

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO AGRONÔMICA E MULTIESPECTRAL DE
HÍBRIDOS DE MILHO SOB APLICAÇÃO DE *Trichoderma*
sp.**

Ralph Wendel Oliveira de Araujo

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
JULHO - 2025**

AVALIAÇÃO AGRONÔMICA E MULTIESPECTRAL DE HÍBRIDOS DE MILHO SOB APLICAÇÃO DE *Trichoderma* sp.

Ralph Wendel Oliveira de Araujo
Engenheiro Agrônomo, UFRB, 2023

Dissertação apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Agrárias (Área de Concentração: Agricultura Tropical).

Orientador: Carlos Augusto Dórea Bragança
Coorientador 1: Ariston de Lima Cardoso
Coorientador 2: Ossival Lolato Ribeiro

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
JULHO - 2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

A663a

Araujo, Ralph Wendel Oliveira De.

Avaliação agronômica e multiespectral de híbridos de milho sob aplicação de *Trichoderma* sp. / Ralph Wendel Oliveira De Araujo. Cruz das Almas, BA, 2025.
119.; il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Dórea Bragança

Co-orientador: Prof. Dr. Ariston de Lima Cardoso

Co-orientador: Prof. Dr. Ossival Lolato Ribeiro

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrária, Ambientais e Biológicas, Mestrado em Ciências Agrárias.

1.Milho - Produção. 2. Agricultura de Precisão 3. Agricultura Sustentável. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrária, Ambientais e Biológicas.
II.Título.

CDD: 633.17

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO AGRONÔMICA E MULTIESPECTRAL DE HÍBRIDOS DE MILHO
SOB APLICAÇÃO DE *Trichoderma* sp.**

Comissão Examinadora da Defesa de Dissertação de

Ralph Wendel Oliveira de Araujo

Aprovada em 30 de Julho de 2025

Prof. Dr. Carlos Augusto Dórea Bragança
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Orientador

Prof. Dr. Toshik Iarley da Silva
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Examinador Interno

Profa. Dra. Emeline Ingrid de Sousa Costa
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Examinadora Externa

DEDICATÓRIA

À minha família, pelo amor, apoio incondicional e exemplo de dedicação em cada etapa da minha vida: aos meus avós Antonio, Maria Cremildes, Raimundo e Maria Evangelista, cujo carinho, sabedoria e histórias de vida me inspiraram desde os primeiros passos; aos meus pais Cira e Roberto, que sempre acreditaram em mim e me ensinaram o valor do esforço e da perseverança; e aos meus irmãos Raillane, Rianderson e Robert Jhon, pela cumplicidade que tornaram os desafios mais leves. À minha noiva Beatriz, pelo companheirismo, paciência e motivação diária, que iluminaram meu caminho e transformaram este sonho em realidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder-me o dom da vida, pela fé, força e coragem para concluir esta etapa e por iluminar cada momento da minha trajetória.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, pela realização do Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Grupo de Tecnologias, Engenharia, Robótica e Física (G-TERF), pelo suporte técnico, operacional e tecnológico indispensáveis; à Clínica Fitossanitária da UFRB e ao Grupo de Estudos em Forragicultura (GEF), pelas valiosas contribuições científicas e pela infraestrutura disponibilizada.

Ao Prof. Dr. Carlos Augusto Dórea Bragança, pela orientação precisa, inspiração e dedicação; ao Prof. Dr. Ariston de Lima Cardoso, pela parceria, amizade e incentivo constantes ao longo de todo o processo; e ao Prof. Dr. Ossival Lolato Ribeiro, pela colaboração e suporte ao longo de toda esta jornada.

À minha família, pelo amor e suporte em cada etapa: aos avós Antonio, Maria Cremildes, Raimundo e Maria Evangelista, aos meus pais Roberto e Cira, pelo exemplo de perseverança e incentivo incondicional; e aos irmãos Raillane, Rianderson e Robert Jhon, pelo auxílio, cumplicidade e leveza.

À minha noiva Beatriz, pelo companheirismo, paciência e motivação diária, seu apoio tornou possível a concretização deste sonho;

À Lorenna Rocha, Clara Rocha e Lorenzo Rocha, pela amizade e apoio incondicionais.

A Uemerson Ferreira, pelo apoio e parceria na condução dos experimentos.

Aos colegas Deivson Nascim, Erislan Fonseca e Alfredo Teles, pela colaboração e auxílio na coleta de dados; ao G-TERF, Rodrigo, Samir, Henrique, Rhoman, George e a Luiz Artur dos Santos da Silva, pelo empenho na realização dos experimentos e pela parceria constante.

À Biogenic Group, pelo financiamento e parceria na condução dos experimentos, na pessoa de Reinaldo Kato.

Ao Prof. Dr. Toshik Iarley da Silva, à Prof.^a Dra. Emellinne Ingrid de Sousa Costa e à Prof.^a Dra. Fabiana Lana de Araújo, pela honra de compor esta banca e pelas valiosas contribuições.

Aos professores, à secretaria, ao colegiado e a toda equipe da Pós-Graduação em Ciências Agrárias da UFRB, pelo aprendizado contínuo e pelo suporte durante todo o curso.

Por fim, a todos que contribuíram para a concretização deste trabalho, registro com gratidão o meu mais profundo reconhecimento, Deus os abençoe.

EPIGRAFE

“Mas os que esperam no Senhor renovam suas forças, sobem com asas como águias; correm e não se cansam; caminham e não se fatigam.” — Isaías 40,31

AVALIAÇÃO AGRONÔMICA E MULTIESPECTRAL DE HÍBRIDOS DE MILHO SOB APLICAÇÃO DE *Trichoderma* sp.

RESUMO GERAL

A busca por práticas agrícolas sustentáveis tem impulsionado a integração de bioinsumos e tecnologias de agricultura de precisão. Com isso, o objetivo neste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de *Trichoderma* sp. no crescimento e na resposta espectral de híbridos de milho (*Zea mays* L.), correlacionando dados de campo (massa verde e a massa seca da parte aérea, colmo, espiga e total (g), bem como a produção total de massa seca (Kg.ha⁻¹), o teor de massa seca (%), Fibra em Detergente Neutro (FDN), Celulose, Hemicelulose e Lignina (g.kg⁻¹)) com índices de vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), por Diferença Normalizada Verde (GNDVI) e Índice de Diferença Normalizada da Borda Vermelha (NDRE) obtidos por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). O experimento foi realizado na fazenda experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), em Cruz das Almas-BA, utilizando um delineamento em blocos casualizados em um arranjo fatorial 2 x 2. Os tratamentos consistiram em dois híbridos de milho (Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU) com e sem a aplicação de *Trichoderma* sp., com quatro repetições. A inoculação com *Trichoderma* sp. foi aplicada via pulverização no solo no estágio fenológico V2, e o controle de plantas daninhas foi realizado aos 35 dias após a semeadura. As imagens multiespectrais para o cálculo dos índices foram coletadas semanalmente, enquanto os dados de campo foram coletados no estágio R5. A partir dos resultados observou-se que a resposta ao *Trichoderma* sp. foi genótipo-dependente. O híbrido Pioneer com o *Trichoderma* sp. obteve melhor resposta espectral, com aumentos nos valores médios de NDVI (2,17%), GNDVI (1,79%) e NDRE (0,01%), enquanto o Feroz não apresentou o mesmo comportamento. A inoculação promoveu incrementos na massa verde e seca da parte aérea, colmo e espiga, e na produtividade, além de elevar o teor de hemicelulose. A partir da Análise de componentes principais (ACP) foi observado que o tratamento Feroz com *Trichoderma* sp. correlacionou-se com as variáveis agronômicas, ao passo que o Pioneer apresentou maior relação com as variáveis bromatológicas. Através das análises de correlação observou-se que o bioinsumo modifica a assinatura espectral de maneira distinta para cada híbrido. Foi observada uma alta correlação dos índices com a massa verde total. Para as demais variáveis, as correlações variaram em função da interação entre o bioinsumo e o híbrido. Conclui-se que a aplicação de *Trichoderma* sp. gera ganhos agronômicos significativos na cultura do milho e o monitoramento multiespectral é uma ferramenta eficaz para detectar tais variações. Contudo, a natureza da resposta é fortemente influenciada pela interação específica entre o microrganismo e o genótipo do híbrido.

Palavras-chaves: Agricultura de Precisão, Índices Multiespectrais, Resposta Espectral, Sensoriamento Remoto

AGRONOMIC AND MULTISPECTRAL EVALUATION OF CORN HYBRIDS UNDER APPLICATION OF *Trichoderma* sp.

GENERAL ABSTRACT

The search for sustainable agricultural practices has driven the integration of bio-inputs and precision agriculture technologies. With this, the objective of this work was to evaluate the effect of the application of *Trichoderma* sp. on the growth and spectral response of corn (*Zea mays* L.) hybrids, by correlating field data (green mass and dry mass of the aerial part, stalk, ear, and total (g), as well as the total production of dry mass ($\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), dry mass content (%), Neutral Detergent Fiber (FDN), Cellulose, Hemicellulose, and Lignin ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)) with vegetation indices of Normalized Difference (NDVI), Green Normalized Difference (GNDVI), and Normalized Difference Red Edge Index (NDRE) obtained by an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The experiment was carried out at the experimental farm of the Federal University of Recôncavo da Bahia (UFRB), in Cruz das Almas-BA, using a randomized block design in a 2x2 factorial arrangement. The treatments consisted of two corn hybrids (Feroz VIP3 and Pioneer P3858PWU) with and without the application of *Trichoderma* sp., with four repetitions. The inoculation with *Trichoderma* sp. was applied via soil spray at the V2 phenological stage, and weed control was performed 35 days after sowing. The multispectral images for calculating the indices were collected weekly, while the field data were collected at the R5 stage. From the results, it was observed that the response to *Trichoderma* sp. was genotype-dependent. The Pioneer hybrid with *Trichoderma* sp. obtained a better spectral response, with increases in the average values of NDVI (2.17%), GNDVI (1.79%), and NDRE (0.01%), while the Feroz did not show the same behavior. The inoculation promoted increases in the green and dry mass of the aerial part, stalk, and ear, and in productivity, in addition to increasing the hemicellulose content. From the Principal Component Analysis (PCA), it was observed that the Feroz treatment with *Trichoderma* sp. was correlated with the agronomic variables, while the Pioneer showed a greater relationship with the bromatological variables. Through the correlation analyses, it was observed that the bio-input modifies the spectral signature in a distinct manner for each hybrid. In the Feroz, the indices correlated negatively with the fibrous components in the presence of *Trichoderma* sp., inverting the sign in its absence. In contrast, in the Pioneer, the presence of the fungus resulted in strongly positive correlations between the indices and the fibrous fractions. It is concluded that the application of *Trichoderma* sp. generates significant agronomic gains in the corn crop and that multispectral monitoring is an effective tool to detect such variations. However, the nature of the response is strongly influenced by the specific interaction between the microorganism and the hybrid genotype

Keywords: Precision Agriculture, Multispectral Indices, Spectral Response, Remote Sensing.

LISTA DE ABREVIATURAS

ACP	Análise de Componentes Principais
ANOVA	Análise de Variância
Bt	<i>Bacillus thuringiensis</i>
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CV	Coeficiente de Variação
DAE	Dias Após a Emergência
FDA	Fibra em Detergente Ácido
FDN	Fibra em Detergente Neutro
GCPs	Pontos de Controle Terrestres
GNDVI	Índice de Diferença Normalizada de Vegetação Verde
GNSS	Sistemas Globais de Navegação por Satélite
IAF	Índice de Área Foliar
IDB	Index DataBase
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LAI	Índice de Área Foliar
LIG	Lignina
MAX	Máximo
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MED	Média
MIN	Mínimo
MS	Matéria Seca
MSC	Matéria Seca do Colmo
MSPAT	Massa Seca Parte Aérea Total
MST	Massa Seca Total

MV	Massa Verde
MVA	Massa Verde Aérea
MVC	Massa Verde Colmo
MVE	Massa Verde Espiga
NDRE	Índice de Diferença Normalizada de Borda Vermelha
NDVI	Índice de Diferença Normalizada de Vegetação
NIR	Infravermelho Próximo
PES	Peso Espiga
PH	Potencial Hidrogeniônico
PMS	Produção Massa Seca
PMV	Produção de Matéria Verde
Prod	Produtividade
PVT	Peso Verde Total
RFC	Razão Folha Colmo
RMSV	Variação Quadrática Média
RTK	Cinemático em Tempo Real
SB	Soma de Bases
SPAD	Unidade de Medida para Teor de Clorofila
TNT	Tecido Não Tecido
UFC/mL	Unidades Formadoras de Colônias por Mililitro
UAV	Veículo Aéreo Não Tripulado
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados
VIs	Índices de Vegetação

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1.

Tabela 1. Resultado da análise química do solo utilizado antes da instalação do experimento.....	38
Tabela 2. Valores obtidos para o índice NDVI em cada tratamento com e sem <i>Trichoderma</i> sp., nos híbridos Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU.....	45
Tabela 3. Valores obtidos para o índice GNDVI em cada tratamento com e sem <i>Trichoderma</i> sp., nos híbridos Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU.....	48
Tabela 4. Valores obtidos para o índice NDRE em cada tratamento com e sem <i>Trichoderma</i> sp., nos híbridos Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU.....	51

CAPÍTULO 2.

Tabela 01. Resultado da análise química do solo utilizado antes da instalação do experimento.....	67
Tabela 2. Efeitos da Aplicação de <i>Trichoderma</i> sp. e Híbridos de Milho nas Variáveis avaliadas.....	70
Tabela 3. Efeitos da Aplicação de <i>Trichoderma</i> sp. e Híbridos de Milho nas Variáveis de Qualidade Bromatológica.....	71
Tabela 4. Efeito da inoculação com <i>Trichoderma</i> sp. sobre o teor de celulose (g.kg ⁻¹) em cada híbrido de milho.....	72
Tabela 05. Comparação entre teor de celulose dos híbridos na presença e na ausência de inoculação com <i>Trichoderma</i> sp.....	72

CAPÍTULO 3.

Tabela 1. Resultado da análise química do solo utilizado antes da instalação do experimento.....	90
Tabela 2. Álgebras de Bandas para extração dos índices espectrais utilizados no experimento.....	94
Tabela 3. Classificação dos Coeficientes de Correlação de Pearson (r) segundo Shimakura (2006).....	94

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1.

Figura 1. Delimitação da área de estudo (Cruz das Almas – BA)	36
Figura 2. Gráfico de precipitação pluviométrica e temperatura média para o período de maio a agosto de 2024 para o município de Cruz das Almas	37
Figura 3. Fluxograma de coleta e processamento das imagens multiespectrais	39
Figura 4. Planejamento e parâmetros de Voo.	40
Figura 5. Variação temporal do NDVI no híbrido Feroz VIP3 sob tratamentos com e sem <i>Trichoderma</i> sp.....	44
Figura 6. Variação temporal do NDVI do híbrido Pioneer P3858PWU sob tratamentos com e sem <i>Trichoderma</i> sp.....	45
Figura 7. Variação temporal do GNDVI no híbrido Feroz VIP3 sob tratamentos com e sem <i>Trichoderma</i> sp.....	47
Figura 8. Variação temporal do GNDVI no híbrido Pioneer P3858PWU sob tratamentos com e sem <i>Trichoderma</i> sp.....	48
Figura 9. Variação temporal do NDRE no híbrido Feroz VIP3 sob tratamentos com e sem <i>Trichoderma</i> sp.....	50
Figura 10. Variação temporal do NDRE no híbrido Pioneer P3858PWU sob tratamentos com e sem <i>Trichoderma</i> sp.....	51

CAPÍTULO 2.

Figura 1. Delimitação da área de estudo (Cruz das Almas – BA)	65
Figura 2. Gráfico de precipitação pluviométrica e temperatura média para o período de maio a agosto de 2024 para o município de Cruz das Almas.....	66
Figura 3. Gráfico Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis agrônômicas e bromatológicas em relação aos tratamentos.....	74
Figura 4. Mapa de fatores da ACP ilustrando a interação genótipo x aplicação de <i>Trichoderma</i> sp. em híbridos de milho.....	75

CAPÍTULO 3.

