical, physical, and biological attributes of the soil in integrated systems. *Brazilian Journal of Science*, 2(4), 90-98. <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i4.300>.

Vishwakarma, K., Kumar, N., Shandilya, C., Mohapatra, S., Bhayana, S., & Varma, A. (2020). Revisiting Plant-Microbe Interactions and Microbial Consortia Application for Enhancing Sustainable Agriculture: A Review. *Frontiers in Microbiology*, 11, 560406. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.560406>.

Wu, H; Wang, B; Hao, X; Zhang, Y; Wang, T; Lu, Z; ... & Cheng, C. (2022). *Piriformospora indica* promotes the growth and enhances the root rot disease resistance of gerbera. *Scientia Horticulturae*, 297, 110946, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110946>.

Yang, J; Lan, L; Jin, Y; Yu, N; Wang, D; & Wang, E. (2022). Mechanisms underlying legume–rhizobium symbioses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 64(2), 244-267. <https://doi.org/10.1111/jipb.13207>.

Yasuda, M., Dastogeer, K. M., Sarkodee-Addo, E., Tokiwa, C., Isawa, T., Shinozaki, S., & Okazaki, S. (2022). Impact of *Azospirillum* sp. B510 on the rhizosphere microbiome of rice under field conditions. *Agronomy*, 12(6), 1367.

Yasuda, M; Dastogeer, K. M; Sarkodee-Addo, E; Tokiwa, C; Isawa, T; Shinozaki, S; & Okazaki, S. (2022). Impact of *Azospirillum* sp. B510 on the rhizosphere microbiome of rice under field conditions. *Agronomy*, 12(6), 1367. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061367>.

Zhou, J; Chai, X; Zhang, L; George, T. S; Wang, F; & Feng, G. (2020). Different Arbuscular Mycorrhizal Fungi Cocolonizing on a Single Plant Root System Recruit Distinct Microbiomes. *mSystems*, 5(6), e00929-20. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00929-20>.

Zilli, J. É; Pacheco, R. S; Gianluppi, V; Smiderle, O. J; Urquiaga, S; & Hungria, M. (2021). Biological N<sub>2</sub> fixation and yield performance of soybean inoculated with *Bradyrhizobium*. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 119(3), 323-336. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10128-7>.

Zin, N. A; & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2), 168-178, <https://doi.org/10.1016/j.aos.2020.09.003>.

Zvinavashe, A. T; Mardad, I; Mhada, M; Kouisni, L; & Marelli, B. (2021). Engineering the plant microenvironment to facilitate plant-growth-promoting microbe association. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(45), 13270-13285. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00138>.