Figura 1. Delimitação da área de estudo (Cruz das Almas – BA)	
.....	88
Figura 2. Gráfico de precipitação pluviométrica e temperatura média para o período de maio a agosto de 2024 para o município de Cruz das Almas.....	89
Figura 3. híbrido feroz com e sem a aplicação do <i>Trichoderma</i> sp.....	96
Figura 4. híbrido pionner com e sem a aplicação do <i>Trichoderma</i> sp.....	102

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	5
AGRADECIMENTOS.....	6
EPÍGRAFE.....	8
RESUMO GERAL.....	9
GENERAL ABSTRACT.....	10
CAPÍTULO 1.....	13
CAPÍTULO 1.....	14
CAPÍTULO 2.....	14
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	18
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1 Aspectos gerais do milho.....	20
2.2 Caracterização Agronômica dos Híbridos de Milho.....	22
2.3 Utilização de microrganismos para manejo de culturas agrícolas.....	23
2.4 Uso das geotecnologias e imageamento multiespectral para o monitoramento de culturas agrícolas.....	25
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
CAPÍTULO 1.....	37
RESUMO.....	38
ABSTRACT.....	39
1. INTRODUÇÃO.....	40
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
2.1 Área de estudo.....	42
2.2 Implantação da cultura.....	43
2.3 Aplicação do Trichoderma sp. e delineamento experimental.....	44
2.4 Aquisição de imagens multiespectrais.....	45
2.5 Processamento dos dados coletados.....	47
2.6 Comparação e análise de dados.....	48
3. RESULTADOS.....	48
3.1 Análise do Índice de Diferença Normalizada de Vegetação (NDVI).....	48
3.2 Análise do Índice de Diferença Normalizada de Vegetação Verde (GNDVI).....	51
3.3 Análise do Índice de Diferença Normalizada de Borda Vermelha (NDRE).....	54
4. DISCUSSÃO.....	57
5. CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS.....	61
CAPÍTULO 2.....	65
RESUMO.....	66
ABSTRACT.....	67
1. INTRODUÇÃO.....	68

2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	70
2.1 Área de estudo.....	70
2.2 Implantação da cultura.....	72
2.3 Delineamento experimental.....	73
2.4 Coleta das amostras amostras.....	74
2.5 Análise estatística.....	74
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
3.1 Análise de variância e teste de médias.....	75
3.2 Análise de componentes principais.....	79
4. CONCLUSÃO.....	81
5. REFERÊNCIAS.....	82
CAPÍTULO 3.....	88
RESUMO.....	89
ABSTRACT.....	90
1. INTRODUÇÃO.....	91
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	93
2.1 Área de estudo.....	93
2.2 Implantação da cultura.....	94
2.3 Delineamento experimental.....	95
2.4 Coleta e análise das amostras.....	96
2.5 Aquisição das imagens multiespectrais.....	97
2.6 Processamento dos dados coletados.....	98
2.7 Correlação e análise de dados.....	99
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	100
3.1 Análise para o híbrido Feroz com e sem aplicação de Trichoderma sp... 100	
3.1.1 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice GNDVI.....	101
3.1.2 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice NDVI.....	103
3.1.3 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice NDRE.....	105
3.2 Análise para o híbrido Pioneer com e sem aplicação do Trichoderma sp.....	106
3.2.1 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice GNDVI.....	107
3.2.2 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice NDVI.....	109
3.2.3 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice NDRE.....	110
4. CONCLUSÃO.....	112
5. REFERÊNCIAS.....	112

1. INTRODUÇÃO GERAL

O milho (*Zea mays* L.) pertencente à família Poaceae, destaca-se como o cereal de maior produção mundial, superando a marca de 1 bilhão de toneladas anuais (ERENSTEIN et al., 2022). Com notável relevância para a sociedade devido à sua grande adaptabilidade. Esse protagonismo deve-se à sua versatilidade de uso, sendo utilizado na alimentação humana, ração animal e matérias-primas industriais, tornando-o pilar da segurança alimentar global (ERENSTEIN et al., 2022). É uma das principais fontes de energia, representando entre 70 e 90% da dieta animal, dependendo da região (SOUSA E ZONTA, 2020). No Brasil, 84% do milho é destinado à alimentação animal, com maior concentração no setor avícola e na suinocultura (MENEGALDO, 2015).

A cultura do milho ocupa uma posição de destaque no cenário agrícola brasileiro, consolidando o país como o terceiro maior produtor mundial, com uma produção estimada em 126,9 milhões de toneladas na safra 2024/2025 (CONAB, 2025). Tal crescimento é sustentado pelo expressivo potencial de expansão agrícola e por extensas áreas cultivadas, que fortalecem tanto o mercado interno quanto a balança comercial (ANTOLIN et al., 2025), contando com a relevante participação de polos produtores como a região Nordeste (CONAB, 2024).

Apesar dessa proeminência, a produtividade média nacional frequentemente se encontra aquém do potencial máximo, evidenciando uma lacuna de rendimento associada a fatores como disponibilidade hídrica, fertilidade do solo e estresses bióticos (MARIN et al., 2025). Diante da alta competitividade global, a busca contínua pela eficiência produtiva e pela minimização de perdas torna-se, portanto, uma diretriz imperativa para o setor (RIBAS, 2024).

A expansão contínua da cultura do milho traz consigo desafios de sustentabilidade. Historicamente, o aumento de produtividade esteve atrelado ao uso intensivo de insumos químicos, tais como fertilizantes sintéticos e defensivos agrícolas (MIRANDA et al., 2021). Embora sejam muito utilizados, geram preocupações ambientais e econômicas, principalmente quando se fala

dos defensivos agrícolas, que podem ocasionar a contaminação de solos e recursos hídricos (GIONGO, CUNHA E MELO, 2010). Nesse contexto, cresce mundialmente o interesse por tecnologias que mantenham elevados rendimentos com menor impacto ambiental.

O uso de novas tecnologias se dá pela busca de alternativas sustentáveis, microrganismos benéficos são uma das vertentes de destaque no cenário nacional. A utilização de bactérias promotoras de crescimento e fungos benéficos às plantas vêm sendo estudados e já é realidade na agricultura tecnológica atual.

A inoculação com bactérias fixadoras de nitrogênio é uma prática que vem se consolidando, permitindo economizar adubos nitrogenados e elevar a produtividade de forma ambientalmente amigável (BARBOSA et al., 2022). Além de bactérias promotoras de crescimento, fungos benéficos vêm ganhando destaque como bioinsumos. Entre eles, o gênero *Trichoderma* sp. se sobressai pelo duplo papel de agente de biocontrole de fitopatógenos e promotor de crescimento vegetal (YAO et al., 2023).

Paralelamente aos avanços em bioinsumos, a gestão agrícola enfrenta o desafio de superar as limitações do monitoramento tradicional. Historicamente, a avaliação das lavouras ocorria de forma manual, por meio de observações visuais e amostragens de campo. Tais metodologias, além de onerosas e escassas (HASAN et al., 2020), são trabalhosas, demoradas e sujeitas a erros humanos, o que restringe sua aplicabilidade e precisão em grandes áreas (KUMAR et al., 2021). Como contraponto, a agricultura de precisão tem revolucionado o setor ao incorporar tecnologias de sensoriamento remoto, como satélites e, principalmente, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), equipados com sensores multiespectrais (GETAHUN, KEFALE e GELAYE, 2024).

Essas ferramentas permitem coletar dados em alta resolução espacial e temporal, oferecendo um diagnóstico rápido e preciso sobre a variabilidade da lavoura, o estado nutricional e a ocorrência de estresses (ZHANG et al., 2025; GUEBSI, MAMI e CHOKMANI, 2024). A partir desses dados espectrais, são calculados diversos índices de vegetação por meio de equações matemáticas que combinam a reflectância em bandas como GREEN, RED, RED-EDGE e

NIR, permitindo quantificar com alta precisão o vigor, a saúde e a biomassa das plantas (PARIDA et al., 2024).

O NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) é calculado pelas bandas de infravermelho próximo (NIR) e vermelho (Red) e é amplamente empregado para identificar padrões na vegetação, refletindo o estado geral das culturas (BEYER et al., 2025). Já o GNDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde) utiliza a banda verde (Green) em vez da banda vermelha, apresentando maior sensibilidade à variação de biomassa (SILVA et al., 2021). O NDRE (Índice de Diferença Normalizada de Borda Vermelha) substitui a banda do vermelho pela banda Red Edge, possibilitando a detecção em condição de maior densidade vegetal, pois a borda vermelha penetra mais profundamente nas folhas do que a banda vermelha convencional (REHMAN et al., 2022).

Diante desse cenário, objetivou-se com este trabalho avaliar o potencial do *Trichoderma* sp. no desenvolvimento da cultura do milho e suas interações com as respostas multiespectrais. Para tanto, a construção de cada capítulo foi pensada a partir dos seguintes objetivos específicos: 1) avaliar a resposta espectral de diferentes híbridos de milho (*Zea mays* L.) submetidos à aplicação de *Trichoderma* sp., monitorando a interação espectral ao longo do desenvolvimento da cultura; 2) analisar as respostas agronômicas dos híbridos de milho sob aplicação de *Trichoderma* sp.; e 3) estabelecer a correlação entre os índices espectrais (NDVI, GNDVI, NDRE) obtidos por imageamento multiespectral e as variáveis agronômicas coletadas em campo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais do milho

O milho (*Zea mays* L. - Poaceae), é uma das culturas agrícolas mais antigas e difundidas no mundo, apresenta grande importância para a sociedade atual, sendo cultivado há mais de 8 mil anos em várias partes do mundo, devido à sua grande adaptabilidade a fatores edafoclimáticos (BEHERA et al., 2020).

A importância desta cultura decorre das inúmeras formas de aproveitamento, abrangendo desde a alimentação humana até a alimentação animal. Representando um dos principais alimentos básicos consumido diretamente na forma de grãos e farinhas, e indiretamente por meio de produtos derivados (SAHOO E MOHANTY, 2020).

Na alimentação animal o milho é uma das principais fontes de energia, representando entre 70% e 90% da dieta (SOUSA E ZONTA, 2020). No Brasil, 84% da produção desta cultura é destinada à alimentação animal, sendo principalmente no setor avícola e na suinocultura (MENEGALDO, 2015).

Além da produção do grão, a cultura é amplamente utilizada na produção de silagem, sendo uma das principais fontes de alimentação para ruminantes devido ao seu alto rendimento em biomassa, alto valor energético, alta digestibilidade e boa palatabilidade sendo utilizado em sistemas produtivos de pecuária, especialmente durante períodos de escassez de forragem (HERRERA et al., 2023).

Dentre as diversas culturas, o milho é a mais produzida no mundo, de acordo com levantamento realizado pela empresa Statista foi produzido para o ano agrícola 23/24 cerca de 1.235,73 milhões de toneladas (STATISTA, 2023). O Brasil ocupa um lugar estratégico no setor produtivo de milho, com uma produção de 126,9 milhões de toneladas na safra 2024/2025 (CONAB, 2025).

Devido à grande importância e necessidade global desse produto, a produção dessa cultura enfrenta alta competitividade. Torna-se indispensável, no sistema produtivo, a busca pela eficiência produtiva e a redução de perdas (RIBAS, 2024).

Contudo, com o aumento da produção trouxe consigo um aumento na incidência e na severidade de doenças que afetam a cultura, representando uma ameaça para a segurança alimentar. Entre as principais doenças estão as foliares, como ferrugens, manchas, míldio e queima, além de podridões do colmo e das raízes, enfezamentos e outras (FERNANDES E OLIVEIRA, 2000; MUIS et al., 2022).

O aumento nas áreas de plantio, o manejo inadequado, o uso de cultivares suscetíveis, safras em diferentes períodos e regiões com diferentes condições climáticas contribuíram para que as doenças se tornassem um grave

problema para a cultura no Brasil (CASELA, 2006; COTA et al., 2013; CARLOS et al., 2022).

Sendo assim, para um manejo eficaz da cultura, é fundamental adotar práticas agrônomicas baseadas no uso racional de insumos e mão de obra, buscando garantir a sustentabilidade da produção. Entre os fatores a serem considerados estão a seleção de bons híbridos, manejo adequado, monitoramentos de doenças, pragas e possíveis deficiências nutricionais (CRUZ et al., 2011; BERNHARD E BELOW, 2020).

2.2 Caracterização Agronômica dos Híbridos de Milho

A diversidade genética do milho é crucial, pois confere às plantas a capacidade de adaptação a diferentes regiões, resistência a doenças e tolerância a estresses ambientais, elementos essenciais para a sustentabilidade e produtividade da cultura (PATEL et al., 2024). O avanço do melhoramento genético, incluindo o desenvolvimento de híbridos com maior vigor e produtividade, e a biotecnologia, com plantas transgênicas resistentes a pragas e tolerantes a herbicidas, têm impulsionado ganhos significativos na agricultura.

A escolha de materiais genéticos com características agrônomicas e tecnológicas avançadas, como os híbridos Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU, permite avaliar como a variabilidade genotípica pode influenciar a resposta das plantas aos tratamentos, fornecendo uma base robusta para a contextualização do estudo. A escolha adequada do híbrido de milho é fundamental para o sucesso da lavoura, podendo determinar até cerca de 50% da produtividade final (BRITO, 2020).

Com o avanço do melhoramento genético e das biotecnologias, surgiram cultivares transgênicas capazes de resistir a pragas e herbicidas, o que revolucionou a cultura do milho (YASSITEPE et al., 2021). A inserção de genes de *Bacillus thuringiensis* (milho Bt) faz com que as plantas produzam proteínas inseticidas (como as toxinas Cry e Vip3A) que reduzem em até 90% os danos por lagartas, protegendo espigas contra fungos oportunistas e diminuindo a necessidade de defensivos químicos (LEITE et al., 2011). Além disso, híbridos

modernos incorporam tolerância a herbicidas facilitando o controle de plantas daninhas (YU et al., 2023).

Um dos híbridos mais utilizados atualmente é o Feroz VIP3, este destaca-se por sua precocidade e performance versátil. De ciclo precoce, aproximadamente 120 dias até a colheita, é um híbrido considerado de dupla aptidão indicado tanto para produção de grãos quanto para silagem (SYNGENTA, 2025). Essa cultivar reúne elevado potencial produtivo aliado à estabilidade mesmo em diferentes ambientes, produzindo colmos e raízes vigorosas que conferem resistência ao acamamento.

O Feroz VIP3 integra a tecnologia Agrisure Viptera 3, possuindo o gene *vip3A* (proteína Bt) que confere resistência a principais lagartas, além de tolerância aos herbicidas glifosato e glufosinato. Além disso, o Feroz pode ser cultivado tanto na safra de verão quanto na segunda safra (safrinha), mantendo performance estável em diferentes janelas de plantio. Também é considerado um híbrido rústico, com exigência de fertilidade de solo de nível baixo a médio, o que sugere boa resposta mesmo em condições edafoclimáticas menos favoráveis.

Por sua vez, o Pioneer P3858PWU híbrido da Corteva é um híbrido precoce de alto desempenho, amplamente utilizado para grãos e silagem (PIONNER, 2020). Ele pertence à geração de híbridos com tecnologia PowerCore Ultra, que incorpora quatro genes Bt (Cry1F, Cry1A.105, Cry2Ab2 e Vip3Aa20) para controle de lepidópteros, além de genes de tolerância ao glifosato e glufosinato. Suas características agronômicas incluem estatura média de aproximadamente 2,35 m e inserção de espiga a aproximada de 1,29 m, com tipo de grão semiduro de cor amarelo-alaranjada (PIONEER, 2020).

Desta forma observa-se que os híbridos Feroz VIP3 e P3858PWU detém tecnologias modernas, com genética de ponta que associa alto potencial produtivo e resistência a adversidades, além de serem bastante utilizados no estado da Bahia.

2.3 Utilização de microrganismos para manejo de culturas agrícolas

O emprego de microrganismos benéficos no manejo agrícola é uma alternativa sustentável e promissora para melhorar a sanidade e o vigor das culturas. Dentre os microrganismos, destacam-se os fungos do gênero *Trichoderma* sp. destacam-se como bioinoculantes promissores, por sua grande capacidade de colonizar o solo e a rizosfera, competindo eficazmente com patógenos por espaço e recursos (LUCON, CHAVES E BACILIERI, 2014).

As espécies de *Trichoderma* sp. são fungos filamentosos saprófitas onipresentes em solos agrícolas, com ocorrência predominante em climas tropicais e temperados. Ao colonizar matéria orgânica morta e a zona radicular das plantas, esses fungos ajudam na decomposição de resíduos vegetais, liberando nutrientes no solo disputando de forma eficiente espaço e alimento com patógenos do solo (LUCON, CHAVES E BACILIERI, 2014).

Um dos principais mecanismos antagônicos do *Trichoderma* sp. é o micoparasitismo de fungos patogênicos. Os isolados de *Trichoderma* sp. podem reconhecer, aderir e penetrar hifas de patógenos como *Rhizoctonia solani*, *Fusarium spp.* e *Ustilago maydis*, promovendo sua desintegração por meio da produção de enzimas hidrolíticas, como quitinases, glucanases e proteases. (CARDOSO, 2022).

Além do micoparasitismo, *Trichoderma* sintetiza uma ampla gama de metabólitos secundários com reconhecida atividade antimicrobiana. Atualmente, mais de 180 desses compostos bioativos já foram identificados em espécies de *Trichoderma*, pertencentes a diversas classes químicas, como peptaibóis, gliotoxinas e ácido harzianoico. Esses metabólitos atuam na inibição do crescimento ou da reprodução de outros microrganismos no ambiente da rizosfera. Em geral, compostos voláteis e não voláteis são liberados simultaneamente, proporcionando um efeito sinérgico e ampliando a eficácia no controle biológico de fitopatógenos do solo (Cardoso, 2022).

A competição por recursos é outro modo de ação do *Trichoderma* sp.. Tanto o antagonista quanto o patógeno disputam os mesmos insumos essenciais, principalmente espaço e nutrientes na rizosfera. Uma vez que *Trichoderma* sp. rapidamente coloniza o solo e a superfície radicular, ele monopoliza o alimento disponível e impede que as estruturas de infecção dos fungos patogênicos alcancem as raízes (LUCON, CHAVES E BACILIERI, 2014).

Além de antagonizar patógenos, *Trichoderma* sp. beneficia diretamente no crescimento vegetativo. Ensaios agronômicos indicam que a aplicação de *Trichoderma* sp. proporciona ganhos na biomassa aérea e na massa seca total de plantas de milho, especialmente em combinação com adubação orgânica adequada (NASCIMENTO et al., 2025). Esse estímulo de crescimento é atribuído à produção de compostos similares a hormônios vegetais (auxinas) pelo fungo, à melhoria das condições do solo e ao incremento na divisão celular nas raízes e colmos, conferindo às plantas maior vigor inicial.

Esse efeito se assemelha ao observado com *Bacillus subtilis*, cujos isolados aumentaram o teor foliar de nitrogênio (N) e fósforo (P) em milho inoculado (ARAÚJO et al., 2012). Assim, seja por solubilizar nutrientes, seja por estimular sinais bioquímicos da planta, microrganismos benéficos como *Trichoderma* sp. ou *Bacillus* ampliam a eficiência das culturas. Na prática, isso permite reduzir aplicações químicas de fertilizantes sem perda de produtividade, um claro benefício agronômico para o manejo sustentável do milho.

Além disso, *Trichoderma* sp. contribui para a tolerância do milho a estresses abióticos. A melhoria geral do vigor vegetal promovida pelo fungo está associada a uma maior resistência a secas, salinidade e déficit nutricional (CARDOSO, 2022).

2.4 Uso das geotecnologias e imageamento multiespectral para o monitoramento de culturas agrícolas

Historicamente, o monitoramento das culturas agrícolas, como por exemplo o milho, é realizado de forma manual por meio de observações visuais e amostragens de campo. Este método, apesar de ser eficaz em pequena escala, é extremamente trabalhoso, demorado e sujeito a erros humanos, o que limita sua aplicabilidade em grandes propriedades agrícolas. Além disso, a coleta de dados pode ser dispendiosa, tanto em termos de tempo quanto de recursos financeiros (KUMAR et al., 2021). Metodologias manuais, desde atividades agrícolas, de preparo do solo, manejo, monitoramento e colheita se tornam onerosas e escassas ao longo do tempo (HASAN et al., 2020).

Ferramentas como imagens obtidas a partir de satélites, sistemas globais de navegação por satélite (GNSS), drones e sensores estão cada vez mais sendo empregados nos sistemas agrícolas visando promover a disponibilização de uma série de dados que possam facilitar a avaliação de culturas agrícolas (NEVAVUORI et al., 2020).

A utilização de tecnologias e técnicas para o monitoramento do crescimento, desenvolvimento e das condições de estresse das culturas agrícolas é cada vez mais comum nas propriedades. Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) equipados com câmeras capazes de capturar imagens multiespectrais para esse tipo de avaliação estão sendo cada vez mais empregados (ANDRADE et al., 2019). Estudos demonstram que essas tecnologias podem reduzir os custos operacionais e aumentar a precisão do monitoramento das culturas, tornando-se indispensáveis para a agricultura moderna (YANG et al., 2021).

Através das câmeras multibandas acopladas aos VANTs, é possível obter índices de vegetação que consistem em combinações matemáticas entre diferentes bandas espectrais. Estes índices fornecem dados para detectar variações na cultura, assim como para avaliar a saúde da vegetação. Isso proporciona informações essenciais para o planejamento e a tomada de decisões quanto à aplicação de insumos e ao manejo em áreas específicas do local de produção (FERNANDES, 2023).

Os índices de vegetação são calculados principalmente por meio de razões, diferenças ou diferenças normalizadas entre os valores de reflectância em bandas espectrais específicas, particularmente aquelas sensíveis às características da vegetação, como o infravermelho próximo (Near Infrared - NIR) e o vermelho (PARIDA et al., 2024).

Atualmente existe uma grande diversidade de índices de vegetação disponíveis para a avaliação de culturas agrícolas, cada um desses índices possui vantagens específicas em termos de sensibilidade à biomassa, clorofila e estrutura da vegetação, permitindo uma análise detalhada do estado da cultura em campo (PETER et al., 2021). Entre os principais índices, destacam-se o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada para a Região do Verde (GNDVI) e o Índice de

Vegetação da Diferença Red-Edge (NDRE), que combinam as bandas do vermelho, verde e Red-Edge com o infravermelho próximo (NIR) para avaliar a saúde da vegetação.

No entanto, é crucial que os índices de vegetação sejam ajustados para cada cultura agrícola específica, considerando as características fisiológicas de crescimento e resposta a fatores ambientais de cada planta. Além disso, a testagem e validação rigorosa dos índices em diferentes condições de campo são essenciais para garantir a precisão e a relevância dos dados coletados. Estudos demonstram que a combinação de diferentes índices e a adaptação às condições específicas de cada cultura podem melhorar significativamente a precisão das estimativas de parâmetros agrícolas, como o índice de área foliar (LAI) e o teor de clorofila (MARCIAL-PABLO et al., 2021).

Um dos índices de vegetação mais utilizados é o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), desenvolvido por ROUSE et al. (1973). Ele é obtido através das bandas NIR e RED, variando de -1 a 1. Valores próximos a -1 indicam corpos d'água e áreas não vegetadas, enquanto valores próximos a 1 denotam atividade fotossintética, vigor e sanidade da vegetação. Este índice possui alta correlação com dados de área foliar, vigor vegetal, crescimento, saúde e deficiência de nitrogênio (FERNANDES, 2016; FERNANDES, 2023).

Outro índice bastante utilizado para o monitoramento agrícola é o GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index). Este é obtido através das bandas GREEN e NIR, variando de -1 a 1. Valores próximos a -1 indicam corpos d'água, valores próximos a 0 denotam áreas não vegetadas e valores próximos a 1 sinalizam vegetação com bons índices de biomassa, sem estresse e com boa sanidade (MELLO et al, 2019). Além dos índices de vegetação, a utilização de espectrorradiômetros para obter a resposta da superfície da vegetação, fornecendo a assinatura da cultura, é uma prática inovadora. Esses equipamentos permitem a calibração e a obtenção de respostas pelo sensor (FELIPE, 2011). A obtenção da assinatura espectral da planta possibilita a calibração de índices com o objetivo de determinar valores que se relacionam com as condições fisiológicas da planta, tais como deficiência, estresse, saúde e outras características. Esses aspectos podem ser identificados com base em cada índice avaliado.

O NDRE (Normalized Difference Red Edge) é outro índice similar ao NDVI, mas que emprega a banda *red-edge*, imediatamente acima da banda vermelha, no lugar da banda vermelha tradicional. A fórmula básica é $NDRE = (NIR - Red-Edge)/(NIR + Red-Edge)$. A região de Red-Edge é absorvida moderadamente pela clorofila, penetrando mais profundamente no dossel, o que torna o NDRE menos propenso à saturação em altas biomassa (MACEDO et al., 2023).

Como consequência, o NDRE correlaciona fortemente com parâmetros ligados à clorofila e à biomassa ativa. Esse índice é aplicado na agricultura de precisão para avaliar o teor de clorofila e estresse nutricional, sobretudo em fases intermediárias (OLIVEIRA, 2017).

Com base na abordagem apresentada, observa-se que a utilização de microrganismos, como o *Trichoderma sp.*, configura-se como uma alternativa promissora para o aprimoramento das características produtivas da cultura do milho. Além disso, o emprego de geotecnologias, como veículos aéreos não tripulados (VANTs) e câmaras multiespectrais, potencializa a obtenção de dados de maneira eficaz e ágil para o monitoramento da cultura em campo. No entanto, a integração dessas tecnologias, bem como a validação de suas aplicações no manejo da cultura do milho, ainda requerem investigações adicionais.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R.; HOTT, M.; MAGALHÃES, W.; D'OLIVEIRA, P.; OLIVEIRA, J.. Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) no monitoramento dos estádios de desenvolvimento da cultura do milho. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 225–234, 2019. doi:10.22533/at.ed.00619240721. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1119153>. Acesso em: 04 jun. 2025.

ANTOLIN, L. A. S.; SILVA, E. H. F. M.; ZANON, A J; RIBEIRO, B. S. M. R; MARIN, F. R.. How much would irrigation increase maize production in Brazil? **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 82, e20240083, 2025. doi:10.1590/1678-992x-2024-0083. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2024-0083>. Acesso em: 04 jun. 2025.

ARAÚJO, F. F.; SOUZA, E. C.; GUERREIRO, R. T.; GUABERTO, L. M.; ARAÚJO, A. S. F. Diversity and growth-promoting activities of *Bacillus sp.* in maize. **Revista Caatinga**, Mossoró,

RN, v. 25, n. 1, p. 1-7, jan./mar. 2012. Disponível em:

<https://www.redalyc.org/pdf/2371/237123860001.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

BARBOSA, J. Z.; ROBERTO, L. A.; HUNGRIA, M.; CORRÊA, R. S.; MAGRI, E.; CORREIA, T. D.. Meta-analysis of maize responses to *Azospirillum brasilense* inoculation in Brazil: Benefits and lessons to improve inoculation efficiency. **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104276, fev. 2022. doi:10.1016/j.apsoil.2021.104276. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104276>. Acesso em: 05 jun. 2025.

BARROS, J. F. C.; CALADO, J. G. **A cultura do milho**. Évora: Departamento de Fitotecnia da Universidade de Évora; FIT – Publicações de Carácter Pedagógico, 2014. 52 p.

Disponível em: <http://hdl.handle.net/10174/10804> . Acesso em: 04 jun. 2025.

BEHERA, A.; GORAI, S.; SINGH, R. K.; ASHRUTHA, M. A. Response of different endophytic bacterial strain on seedling growth and their co-inoculation on growth and development of maize plant (*Zea mays* L.) under laboratory condition and polyhouse condition. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 9, n. 10, p. 2859–2866, out. 2020.

doi:10.20546/ijcmas.2020.910.344. Disponível em: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.910.344>.

Acesso em: 17 jun. 2024

BERNHARD, B. J.; BELOW, F. E. Plant population and row spacing effects on corn:

phenotypic traits of positive yield-responsive hybrids. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.

112, n. 3, p. 1589–1600, abr. 2020. doi:10.1002/agj2.20206. Disponível em:

<https://doi.org/10.1002/agj2.20206>. Acesso em: 04 jun. 2025

BEYER, M.; IRAHETA, A.; GERCHOW, M.; KUEHNHAMMER, K.; CALLAU-BEYER, A. C.;

KOENIGER, P.; DUBBERT, D.; DUBBERT, M.; SÁNCHEZ-MURILLO, R.; BIRKEL, C. UAV-based land surface temperatures and vegetation indices explain and predict spatial patterns of soil water isotopes in a tropical dry forest. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 61, n. 2,

e2024WR037294, fev. 2025. doi:10.1029/2024WR037294. Disponível em:

<https://doi.org/10.1029/2024WR037294>. Acesso em: 04 jun. 2025.

BRITO, W. R. A.. **Qualidade de grãos de milho acondicionados em diferentes embalagens**.

2020. 40 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Petrolina Zona Rural,

Petrolina, PE, 2020. Disponível em: <https://releia.ifsertao-pe.edu.br/jspui/handle/123456789/802>.

Acesso em: 04 jun. 2025.

CABRAL, M. J. Organic fertilization strategies and use of *Trichoderma* in the agronomic performance of green maize. **Brazilian Journal of Biology**, v. 85, e287513, 2025.

doi:10.1590/1519-6984.287513. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.287513>.

Acesso em: 05 jun. 2025.

CARDOSO, F. M.. **Trichoderma e Bacillus no controle de patógenos de sementes, na germinação e crescimento de plântulas de milho doce**. 2022. 67 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2022. Disponível em: <https://repositorio.uel.br/srv-c0003-s01/api/core/bitstreams/df0ececfc4d9c4288a574ace40770e5ff/content>. Acesso em: 04 jun. 2025.

CARLOS, M. C.; VIVAS, M.; COSTA, A. C.; VASCONCELOS, L. C.; LIMA, W. L.; ALMEIDA, R. N.; VALADARES, F. V.. Resistance to multiple leaf diseases in popcorn lines with potential for baby corn production. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 44, e55857, jun. 2022.

doi:10.4025/actasciagron.v44i1.55857. Disponível em:

<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.55857>. Acesso em: 16 jun. 2025

CASELA, C. R.. *Manejo de doenças na cultura do milho*. Brasília, DF: **Embrapa**, 2006.

Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/485061/1/Manejodoencas.pdf>. Acesso em: 04 out. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Produção de milho no Brasil: safra 2023/24**. Brasília, DF: Conab, 2024. 9 p. Disponível em:

<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/milho-e-sorgo/2024/48a-ro/producao-de-milho-no-brasil.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safra de grãos está estimada em 332,9 milhões de toneladas influenciada por boa produção de soja, milho e arroz**. Brasília, DF: Conab, 15 de maio de 2025. Disponível em:

<https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-de-graos-esta-estimada-em-332-9-milhoes-de-toneladas-influenciada-por-boa-producao-de-soja-milho-e-arroz>. Acesso em: 04 jun. 2025.

COTA, L. V.; COSTA, R. V. da; SABATO, E. de O.; SILVA, D. D. da. **Histórico e perspectivas das doenças na cultura do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 7 p.

(Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 193). Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/975363/1/circ193.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

CRUZ, J. C.; CAMPANHA, M. M.; COELHO, A. M.; KARAM, D.; PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, I.; GARCIA, J. C.; PIMENTEL, M. A. G.; GONTIJO NETO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. E. P. de; COSTA, R. V. da; ALVARENGA, R. C.; QUEIROZ, V. A. V. **Boas práticas agrícolas: milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. Documentos, n. 119. 45 p. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/908225>. Acesso em: 04 jun. 2025.

ERENSTEIN, O.; JALETA, M.; SONDER, K.; MOTTALÉB, K.; PRASANNA, B. M. Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. **Food Security**, v. 14, n. 5, p. 1295–1319, out. 2022. doi:10.1007/s12571-022-01288-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7> . Acesso em: 14 jul. 2025.

FELIPE, J. P. M.. **Espectrorradiometria em cultivo da soja *Glycine max (L.) Merr.* durante ciclo vegetativo**. 2011. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/9589/FELIPE%2C%20JOAO%20PAULO%20DE%20MELLO.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 jun. 2025.

FERNANDES, F. T.; OLIVEIRA, E. **Principais doenças na cultura do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. (Circular técnica, v. 26). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/861158/1/circ26.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

FERNANDES, P.. **Estimativa da produtividade de milho (*Zea mays L.*) através de imagens multiespectrais obtidas por veículo aéreo não tripulado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016. 79 p. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/4842/FERNANDES%2c%20PABLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 04 jun. 2025.

FERNANDES, S.. **Índices de vegetação para diagnóstico nutricional de nitrogênio na cultura do milho a partir de imagens geradas por drone**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2023. 47 p. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/31177/1/indicesdevegetacaodiagnosticonutricional.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

GETAHUN, S.; KEFALE, H.; GELAYE, Y.. Application of precision agriculture technologies for sustainable crop production and environmental sustainability: a systematic review. **The Scientific World Journal**, v. 2024, Article ID 2126734, 2024. doi:10.1155/2024/2126734. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2024/2126734>. Acesso em: 04 jun. 2025.

GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F.; MELO, R. F.. **Sistema solo na perspectiva da contaminação**. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 2010. Cap. 2, p. 31–53. ISBN 978-85-7405-014-0. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/875487>. Acesso em: 04 jun. 2025.

GUEBSI, R.; MAMI, S.; CHOKMANI, K.. Drones in precision agriculture: a comprehensive review of applications, technologies, and challenges. **Drones**, v. 8, n. 11, p. 686, nov. 2024. doi:10.3390/drones8110686. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones8110686>. Acesso em: 04 jun. 2025.

HASAN, K.; TANAKA, T. S. T.; ALAM, M.; ALI, R.; SAHA, C. K.. Impact of modern rice harvesting practices over traditional ones. **Reviews in Agricultural Science**, v. 8, p. 89–108, 2020. doi:10.7831/ras.8.0_89. Disponível em: https://doi.org/10.7831/ras.8.0_89. Acesso em: 04 jun. 2025.

HERRERA, D. M.; PEIXOTO, W. M.; ABREU, J. G.; REIS, R. H. P.; SOUSA, F. G.; BALBINOT, E.; KLEIN, V. A. C.; COSTA, R. P.. Is the integration between corn and grass under different sowing modalities a viable alternative for silage? **Animals**, v. 13, n. 3, p. 425, 26 jan. 2023. doi:10.3390/ani13030425. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ani13030425>. Acesso em: 15 jun. 2024.

KUMAR, A.; DESAI, S. V.; BALASUBRAMANIAN, V. N.; RAJALAKSHMI, P.; GUO, W.; BALAJI NAIK, B.; BALRAM, M.; DESAI, U. B. Efficient maize tassel-detection method using UAV based remote sensing. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 23, p. 100549, ago. 2021. doi:10.1016/j.rsase.2021.100549. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100549>. Acesso em: 04 jun. 2025.

LI, N.; ALFIKY, A.; WANG, W.; ISLAM, M.; NOUROLLAHI KHOSHNOOD; LIU, X.; KANG, S.. Volatile compound-mediated recognition and inhibition between *Trichoderma* biocontrol agents and *Fusarium oxysporum*. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, p. 1–15, out. 2018. doi:10.3389/fmicb.2018.02614. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02614>. Acesso em: 04 jun. 2025.

LIU, Y.; HE, P.; HE, P.; MUNIR, S.; AHMED, A.; WU, Y.; YANG, Y.; LU, J.; WANG, J.; YANG, J.; PAN, X.; TIAN, Y.; HE, Y.. Potential biocontrol efficiency of *Trichoderma* species against oomycete pathogens. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, e974024, 19 out. 2022. doi:10.3389/fmicb.2022.974024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.974024>. Acesso em: 04 jun. 2025

LUCON, C. M. M.; CHAVES, A. L. R.; BACILIERI, S.. **Trichoderma: o que é, para que serve e como usar corretamente na lavoura**. 1. ed. São Paulo, SP: Instituto Biológico, 2014. 28 p. ISBN 978-85-88694-12-5. Disponível em: <https://biologico.agricultura.spp.gov.br/uploads/files/pdf/cartilhas/trichoderma.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

MACEDO, F. L.; NÓBREGA, H.; FREITAS, J. G. R.; RAGONEZI, C.; PINTO, L.; ROSA, J.; PINHEIRO C., M. A. A. Estimation of productivity and above-ground biomass for corn (*Zea mays*) via vegetation indices in Madeira Island. **Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 1115, mai. 2023. doi:10.3390/agriculture13061115. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture13061115>. Acesso em: 05 jun. 2025.

MARCIAL-PABLO, M. J.; ONTIVEROS-CAPURATA, R. E.; JIMÉNEZ-JIMÉNEZ, S. I.; OJEDA-BUSTAMANTE, W.. Maize crop coefficient estimation based on spectral vegetation indices and vegetation cover fraction derived from UAV-based multispectral images. **Agronomy**, v. 11, n. 4, p. 668, abr. 2021. doi:10.3390/agronomy11040668. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040668>. Acesso em: 04 jun. 2025.

MENEGALDO, J. G. **A importância do milho na vida das pessoas**. [S.l.]: Agrosoft Brasil, 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/888767>. Acesso em: 03 jun. 2025.

MENEGALDO, J.. A importância do milho na vida das pessoas. **Revista Cultivar**, [S.l.], 2015. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/a-importancia-do-milho-na-vida-das-pessoas>. Acesso em: 17 jun. 2025.

MUIS, A.; NONCI, N.; EFENDY, R.; AZRAI, M.. The response of some genotypes of maize to downy mildew, maydis leaf blight, leaf rust, and stalk rot. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1107, n. 1, p. 012004, dez. 2022. doi:10.1088/1755-1315/1107/1/012004. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1107/1/012004>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MELLO, D. C.; MEDEIROS N., L. G.; LANA, M. G.; FIORINO, P.. Uso e ocupação do solo: comparação de índices NDVI e GNDVI e inferências sobre biomassa de dossel vegetal. **Cadernos de Agroecologia**, Viçosa, MG, v. 15, n. 1 (edição especial do V Simpósio Mineiro de Ciência do Solo), 2019. Disponível em: <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/6282/2377>. Acesso em: 04 jun. 2025.

MIRANDA, R. A.; DUARTE, J. O.; GARCIA, J. C.; DURÃES, F. O. M.. **Sustentabilidade da cadeia produtiva do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 27 p. (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277; 261). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1132079/1/Doc-261.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

NASCIMENTO, L. S.; SILVA, F. D. B.; NOGUEIRA, R. S.; NA CIA, S.; SOUSA, H. M. A.; SOUSA, G. G.; SOUSA, H. C.; MORAES, J. G. L.; RIBEIRO, J. F.; GOES, G. F.; LOPES, D. J. G.; NEVAVUORI, Petteri; NARRA, Nathaniel; LINNA, Petri; LIPPING, Tarmo. Crop yield prediction using multitemporal UAV data and spatio-temporal deep learning models. **Remote Sensing**, v. 12, n. 23, p. 4000, dez. 2020. doi:10.3390/rs12234000. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12234000>. Acesso em: 17 jun. 2025.

NICHOLSON, W. L.; MUNAKATA, N.; HORNECK, G.; MELOSH, H. J.; SETLOW, P..

Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, Washington, DC, v. 64, n. 3, p. 548–572, set. 2000. doi:10.1128/MMBR.64.3.548-572.2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/MMBR.64.3.548-572.2000>. Acesso em: 04 jun. 2025

OLIVEIRA, M. F.. **Modelos de predição de produtividade da cultura do milho por meio de NDVI em arranjos espaciais**. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Estadual Paulista, [S.l.], 2017. 44 f. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/4fc1f037-86e8-4e5a-8faa-414392120cc5/content>. Acesso em: 04 jun. 2025.

PARIDA, P. K.; SOMASUNDARAM, E.; KRISHNAN, R.; RADHAMANI, S.; SIVAKUMAR, U.; PARAMESWARI, E.; RAJA, R.; SHRI RANGASAMI, S. R.; SANGEETHA, S. P.; GANGAI SELVI, R.. Unmanned aerial vehicle-measured multispectral vegetation indices for predicting LAI, SPAD chlorophyll, and yield of maize. **Agriculture**, v. 14, n. 7, p. 1110, jul. 2024. doi:10.3390/agriculture14071110. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071110>. Acesso em: 04 jun. 2025

PATEL, R.; MEMON, J.; KUMAR, S.; PATEL, D. A.; SAKURE, A. A.; PATEL, M. B.; DAS, A.; KARJAGI, C. G.; PATEL, S.; PATEL, U.; ROYCHOWDHURY, R.. Genetic diversity and population structure of maize (*Zea mays* L.) inbred lines in association with phenotypic and grain qualitative traits using SSR genotyping. **Plants**, v. 13, n. 6, p. 823, 13 mar. 2024. doi:10.3390/plants13060823. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13060823>. Acesso em: 04 jun. 2025.

PETER, B. G.; MESSINA, J. P.; CARROLL, J. W.; CHIKOWO, R.. A case for green-based vegetation indices: plot-scale sUAS imagery related to crop chlorophyll content on smallholder maize farms in Malawi. **Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 8, p. 778–787, ago. 2021. doi:10.1080/2150704x.2021.1938733. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/2150704x.2021.1938733>. Acesso em: 04 jun. 2025.

PIONEER SEMENTES. **Milho Verão/Safrinha P3858PWU**. São Paulo, SP: Pioneer Sementes, 2020. 1 p. Disponível em: https://www.pioneer.com/content/dam/dpagco/pioneer/la/br/pt/files/Milho_Verao-Safrinha-P3858PWU-08.pdf. Acesso em: 04 jun. 2025.

REHMAN, T. H.; LUNDY, M. E.; LINQUIST, B. A. Comparative sensitivity of vegetation indices measured via proximal and aerial sensors for assessing N status and predicting grain yield in rice cropping systems. **Remote Sensing**, v. 14, n. 12, p. 2770, 9 jun. 2022. doi:10.3390/rs14122770. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14122770>. Acesso em: 04 jun. 2025.

RIBAS, J. A.. **Efeito da aplicação foliar de fontes de magnésio no desempenho produtivo do milho híbrido P3707VYH**. Porto Velho, RO: Universidade Federal de Rondônia, 2024. Disponível em: <http://dspace.unirb.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/579>. Acesso em: 04 jun. 2025.

SAHOO, S. C.; MOHANTY, M. Performance of Sweet Corn under Different Fertility Levels – A Review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 9, n. 6, p. 3325–3331, 10 jun. 2020. doi:10.20546/ijcmas.2020.906.395. Disponível em: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.906.395>. Acesso em: 17 jun. 2024.

SILVA JÚNIOR, U. J. da; GONÇALVES, R. M.; OLIVEIRA, L. M. M.; SILVA JÚNIOR, J. A. Sensibilidade espectral dos índices de vegetação: GNDVI, NDVI e EVI na mata ciliar do reservatório de Serrinha II – PE, Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 1, p. 17–35, fev. 2021. doi:10.14393/rbcv73n1-55252. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv73n1-55252>. Acesso em: 04 jun. 2025.

SOUSA, V. F.; ZONTA, J. B.. **Cultivo do milho-verde irrigado na Baixada Maranhense**. São Luís, MA: Embrapa Cocais; Teresina, PI: Embrapa Meio-Norte, 2020. 140 p. (Embrapa Cocais. Documentos, 6; Embrapa Meio-Norte. Documentos, 264). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1132153>. Acesso em: 04 jun. 2025.

STATISTA. **Grain production worldwide by type 2023/24**. [s.l.], 2023. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

SYNGENTA. **Semente de milho Feroz Viptera 3**. São Paulo, SP: Syngenta, [2025]. Disponível em: <https://portal.syngenta.com.br/sementes/nk-milho/feroz-viptera-3>. Acesso em: 04 jun. 2025.

TIAN, Y.; TAN, Y.; YAN, Z.; LIAO, Y.; CHEN, J.; BOEVRE, M.; DE SAEGER, S.; WU, A.. Antagonistic and detoxification potentials of *Trichoderma* isolates for control of zearalenone (ZEN) producing *Fusarium graminearum*. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, Article 2710, 18 jan. 2018. doi:10.3389/fmicb.2017.02710. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02710>. Acesso em: 04 jun. 2025

TYŚKIEWICZ, R.; NOWAK, A.; OZIMEK, E.; JAROSZUK-ŚCISEŁ, J.. *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**, v. 23, n. 4, p. 2329, fev. 2022.

doi:10.3390/ijms23042329. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms23042329>. Acesso em: 04 jun. 2025.

YAO, X.; GUO, H.; ZHANG, K.; ZHAO, M.; RUAN, J.; CHEN, J.. Trichoderma and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, Article 1160551, 3 mai. 2023. doi:10.3389/fmicb.2023.1160551. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551>. Acesso em: 04 jun. 2025.

YASSITEPE, J. E. C. T.; HEINZEN S., V. C.; HERNANDES-LOPES, J.; DANTE, R. A.; GERHARDT, I. R.; FERNANDES, F. R.; SILVA, P. A. S.; VIEIRA, L. R.; BONATTI, V.; ARRUDA, P.. Maize transformation: from plant material to the release of genetically modified and edited varieties. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, Article 766702, out. 2021. doi:10.3389/fpls.2021.766702. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.766702>. Acesso em: 05 jun. 2025

YU, X.; SUN, Y.; LIN, C.; WANG, P.; SHEN, Z.; ZHAO, Y.. Development of transgenic maize tolerant to both glyphosate and glufosinate. **Agronomy**, v. 13, n. 1, p. 226, 11 jan. 2023. doi:10.3390/agronomy13010226. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010226>. Acesso em: 05 jun. 2025.

ZHANG, D.; QI, H.; GUO, X.; SUN, H.; MIN, J.; LI, Si; HOU, L.; LV, Liangjie. Integration of UAV Multispectral Remote Sensing and Random Forest for Full-Growth Stage Monitoring of Wheat Dynamics. **Agriculture**, v. 15, n. 3, p. 353, fev. 2025. doi:10.3390/agriculture15030353. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15030353>. Acesso em: 04 jun. 2025.

ZHANG, S.; GAN, Y.; LIU, J.; ZHOU, J.; XU, B.. Optimization of the fermentation media and parameters for the bio-control potential of *Trichoderma longibrachiatum* T6 against nematodes. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, Article 574601, 30 set. 2020. doi:10.3389/fmicb.2020.574601. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.574601>. Acesso em: 04 jun. 2025.

CAPÍTULO 1

**AVALIAÇÃO DA RESPOSTA ESPECTRAL DE HÍBRIDOS DE MILHO
SUBMETIDOS À APLICAÇÃO DE *Trichoderma* sp. MONITORADA POR
VANT MULTIESPECTRAL**

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA CULTURA DO MILHO INOCULADO COM *Trichoderma sp.* POR MEIO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS

RESUMO

A busca por práticas agrícolas sustentáveis que otimizem a produtividade e a resiliência das culturas tem impulsionado a adoção de bioinsumos e tecnologias de monitoramento avançadas. Este estudo teve como objetivo avaliar a resposta espectral de dois híbridos de milho (Feroz VIP3® e Pioneer P3858PWU®) à aplicação do fungo bioestimulante *Trichoderma sp.*, utilizando imagens multiespectrais obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). O experimento foi conduzido na fazenda experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), em Cruz das Almas, Bahia, sob um delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 2, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em dois híbridos de milho (Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU) com e sem a aplicação de *Trichoderma sp.*, com quatro repetições para cada tratamento. As imagens foram captadas semanalmente por um VANT DJI Phantom P4 Multiespectral totalizando 14 voos, do estágio V2 até a fase de senescência da cultura. Os índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI), verde (GNDVI) e de borda vermelha (NDRE) foram analisados para quantificar as possíveis mudanças fisiológicas induzidas pelo fungo, procedeu-se com a determinação da variação quadrática média e estatística descritiva. A aplicação de *Trichoderma sp.* promoveu respostas espectrais distintas e genótipo-dependentes. Uma vez que, para o híbrido Feroz, a aplicação do bioinsumo resultou em valores médios de NDVI e GNDVI marginalmente inferiores (redução de 1,53% no NDVI) em comparação ao tratamento controle, enquanto o NDRE apresentou um discreto aumento (0,05%). Em contraste, o híbrido Pioneer demonstrou uma resposta consistentemente positiva, com os tratamentos com *Trichoderma sp.* exibindo valores médios superiores para todos os índices avaliados: NDVI (aumento de 2,17%), GNDVI (aumento de 1,79%) e NDRE (aumento de 0,01%) em relação ao controle. Essa superioridade no híbrido Pioneer foi particularmente evidente durante os estágios de pico de crescimento vegetativo. A análise do NDRE, que se mostrou consistentemente mais elevado, ainda que de forma sutil, em ambos os híbridos tratados, reforça sua maior sensibilidade a variações em dosséis densos. Conclui-se que a resposta espectral do milho à aplicação de *Trichoderma sp.* é influenciada pela genética do híbrido, com o Pioneer P3858PWU® mostrando uma interação mais sinérgica com o bioestimulante. O monitoramento multiespectral é uma ferramenta eficaz para detectar variações fisiológicas sutis, evidenciando o potencial da integração entre sensoriamento remoto e o uso de bioinsumos no manejo de precisão da cultura do milho.

Palavras-chaves: Bioestimulante, GNDVI, NDVI, NDRE, Imageamento Multiespectral

EVALUATION OF THE DYNAMICS OF VEGETATION INDICES IN MAIZE CROP INOCULATED WITH *Trichoderma* sp. USING MULTISPECTRAL IMAGERY

ABSTRACT

The search for sustainable agricultural practices that optimize crop productivity and resilience has driven the adoption of bio-inputs and advanced monitoring technologies. This study aimed to evaluate the spectral response of two maize hybrids (Feroz VIP3® and Pioneer P3858PWU®) to the application of the biostimulant fungus *Trichoderma* sp., using multispectral images obtained by an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The experiment was conducted at the experimental farm of the Federal University of Recôncavo da Bahia (UFRB), in Cruz das Almas, Bahia, under a randomized block design in a 2 x 2 factorial scheme, with four repetitions. The treatments consisted of two maize hybrids (Feroz VIP3 and Pioneer P3858PWU) with and without the application of *Trichoderma* sp., with four repetitions for each treatment. The images were captured weekly by a DJI Phantom P4 Multispectral UAV, totaling 14 flights, from the V2 stage to the crop senescence phase. The normalized difference (NDVI), green (GNDVI), and red edge (NDRE) vegetation indices were analyzed to quantify the possible physiological changes induced by the fungus; the determination of the mean quadratic variation and descriptive statistics were performed. The application of *Trichoderma* sp. promoted distinct and genotype-dependent spectral responses. For the Feroz hybrid, the application of the bio-input resulted in marginally lower average NDVI and GNDVI values (a 1.53% reduction in NDVI) compared to the control treatment, while the NDRE showed a discrete increase (0.05%). In contrast, the Pioneer hybrid demonstrated a consistently positive response, with the *Trichoderma* sp. treatments exhibiting higher average values for all evaluated indices: NDVI (a 2.17% increase), GNDVI (a 1.79% increase), and NDRE (a 0.01% increase) compared to the control. This superiority in the Pioneer hybrid was particularly evident during the peak vegetative growth stages. The analysis of the NDRE, which was consistently higher, albeit subtly, in both treated hybrids, reinforces its greater sensitivity to variations in dense canopies. It is concluded that the spectral response of maize to the application of *Trichoderma* sp. is influenced by the hybrid's genetics, with Pioneer P3858PWU® showing a more synergistic interaction with the biostimulant. Multispectral monitoring is an effective tool for detecting subtle physiological variations, evidencing the potential of integrating remote sensing and the use of bio-inputs in the precision management of maize crops.

Keywords: Biostimulant, GNDVI, NDVI, NDRE, Multispectral Imaging.

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L. - Poaceae) é uma das principais culturas alimentares globais, com uma produção mundial que superou 1,1 bilhão de toneladas em 2023, sendo os Estados Unidos, China, Brasil, Argentina e México os maiores produtores (EICHOLZ, et al, 2023; AMINDA, DHAMIRA e SARI, 2025). No Brasil, a cultura assume uma posição econômica de destaque, com projeção de 126,9 milhões de toneladas para a safra 2024/2025, evidenciando seu expressivo potencial de expansão e contribuição para o mercado interno e balança comercial (CONAB, 2025; ANTOLIN et al., 2025). Na região Nordeste, a safra 2023/2024 registrou 9,7 milhões de toneladas, com destaque para Bahia, Maranhão e Piauí (CONAB, 2024).

Apesar de sua relevância, a cultura do milho enfrenta desafios significativos, especialmente relacionados a fatores abióticos como déficit hídrico e altas temperaturas, que comprometem o crescimento e o rendimento da planta (KIM e LEE, 2023). Tais estresses fisiológicos impactam negativamente a fotossíntese, a área foliar e a eficiência do uso da água (CHÁVEZ-ARIAS et al., 2021). Adicionalmente, sob as condições tropicais brasileiras, a incidência de pragas e doenças representa um grave problema para a lavoura, agravado pela expansão das áreas de cultivo, manejo inadequado, suscetibilidade de cultivares e diversidade de safras e condições climáticas regionais (CASELA, 2006; COTA et al, 2013). A complexidade do manejo é intensificada por essas pressões bióticas e abióticas, somadas a potenciais deficiências nutricionais e limitações edafoclimáticas.

Nesse contexto, métodos modernos de monitoramento de lavouras têm se destacado como ferramentas promissoras. O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) equipados com sensores multiespectrais permite a coleta rápida e não destrutiva de informações relacionadas à vegetação em escala de campo (ZHANG et al., 2025). Essa aplicação proporciona a obtenção de informações essenciais para o planejamento e a tomada de decisões quanto à aplicação de insumos e ao manejo em áreas específicas do local de produção (FERNANDES, 2023). Além disso, os índices multiespectrais podem ser correlacionadas com parâmetros agrônômicos do milho, integrando índices,

como NDVI e NDRE, com variáveis da cultura em campo, como biomassa, massa seca e produtividade (MA et al., 2023).

Os índices espectrais combinam bandas do infravermelho próximo (NIR) e do visível para caracterizar a vegetação. O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é o índice mais tradicional, definido por $(\text{NIR} - \text{vermelho}) / (\text{NIR} + \text{vermelho})$, que varia de -1 a +1 e se correlaciona fortemente com cobertura e vigor vegetativo (ZHANG et al., 2025).

O GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) é obtido através das bandas GREEN e NIR, variando de -1 a 1. Valores próximos a -1 indicam corpos d'água, valores próximos a 0 denotam áreas não vegetadas e valores próximos a 1 sinalizam vegetação com bons índices de biomassa, sem estresse e com boa sanidade (MELLO et al., 2019; SILVA et al., 2021).

O NDRE (Índice de Diferença Normalizada de Borda Vermelha) é calculado pela razão $(\text{NIR} - \text{RE}) / (\text{NIR} + \text{RE})$, em que RE corresponde à reflectância na banda red-edge. Por utilizar o red-edge em vez do vermelho convencional, o NDRE apresenta menor saturação em dosséis de alta biomassa, mantendo sensibilidade a variações de clorofila e nitrogênio foliar em estádios avançados da planta (REHMAN, LUNDY e LINQUIST, 2022).

Tais índices têm se mostrado eficazes para avaliar o estado nutricional das culturas e variações sutis, fornecendo base científica para avaliar o vigor e antecipar deficiências antes que se comprometam a produtividade. Diante deste cenário, surge a necessidade de avaliar como práticas de manejo a utilização de biológicos, como a aplicação de *Trichoderma* sp., influenciam as características espectrais da cultura. O gênero *Trichoderma* sp. é amplamente usado no controle biológico de doenças do solo e também atua como bioestimulante, promovendo crescimento vegetal e eficiência no uso de nutrientes (YAO et al., 2023).

No entanto, há escassez de estudos que integrem a aplicação de *Trichoderma* sp. com monitoramento remoto em áreas produtivas. Desta forma, o objetivo do trabalho é avaliar a resposta espectral de dois híbridos de milho (Feroz VIP3® e Pioneer P3858PWU®) à aplicação do fungo bioestimulante *Trichoderma* sp., utilizando imagens multiespectrais obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Utilizando para isso respostas dos índices NDVI, GNDVI

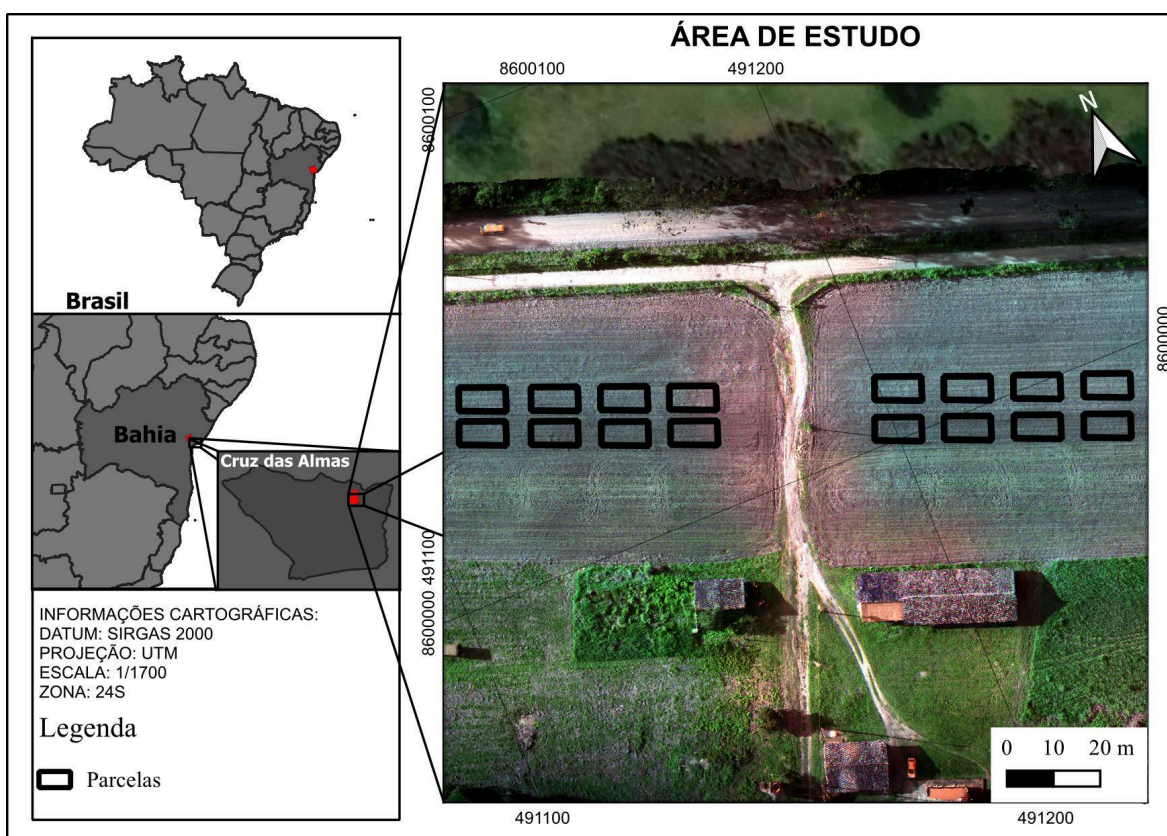
e NDRE para avaliar as respostas entre os tratamentos ao longo do seu desenvolvimento, de modo a quantificar possíveis diferenças fisiológicas induzidas pelo fungo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O experimento foi realizado na fazenda experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), localizada no campus de Cruz das Almas - BA, Figura 1.

Figura 1. Delimitação da área de estudo, Cruz das Almas-BA.

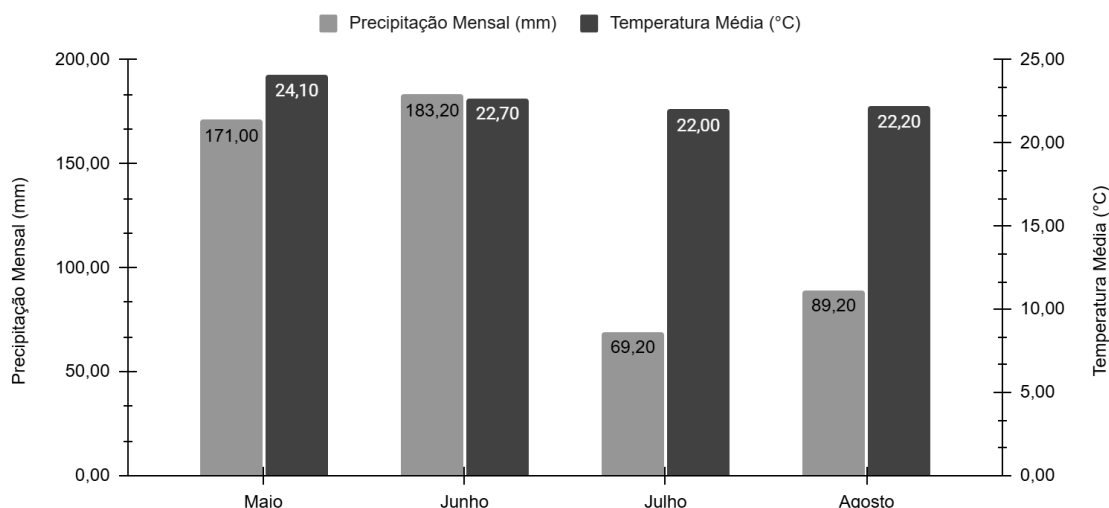


Fonte: Arquivo Pessoal

De acordo com dados coletados pela estação meteorológica automática A406 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no município de Cruz das Almas, Bahia (latitude $-12,675556^\circ$, longitude $-39,089444^\circ$). O período de maio a agosto de 2024 registrou uma precipitação acumulada de 512,60 mm

e uma temperatura média de 22,75 °C, Figura 2.

Figura 2. Precipitação pluviométrica e temperatura média para o período de maio a agosto de 2024 para o município de Cruz das Almas.



Fonte: INMET, 2024

Além disso, a área apresenta uma elevação média ao nível do mar de 200 metros e possui um clima Aw a Am, tropical quente e úmido de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2014).

2.2 Implantação da cultura

A implantação da cultura ocorreu em uma área de 1,78 hectares (17.800 m²), classificada fisicamente como Franco argilo arenoso. O preparo do solo seguiu o método convencional, compreendendo uma aração e duas gradagens.

Em 24 de maio de 2024, a adubação de base foi realizada concomitantemente ao plantio, empregando-se uma plantadora adubadora. A dosagem aplicada, com base na análise química do solo, Tabela 1, foi de 200,00 kg.ha⁻¹ de cloreto de potássio 60% de K₂O e 420,00 kg.ha⁻¹ de Super Simples 19% de P₂O₅. Posteriormente, a adubação de cobertura foi efetuada no estágio fenológico V2 da cultura, utilizando 100 kg.ha⁻¹ de ureia 46% de N.

Tabela 1. Resultado da análise química do solo utilizado antes da instalação do experimento

Profundidade (cm)	pH	P	K	Ca	Mg	Ca+Mg	Al	Na	H+AL	SB	CTC	V	MO
	H ₂ O	mg dm ⁻³					cmol/dm ³					%	g/kg
0 - 20	5,8	10	0,09	2,35	0,50	2,85	0,00	0,02	1,42	2,96	4,38	68,00	19,60
20 - 40	5,6	7	0,10	2,39	0,50	2,89	0,00	0,02	1,77	3,01	4,78	63,00	18,00

Fonte: EMBRAPA, 2024

Na área experimental foi implantado dois híbridos comerciais de milho: Feroz VIP3® (Syngenta/NK Seeds®) e Pioneer P3858PWU® (Corteva/Pioneer®), em densidade de 75.000 plantas ha⁻¹, espaçamento entre linhas de 0,6 m e espaçamento entre plantas de 0,22 cm.

Para o controle de plantas daninhas, foram aplicados herbicidas aos 35 dias após a semeadura. Utilizou-se o herbicida Roundup Original® Mais (glifosato) na dose de 1,5 L ha⁻¹, e o herbicida Calaris® (mesotriona e atrazina) na dose de 1,0 L ha⁻¹.

2.3 Aplicação do *Trichoderma* sp. e delineamento experimental

Para avaliar o efeito do fungo *Trichoderma* sp. sobre a resposta espectral dos híbridos, adotou-se o seguinte delineamento experimental: blocos casualizados em esquema fatorial 2 × 2, com quatro repetições. Os fatores foram: 1 - Híbrido, sendo o Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU e 2 - Tratamento biológico, sendo com aplicação de *Trichoderma* sp. e sem aplicação.

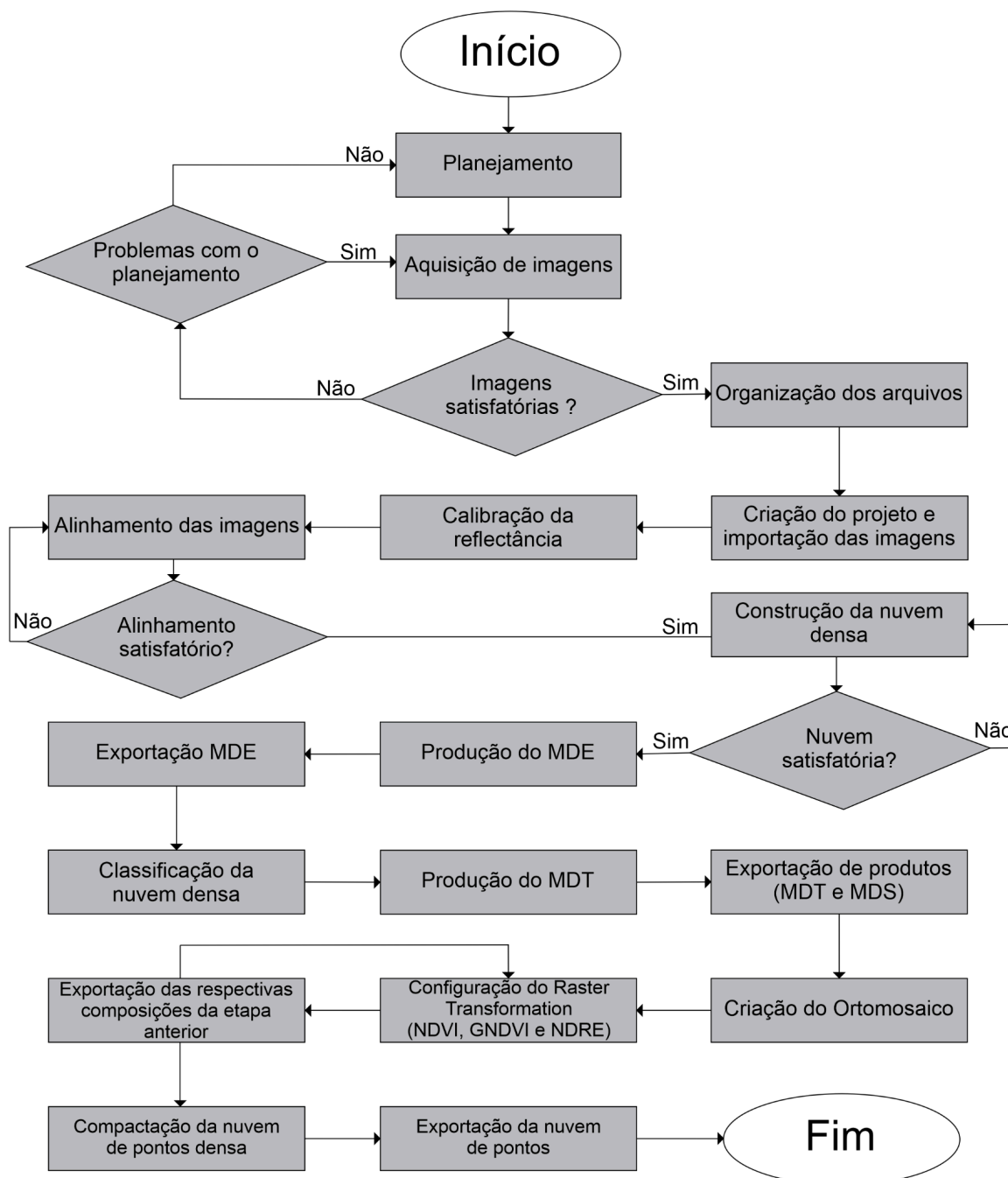
Cada parcela experimental apresentou as seguintes dimensões 5 m × 10 m (50 m²) contendo 8 linhas com plantas em toda a extensão da linha. As quatro linhas internas de cada parcela foram consideradas como área útil (2,6 m × 8 m totalizando 20,80 m²), excluindo-se 1,20 m de bordadura em ambas extremidades de cada parcela experimental.

A formulação comercial de *Trichoderma* sp. utilizada no experimento foi adquirida junto ao fabricante. O produto foi aplicado via pulverização foliar/solo, em dose de 5 L.ha⁻¹, conforme recomendação técnica do fabricante. A aplicação ocorreu 7 dias após a emergência das plantas (7 DAE), no estágio fenológico V2, quando o sistema radicular passava por rápida expansão.

2.4 Aquisição de imagens multiespectrais

Para aquisição dos dados multiespectrais seguiu-se a metodologia descrita no fluxograma abaixo, Figura 3.

Figura 3. Fluxograma de coleta e processamento das imagens multiespectrais.



Fonte: Arquivo pessoal

A aquisição de dados multiespectrais foi executada por meio de 14 missões de voo, conduzidas semanalmente entre 28 de maio e 27 de agosto de

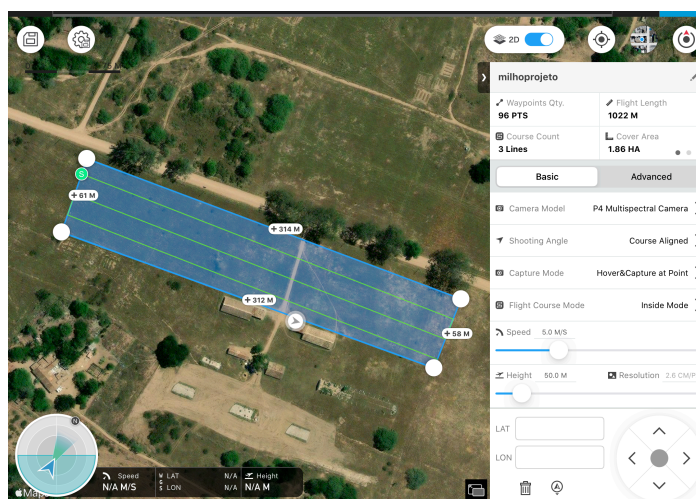
2024. Essa escolha de horário visa minimizar o efeito de sombreamento e a distorção espectral causados por ângulos de elevação solar baixos, garantindo uma iluminação mais uniforme e consistente sobre a área de estudo.

Para otimizar as condições de aquisição, implementou-se um protocolo de monitoramento meteorológico em tempo real durante as operações, visando assegurar a ausência de precipitação pluviométrica nos 30 minutos subsequentes ao período de voo, garantindo assim a qualidade dos dados obtidos.

A aquisição das imagens foi realizada empregando um drone DJI Phantom P4 Multispectral. Este equipamento possui um sistema de câmera integrado com seis sensores CMOS 1/2.9", devidamente calibrados para captura em multibandas. As especificações dos sensores são: azul ($450 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$), verde ($560 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$), vermelho ($650 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$), red edge ($730 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$) e infravermelho próximo ($840 \text{ nm} \pm 26 \text{ nm}$). Em cada ponto definido no plano de voo, o drone registrou uma imagem por sensor.

Para assegurar a uniformidade e a parametrização do processo de coleta, utilizou-se o software de planejamento de voo autônomo DJI GS GO (Ground Station Pro), conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4. Planejamento e parâmetros de Voo



Fonte: Arquivo Pessoal

No software, foram configurados os seguintes parâmetros: altura de voo de 50 m, sobreposição lateral e frontal de 75% e velocidade de 15 m.s^{-1} . Com

base nessas definições, o sistema determinou a quantidade e os pontos de captura das imagens. O resultado operacional foi a aquisição de 576 imagens no total, correspondendo a uma imagem por sensor em 96 pontos de coleta distintos. O tempo de voo estimado para esta operação foi de 7 min e 17 s.

2.5 Processamento dos dados coletados

A etapa de processamento envolveu a importação das imagens dos 14 voos, o alinhamento das fotos, identificando pontos homólogos para calcular as orientações relativas entre as imagens. Subsequentemente, uma nuvem de pontos densa foi gerada, permitindo a reconstrução tridimensional da área de estudo.

Com o modelo tridimensional estabelecido, foram produzidos ortomosaicos multiespectrais para cada voo, nos quais foram aplicadas correções geométricas e radiométricas para eliminar distorções.

Para assegurar a precisão espacial, todos os ortomosaicos foram ajustados. A precisão espacial foi garantida pelo uso de pontos de controle terrestres, obtidos previamente na área com levantamento GNSS em modo RTK (Real Time Kinematic). Esse procedimento correlacionou cada pixel exatamente com as coordenadas reais do campo, eliminando erros geométricos.

Além disso, para corrigir as variações radiométricas e garantir que cada banda espectral representasse a reflectância real do dossel vegetal, o ortomosaico foi submetido a ajustes radiométricos. Estes ajustes basearam-se em um painel de calibração específico, modelo target package (v2) mapir. Ao término desta fase, todos os produtos gerados: ortomosaico (RGB e multiespectrais), Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT), foram exportados no formato GeoTIFF.

Os ortomosaicos ajustados foram então importados para o software QGIS versão 3.40.5 (Bratislava), onde se realizou a extração dos índices espectrais por meio de álgebra de bandas, utilizando as seguintes equações:

$$\text{NDVI: } \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (1)$$

$$\text{GNDVI: } \frac{(NIR-Green)}{(NIR+Green)} \quad (2)$$

$$\text{NDRE: } \frac{(NIR-RedEdge)}{(NIR+RedEdge)} \quad (3)$$

Após a extração dos índices, as parcelas experimentais, de cada um dos 14 voos, foram delimitadas, considerando apenas a área útil e excluindo as bordaduras. A partir desses polígonos, foram extraídos os valores médios, mínimos, máximos e desvio-padrão dos índices espectrais para cada parcela em cada voo, permitindo obter a resposta espectral para cada tratamento. Esses dados foram compilados em tabelas para posterior análise estatística.

2.6 Comparação e análise de dados

Os valores médios, mínimos, máximos e desvios-padrão dos índices NDVI, GNDVI e NDRE, extraídos de cada parcela ao longo dos 14 voos, foram compilados em planilhas eletrônicas utilizando o software Microsoft Excel®. Para cada índice, a variação média de cada tratamento em relação à média geral de todos os tratamentos por voo foi calculada. Paralelamente, determinou-se o resíduo espectral de cada parcela, definido como a diferença entre o valor do índice observado e a média do tratamento correspondente no mesmo voo.

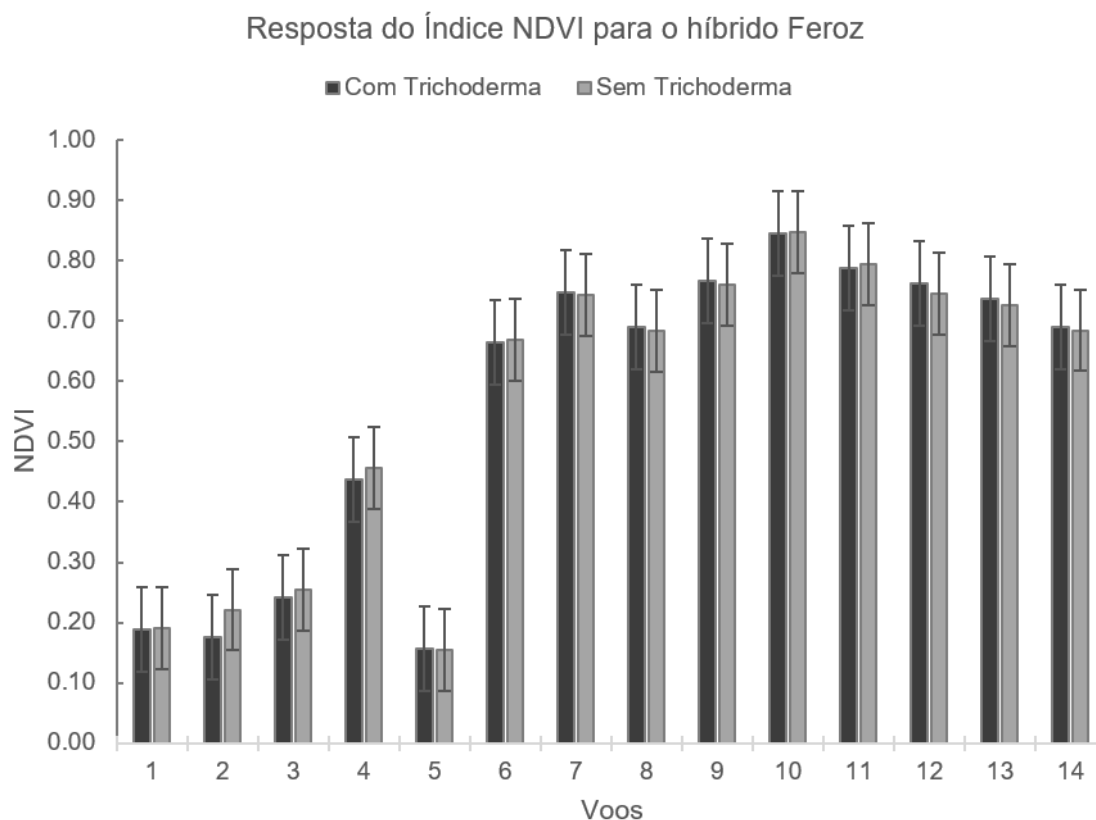
Com base nas variações médias, foram gerados gráficos de colunas para cada voo, exibindo a média de cada tratamento para o índice em questão. Além disso, uma tabela-resumo foi consolidada para cada índice, reunindo estatísticas descritivas (média, desvio-padrão, mínimo e máximo) de todos os tratamentos ao longo dos 14 voos.

3. RESULTADOS

3.1 Análise do Índice de Diferença Normalizada de Vegetação (NDVI)

As curvas do Índice NDVI para os híbridos Feroz e Pioneer, apresentadas nas Figuras 5 e 6 respectivamente, ilustram a evolução temporal do vigor da vegetação sob os diferentes tratamentos.

Figura 5. Variação temporal do NDVI no híbrido Feroz VIP3 sob tratamentos com e sem *Trichoderma* sp.

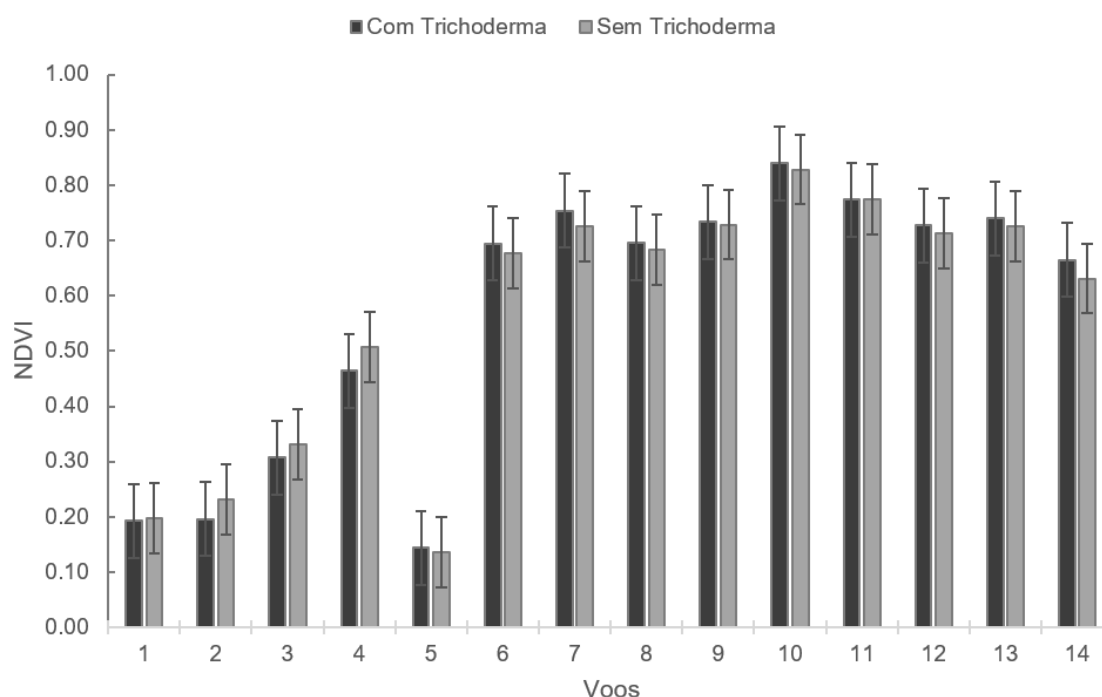


Fonte: Arquivo pessoal

Estas curvas exibem um padrão de crescimento, caracterizado por uma fase inicial de valores baixos, um aumento rápido até o pico de vigor e uma subsequente diminuição à medida que as plantas se desenvolvem e entram em senescência.

Figura 6. Variação temporal do NDVI no híbrido Pioneer P3858PWU sob tratamentos com e sem *Trichoderma* sp.

Resposta do Índice NDVI para o híbrido Pioneer



Fonte: Arquivo pessoal

Na análise comparativa dos tratamentos, para ambos os híbridos Feroz e Pioneer, os tratamentos com *Trichoderma* sp. geralmente mantiveram valores de NDVI ligeiramente superiores em comparação com seus respectivos tratamentos sem *Trichoderma* sp., especialmente evidente durante as fases de pico de crescimento (Voos 6-10) como é observado na Tabela 2.

Tabela 2. Valores obtidos para o índice NDVI em cada tratamento com e sem *Trichoderma* sp., nos híbridos Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU

Voo	Índice de Diferença Normalizada de Vegetação (NDVI)					
	FEROZ			PIONEER		
	Com Trichoderma	Sem Trichoderma	Desvio-padrão	Com Trichoderma	Sem Trichoderma	Desvio-padrão
1°	0,1887	0,1898	0,0008	0,1932	0,1976	0,0031
2°	0,1760	0,2213	0,0320	0,1962	0,2310	0,0246
3°	0,2410	0,2543	0,0094	0,3072	0,3304	0,0164
4°	0,4365	0,4568	0,0144	0,4647	0,5071	0,0300
5°	0,1574	0,1548	0,0019	0,1439	0,1369	0,0049
6°	0,6650	0,6689	0,0028	0,6947	0,6772	0,0123
7°	0,7478	0,7425	0,0037	0,7540	0,7255	0,0202

8°	0,6902	0,6839	0,0045	0,6958	0,6824	0,0094
9°	0,7665	0,7595	0,0050	0,7336	0,7289	0,0033
10°	0,8439	0,8465	0,0019	0,8395	0,8285	0,0078
11°	0,7872	0,7944	0,0051	0,7744	0,7751	0,0005
12°	0,7620	0,7449	0,0121	0,7270	0,7136	0,0094
13°	0,7369	0,7258	0,0079	0,7403	0,7262	0,0099
14°	0,6894	0,6841	0,0037	0,6654	0,6312	0,0241
Máx	0,8439	0,8465	---	0,8395	0,8285	---
Mín	0,1574	0,1548	---	0,1439	0,1369	---
Méd	0,5635	0,5663	---	0,5664	0,5637	---

Max: Máximo; Min: Mínimo; Med: Média

Fonte: Arquivo pessoal

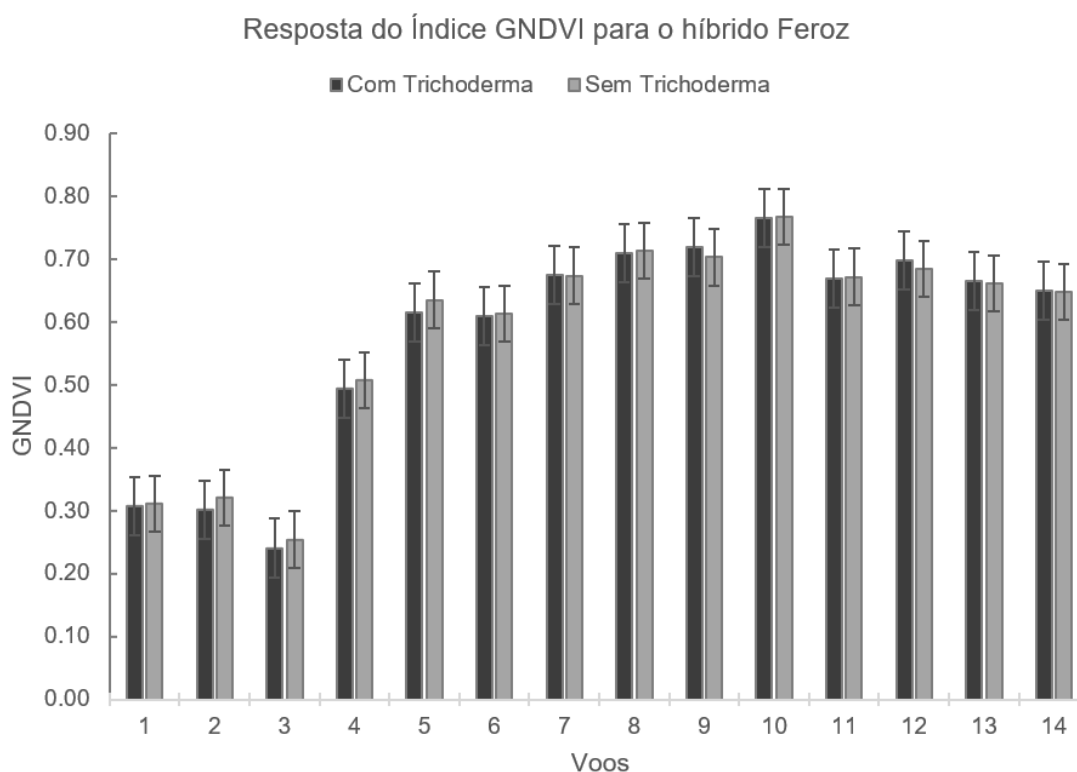
Avaliando o valor máximo de NDVI para o Feroz com *Trichoderma* sp. observou-se resultado de média de 0,5635, marginalmente inferior aos 0,5663 sem *Trichoderma* sp., além disso foi extraído a RMSV Variação quadrática média, sendo observado valores de 0,0153, demonstrando que em geral o híbrido Feroz com a aplicação do bioinsumo correspondeu com uma redução média de 1,53%.

De forma similar, para o Pioneer, a média com *Trichoderma* sp. foi de 0,5664, em comparação com 0,5637 sem o bioinsumo, com um RMSV de 0,0217, correspondendo uma resposta média superior de 2,17% em comparação com híbrido sem aplicação. Embora estas diferenças numéricas possam parecer sutis, a tendência consistente ao longo do tempo sugere uma influência benéfica do bioinsumo nas respostas espectrais observadas.

3.2 Análise do Índice de Diferença Normalizada de Vegetação Verde (GNDVI)

Os gráficos de GNDVI para os híbridos Feroz e Pioneer, Figuras 7 e 8 respectivamente, ilustram a resposta temporal deste índice, refletindo os padrões gerais de crescimento observados com o NDVI.

Figura 7. Variação temporal do GNDVI no híbrido Feroz VIP3 sob tratamentos com e sem *Trichoderma* sp.

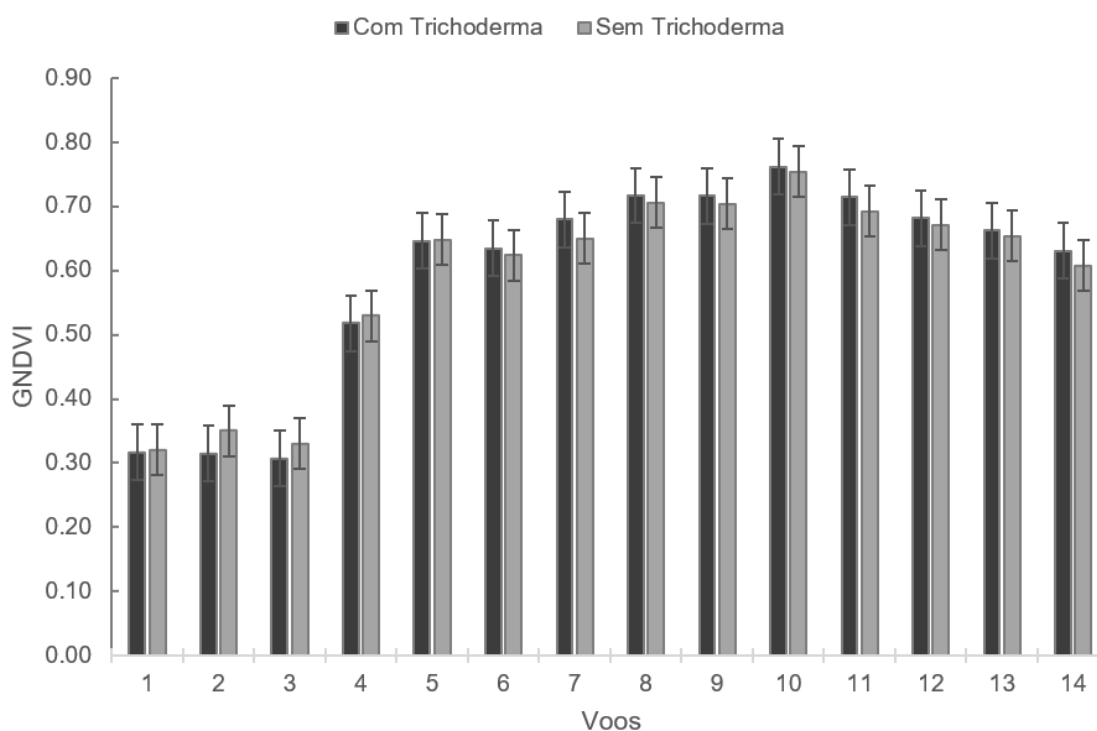


Fonte: Arquivo pessoal

De forma análoga ao NDVI, os valores de GNDVI seguiram a curva de crescimento característica para culturas agrícolas. O GNDVI, que incorpora a banda espectral verde, é reconhecido por sua sensibilidade aprimorada às variações na biomassa e no conteúdo de clorofila, especialmente em situações de densidade moderada a alta do dossel.

Figura 8. Variação temporal do GNDVI no híbrido Pioneer P3858PWU sob tratamentos com e sem *Trichoderma* sp.

Resposta do Índice GNDVI para o híbrido Pioneer



Fonte: Arquivo pessoal

Na análise comparativa dos tratamentos, para o Feroz, os valores médios de GNDVI foram de 0,5801 Com *Trichoderma* sp. e 0,5834 Sem *Trichoderma* sp., Tabela 3, indicando uma diferença pequena, na média geral, com um RMSV de 0,0109, correspondendo uma resposta média superior de 1,09% em comparação com o tratamento que não recebeu aplicação.

Tabela 3. Valores obtidos para o índice GNDVI em cada tratamento com e sem *Trichoderma* sp., nos híbridos Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU

Voo	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde (GNDVI)					
	FEROZ			PIONEER		
	Com Trichoderma	Sem Trichoderma	Desvio-padrão	Com Trichoderma	Sem Trichoderma	Desvio-padrão
1°	0,3074	0,3113	0,0028	0,3170	0,3207	0,0026
2°	0,3015	0,3210	0,0138	0,3147	0,3508	0,0256
3°	0,2410	0,2542	0,0094	0,3072	0,3304	0,0164
4°	0,4935	0,5073	0,0097	0,5180	0,5292	0,0079
5°	0,6159	0,6357	0,0140	0,6457	0,6479	0,0016
6°	0,6090	0,6137	0,0034	0,6347	0,6242	0,0074

7°	0,6747	0,6739	0,0005	0,6797	0,6499	0,0211
8°	0,7093	0,7134	0,0029	0,7168	0,7058	0,0078
9°	0,7199	0,7033	0,0117	0,7163	0,7044	0,0084
10°	0,7655	0,7673	0,0012	0,7617	0,7535	0,0058
11°	0,6702	0,6721	0,0013	0,7141	0,6922	0,0155
12°	0,6983	0,6844	0,0098	0,6815	0,6715	0,0071
13°	0,6650	0,6615	0,0024	0,6627	0,6538	0,0063
14°	0,6505	0,6481	0,0017	0,6311	0,6075	0,0167
Max	0,7655	0,7673	---	0,7617	0,7535	---
Mín	0,2410	0,2542	---	0,3072	0,3207	---
Méd	0,5801	0,5834	---	0,5929	0,5887	---

Max: Máximo; Min: Mínimo; Med: Média

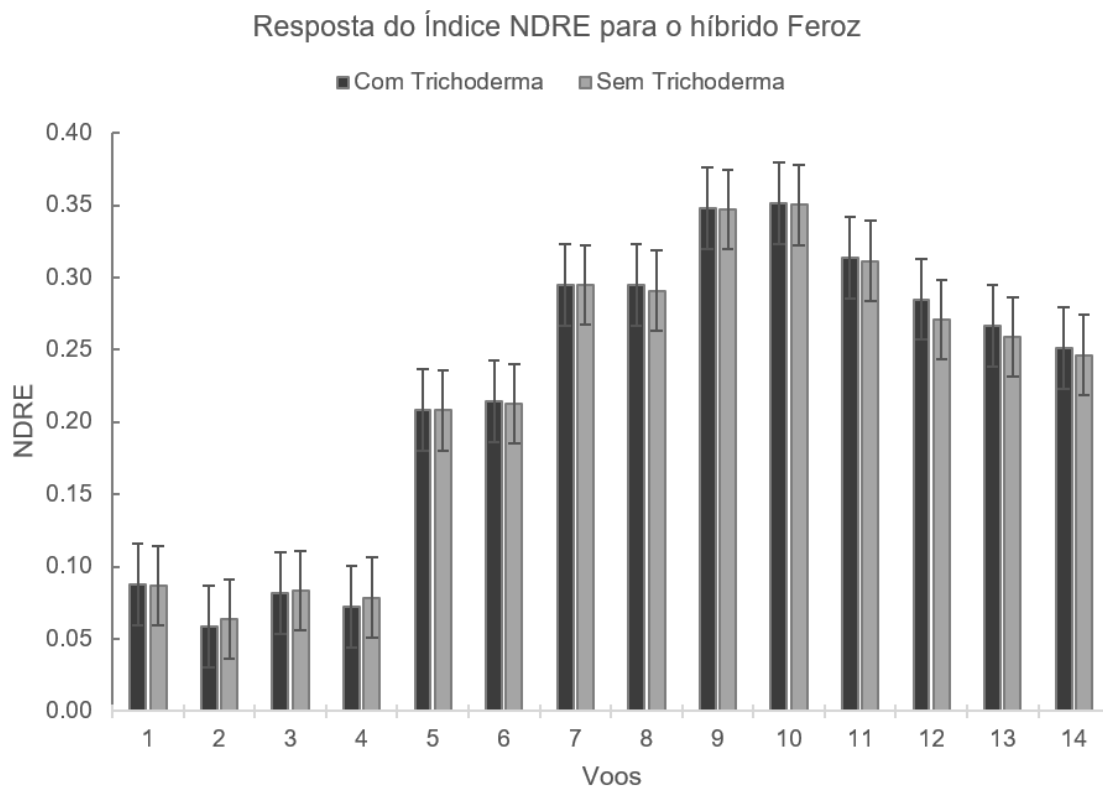
Fonte: Arquivo pessoal

Para o Pioneer, os valores médios de GNDVI foram de 0,5929 Com *Trichoderma* sp. e 0,5887 Sem *Trichoderma* sp., apresentando uma média ligeiramente superior com a aplicação de *Trichoderma* sp., tendo um RMSV de 0,0179, incremento de 1,79% no índice. Visualmente, através dos gráficos 03 e 04 é possível observar que em determinados voos as linhas com *Trichoderma* sp. estão marginalmente acima das linhas sem *Trichoderma* sp..

3.3 Análise do Índice de Diferença Normalizada de Borda Vermelha (NDRE)

A Figura 9 destaca como o NDRE do híbrido Feroz varia ao longo do tempo, acompanhando a tendência de crescimento observada.

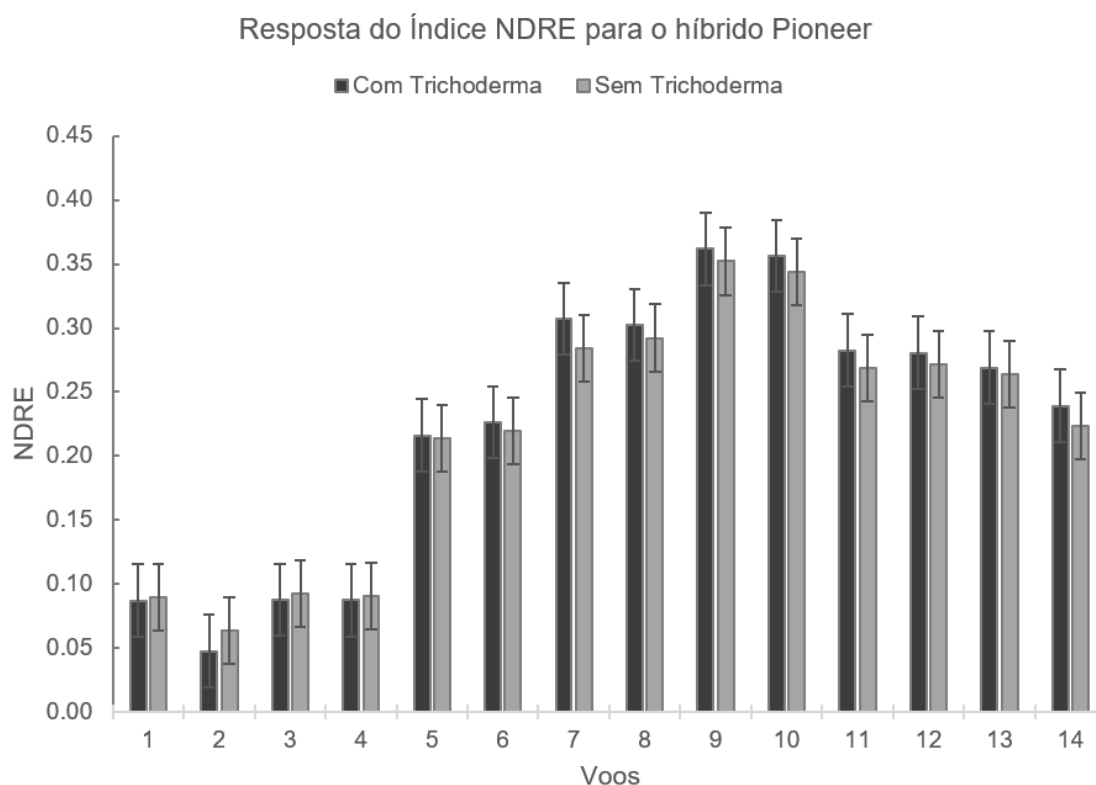
Figura 9. Variação temporal do NDRE no híbrido Feroz VIP3 sob tratamentos com e sem *Trichoderma* sp.



Fonte: Arquivo pessoal

A Figura 10 retrata a dinâmica do NDRE no híbrido Pioneer, revelando um desenvolvimento paralelo ao padrão geral de crescimento.

Figura 10. Variação temporal do NDRE no híbrido Pioneer P3858PWU sob tratamentos com e sem *Trichoderma* sp.



Fonte: Arquivo pessoal

A Tabela 4 corresponde ao índice NDRE e fornece os dados numéricos para cada voo e tratamento. Os valores de NDRE também seguiram a curva de crescimento características para culturas agrícolas. O NDRE apresenta características que relacionam o conteúdo de clorofila e o status de nitrogênio em dosséis mais densos, pois a banda *red-edge* penetra mais profundamente no dossel do que a banda vermelha.

Tabela 4. Valores obtidos para o índice NDRE em cada tratamento com e sem *Trichoderma* sp., nos híbridos Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU

Índice de Diferença Normalizada de Borda Vermelha (NDRE)						
Voo	FEROZ			PIONEER		
	Com Trichoderma	Sem Trichoderma	Desvio-padrão	Com Trichoderma	Sem Trichoderma	Desvio-padrão
1°	0,0879	0,0870	0,0007	0,0868	0,0895	0,0019
2°	0,0588	0,0636	0,0034	0,0476	0,0637	0,0114
3°	0,0818	0,0832	0,0010	0,0877	0,0922	0,0032
4°	0,0723	0,0787	0,0045	0,0873	0,0907	0,0025
5°	0,2086	0,2080	0,0005	0,2160	0,2135	0,0018

6°	0,2142	0,2126	0,0011	0,2262	0,2198	0,0045
7°	0,2949	0,2947	0,0001	0,3073	0,2843	0,0163
8°	0,2946	0,2909	0,0026	0,3025	0,2923	0,0072
9°	0,3477	0,3472	0,0003	0,3618	0,3520	0,0069
10°	0,3512	0,3501	0,0008	0,3564	0,3440	0,0087
11°	0,3137	0,3114	0,0016	0,2826	0,2685	0,0100
12°	0,2849	0,2709	0,0099	0,2806	0,2717	0,0063
13°	0,2664	0,2588	0,0054	0,2690	0,2639	0,0035
14°	0,2510	0,2464	0,0033	0,2391	0,2238	0,0108
Max	0,3512	0,3501	---	0,3618	0,3520	---
Min	0,0588	0,0636	---	0,0476	0,0637	---
Med	0,2234	0,2217	---	0,2250	0,2193	---

Max: Máximo; Min: Mínimo; Med: Média

Fonte: Arquivo pessoal

Na análise dos tratamentos, para o Feroz, os valores médios de NDRE foram de 0,2234 com *Trichoderma* sp. e 0,2217 sem *Trichoderma* sp., com um RMSV de 0,0051, correspondendo uma variação média de 0,05%. Para o Pioneer, os valores médios de NDRE foram de 0,2250 com *Trichoderma* sp. e 0,2193 sem *Trichoderma* sp., onde o RMSV foi de 0,0011 apresentando média de variação de 0,01%. Em geral, os tratamentos com *Trichoderma* sp. consistentemente apresentaram valores de NDRE ligeiramente superiores, com uma diferença mais pronunciada observada para o híbrido Pioneer.

4. DISCUSSÃO

Os índices de vegetação NDVI, GNDVI e NDRE, aplicados à avaliação dos híbridos de milho Feroz e Pioneer, demonstraram uma evolução temporal alinhada ao ciclo fenológico da cultura. Observou-se um padrão que caracteriza o desenvolvimento vegetal, iniciando com valores baixos pós-emergência, seguido de um incremento progressivo durante o crescimento vegetativo, culminando em um pico que reflete o máximo desenvolvimento da biomassa e área foliar, e um subsequente declínio na maturação e senescência. Esta trajetória é amplamente corroborada pela literatura, que associa a dinâmica dos índices de vegetação às alterações na acumulação de biomassa, índice de área foliar (IAF) e teor de clorofila ao longo do ciclo do milho (SCHLEMMER et al., 2013).

A aplicação de *Trichoderma* sp. induziu respostas espectrais distintas entre os híbridos e os índices avaliados. No híbrido Feroz, a aplicação do bioinsumo resultou em valores médios de NDVI 0,5635 e GNDVI 0,5801 marginalmente inferiores aos tratamentos controle 0,5663 e 0,5834, respectivamente. Em contraste, o NDRE médio para este mesmo híbrido foi discretamente superior com a aplicação do fungo 0,2234 vs. 0,2217.

Para o híbrido Pioneer, observou-se uma tendência oposta e mais consistente: os tratamentos com *Trichoderma* sp. apresentaram valores médios de NDVI com aplicação 0,5664 e 0,5637 para o tratamento sem aplicação, GNDVI com 0,5929 e 0,5887 sem e NDRE com aplicação 0,2250 e 0,2193 sem aplicação consistentemente superiores aos tratamentos sem o bioinsumo. Esta superioridade no híbrido Pioneer com *Trichoderma* sp. foi particularmente visível nos resultados durante as fases de pico de crescimento vegetativo (Voos 6-10) para o NDVI.

Fungos do gênero *Trichoderma* sp. são amplamente reconhecidos por sua capacidade de promover o crescimento vegetal e melhorar a sanidade das plantas através de diversos mecanismos, como o aumento da disponibilidade e absorção de nutrientes, produção de fitormônios, solubilização de fosfatos e indução de resistência a patógenos e estresses abióticos (LUCON, CHAVES e BACILIERI, 2014; CARDOSO, 2022). Tais melhorias fisiológicas e nutricionais deveriam, teoricamente, refletir-se em índices de vegetação mais elevados, indicativos de maior vigor, densidade de clorofila e biomassa fotossinteticamente ativa.

Ainda que a aplicação de *Trichoderma* sp. tenha resultado em efeitos médios sutis sobre os índices de vegetação, destaca-se a observação de que os tratamentos com o bioinsumo tenderam a manter valores de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) ligeiramente superiores durante o pico de crescimento do híbrido Pioneer. Este período é caracterizado por alta demanda fisiológica e potencial suscetibilidade a estresses. É plausível que os benefícios do *Trichoderma* sp., como o aumento da eficiência na absorção de nutrientes e mitigação de estresses (YAO et al., 2023), se manifestem de forma mais evidente sob maior demanda fisiológica, resultando na manutenção do conteúdo

de clorofila e da atividade fotossintética, refletidos em valores de NDVI ligeiramente mais altos.

O NDRE, por sua vez, apresentou consistentemente, embora com magnitude muito pequena, respostas positivas à aplicação de *Trichoderma* sp. para ambos os híbridos. Este índice é reconhecido por ser mais sensível ao conteúdo de clorofila e ao status de nitrogênio em dosséis vegetais densos e por ser menos suscetível à saturação em comparação com o NDVI (YANG et al., 2022). Considerando que o *Trichoderma* sp. pode melhorar a absorção de nutrientes, incluindo o nitrogênio, e potencialmente aumentar o teor de clorofila (PÉREZ-ÁLVAREZ et al., 2024), as pequenas elevações no NDRE podem indicar um impacto fisiológico positivo, ainda que tênue, na planta.

Foi observado no Voo 5, para o índice NDVI uma acentuada queda nos valores do índice. Este fenômeno, a despeito da tolerância genética dos híbridos ao glifosato, sublinha a sensibilidade deste índice a perturbações fisiológicas. A resposta espectral observada pode estar relacionada a uma consequência direta de alterações fisiológicas transitórias que podem incluir a inibição temporária de vias fotossintéticas ou a degradação de pigmentos (ZHAO et al., 2020).

Tal achado demonstra que a tolerância genética não implica ausência total de resposta fisiológica da planta ao herbicida. Assim, índices como o NDVI podem ser ferramentas valiosas para monitorar o estresse temporário induzido por herbicidas, mesmo em culturas tolerantes, e para avaliar a dinâmica da recuperação da planta.

Esta resposta diferencial entre os índices e os híbridos sugere uma interação complexa entre o genótipo da planta, o bioestimulante e as condições ambientais, onde diferentes aspectos da fisiologia vegetal podem ser afetados e detectados de forma distinta pelos Índices de Vegetação. A literatura corrobora que a resposta do milho ao *Trichoderma* sp. pode ser genótipo-específica (LANG e CHEN, 2023), o que explicaria as diferenças observadas entre Feroz e Pioneer.

Os resultados deste estudo, caracterizados por efeitos do *Trichoderma* sp. nos índices de vegetação, não permitem uma análise conclusiva sobre a saturação diferencial dos índices. Contudo, a literatura científica indica que em estágios de alta biomassa, como os observados nos Vãos 6-10, onde os valores

de NDVI atingiram picos superiores a 0,80, o NDVI poderia estar se aproximando de seus limites de sensibilidade (YANG et al., 2022). Em tais condições, o NDRE e o GNDVI poderiam, teoricamente, oferecer uma discriminação mais fina das variações no estado da cultura. A tendência consistente, ainda que mínima, de aumento do NDRE com a aplicação de *Trichoderma* sp. em ambos os híbridos pode ser um reflexo dessa maior sensibilidade a alterações fisiológicas sutis, possivelmente relacionadas ao status de clorofila ou nitrogênio.

5. CONCLUSÃO

A aplicação do *Trichoderma* sp. induziu respostas sutis e genótipo-dependentes nos índices de vegetação (NDVI, GNDVI e NDRE), evidenciando que a interação entre o fungo e a planta varia conforme o material genético. A evolução temporal dos índices acompanhou o ciclo fenológico da cultura, demonstrando a viabilidade da tecnologia para monitorar o desenvolvimento do milho.

A resposta à inoculação com *Trichoderma* sp. foi distinta entre os híbridos. No híbrido Feroz VIP3, a aplicação resultou em valores médios de NDVI e GNDVI marginalmente inferiores, enquanto o NDRE apresentou um discreto aumento. Em contrapartida, o híbrido Pioneer P3858PWU demonstrou uma interação mais favorável, com aumentos consistentes nos três índices.

A análise demonstrou a capacidade dos índices espectrais de detectar estresses fisiológicos transitórios, como a queda acentuada no NDVI observada após a aplicação de herbicida. O NDRE, por sua vez, mostrou-se promissor ao registrar pequenas elevações em ambos os híbridos tratados com o bioinsumo, reforçando seu potencial para identificar variações sutis, especialmente em estágios de alta biomassa onde o NDVI pode se aproximar da saturação.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a validação dos dados espectrais com avaliações agronômicas diretas, como análise de biomassa, teor de nutrientes foliares e produtividade final, a fim de correlacionar as respostas remotamente detectadas com o desempenho efetivo da cultura.

REFERÊNCIAS

- AMINDA, F. R.; DHAMIRA, A.; SARI, A. K. Production risk analysis in maize: comparative insights from major producing countries. **West Science Interdisciplinary Studies**, v. 3, n. 1, p. 37–47, 2025. doi:10.58812/wsis.v3i01.1621. Disponível em: <https://doi.org/10.58812/wsis.v3i01.1621>. Acesso em: 05 jun. 2025.
- CASELA, C. R.. **Manejo de doenças na cultura do milho**. Brasília, DF: Embrapa, 2006. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/485061/1/Manejodoencas.pdf>. Acesso em: 04 out. 2025.
- CHÁVEZ-ARIAS, C. C.; LIGARRETO-MORENO, G. A.; RAMÍREZ-GODOY, A.; RESTREPO-DÍAZ, H.. Maize responses challenged by drought, elevated daytime temperature and arthropod herbivory stresses: a physiological, biochemical and molecular view. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, Art. 702841, 21 jul. 2021. doi:10.3389/fpls.2021.702841. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.702841>. Acesso em: 05 jun. 2025.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Produção de milho no Brasil: safra 2023/24**. Brasília, DF: Conab, 2024. 9 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/milho-e-sorgo/2024/48a-ro/producao-de-milho-no-brasil.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safra de grãos está estimada em 332,9 milhões de toneladas influenciada por boa produção de soja, milho e arroz**. Brasília, DF: Conab, 15 maio 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-de-graos-esta-estimada-em-332-9-milhoes-de-toneladas-influenciada-por-boa-producao-de-soja-milho-e-arroz>. Acesso em: 04 jun. 2025.
- COTA, L.; COSTA, R.; SABATO, E.; SILVA, D.. *Histórico e perspectivas das doenças na cultura do milho*. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 7 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/975363>. Acesso em: 04 jun. 2025..

EICHOLZ, E. D.; RUGERI, A.; AFONSO R., A. P. S.; BREDEMEIER, C.; BERMUDEZ PEREIRA, F.; MACHADO S., F.; THEISEN, G.; RODRIGUES A. M., J.; CARRAFA, M.. **Informações técnicas para o cultivo de milho e sorgo na região subtropical do Brasil: safras 2023/24 e 2024/25: 3ª Reunião Técnica Sul-Brasileira de Pesquisa de Milho e Sorgo, Pelotas, 10 a 12 de setembro de 2023.** Sete Lagoas, MG: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2024. Disponível em: https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202406/19154728-informacoes-tecnicas-milho-e-sorgo-2023-24-2024-25-misosul-2023.pdf?utm_source. Acesso em: 04 jun. 2025.

FERNANDES, S.. **Índices de vegetação para diagnóstico nutricional de nitrogênio na cultura do milho a partir de imagens geradas por drone.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2023. 47 p. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/31177/1/indicesdevegetacaodiagnosticonutricional.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

KIM, K.; LEE, B.. **Effects of climate change and drought tolerance on maize growth.** *Plants*, v. 12, n. 20, p. 3548, 12 out. 2023. doi:10.3390/plants12203548. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12203548>. Acesso em: 05 jun. 2025.

LANG, B.; CHEN, J.. Trichoderma harzianum cellulase gene thph2 affects Trichoderma root colonization and induces resistance to southern leaf blight in maize. *Journal of Fungi*, Basel, v. 9, n. 12, p. 1168, 2023. doi:10.3390/2309-608X/9/12/1168. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2309-608X/9/12/1168>. Acesso em: 05 jun. 2025.

MA, H.; LI, X.; JI, J.; CUI, H.; SHI, Yi; LI, N.; YANG, C.. Monitoring indicators for comprehensive growth of summer maize based on UAV remote sensing. *Agronomy*, v. 13, n. 12, p. 2888, nov. 2023. doi:10.3390/agronomy13122888. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13122888>. Acesso em: 05 jun. 2025.

MARIN, F. R.; ANTOLIN, L. A. S.; SILVA, E. H. F. M.; ZANON, A. J.; ROLIM, B. S. M. R.. How much would irrigation increase maize production in Brazil? *Scientia Agricola*, Piracicaba, SP, v. 82, e20240083, 2025. doi:10.1590/1678-992x-2024-0083. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2024-0083>. Acesso em: 04 jun. 2025.

MELLO, D. C.; MEDEIROS N., L. G.; LANA, M. G.; FIORINO, P.. Uso e ocupação do solo: comparação de índices NDVI e GNDVI e inferências sobre biomassa de dossel vegetal. **Cadernos de Agroecologia**, Viçosa, MG, v. 15, n. 1 (edição especial do V Simpósio Mineiro de Ciência do Solo), 2019. Disponível em: <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/6282/2377>. Acesso em: 04 jun. 2025.

PÉREZ-ÁLVAREZ, S.; OCHOA-CHAPARRO, E. H.; ANCHONDO-PÁEZ, J. C.; ESCOBEDO-BONILLA, C. M.; RASCÓN-SOLANO, J.; MAGALLANES-TAPIA, M. A.; URANGA-VALENCIA, L. P.; HERNÁNDEZ-CAMPOS, R.; SÁNCHEZ, E.. N. assimilation, biomass, and yield in response to application of algal extracts, *Rhizobium* spp., and *Trichoderma asperellum* as biofertilizers in hybrid maize. **Nitrogen**, v. 5, n. 4, p. 1031–1047, nov. 2024. doi:10.3390/nitrogen5040066. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nitrogen5040066>. Acesso em: 05 jun. 2025.

REHMAN, T. H.; LUNDY, M. E.; LINQUIST, B. A. Comparative sensitivity of vegetation indices measured via proximal and aerial sensors for assessing N status and predicting grain yield in rice cropping systems. **Remote Sensing**, v. 14, n. 12, p. 2770, 9 jun. 2022. doi:10.3390/rs14122770. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14122770>. Acesso em: 05 jun. 2025

SCHLEMMER, M.; GITELSON, A. A.; SCHEPERS, J. S.; FERGUSON, R. B.; PENG, Y.; SHANAHAN, J.; RUNDQUIST, D. **Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 25, p. 47–54, dez. 2013. doi:10.1016/j.jag.2013.04.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003>. Acesso em: 05 jun. 2025.

SILVA JÚNIOR, U. J.; GONÇALVES, R. M.; OLIVEIRA, L. M. M.; SILVA JÚNIOR, J. A.. Sensibilidade espectral dos índices de vegetação: GNDVI, NDVI e EVI na mata ciliar do reservatório de Serrinha II – PE, Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 1, p. 17–35, fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv73n1-55252>. Acesso em: 04 jun. 2025.

YANG, B.; ZHU, W.; REZAEI, E. E.; LI, J.; SUN, Z.; ZHANG, J.. **The optimal phenological phase of maize for yield prediction with high-frequency UAV remote sensing. Remote Sensing**, v. 14, n. 7, p. 1559, 24 mar. 2022. doi:10.3390/rs14071559. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14071559>. Acesso em: 05 jun. 2025.

YAO, X.; GUO, H.; ZHANG, K.; ZHAO, M.; RUAN, J.; CHEN, J.. Trichoderma and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, Art. e1160551, 3 mai. 2023. doi:10.3389/fmicb.2023.1160551. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551>. Acesso em: 04 jun. 2025

ZHANG, D.; QI, H.; GUO, X.; SUN, H.; MIN, J.; LI, S.; HOU, L.; LV, L.. Integration of UAV multispectral remote sensing and random forest for full-growth stage monitoring of wheat dynamics. **Agriculture**, v. 15, n. 3, p. 353, 6 fev. 2025. doi:10.3390/agriculture15030353. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15030353>. Acesso em: 04 jun. 2025.

ZHAO, Y.; XIE, Q.; LIU, X.; HU, L.. **Proper glyphosate application at post-anthesis lowers nitrogen metabolism and yield of glyphosate-resistant maize. Frontiers in Plant Science**, v. 11, Art. 580883, 2020. doi:10.3389/fpls.2020.580883. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.580883/full>. Acesso em: 04 jun. 2025.

CAPÍTULO 2

**EFEITO DA APLICAÇÃO DE *TRICHODERMA* sp. SOBRE
CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DE HÍBRIDOS DE MILHO**

EFEITO DA APLICAÇÃO DE *TRICHODERMA* sp. SOBRE CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DE HÍBRIDOS DE MILHO

RESUMO

O milho (*Zea mays* L.) é um dos cereais mais importantes globalmente, mas sua produtividade é frequentemente limitada por fatores bióticos e abióticos. A busca por práticas agrícolas sustentáveis tem impulsionado o uso de bioinsumos, como o fungo *Trichoderma* sp., que se destaca por sua capacidade de promover o crescimento vegetal e atuar no biocontrole de patógenos. No entanto, a interação entre microrganismos benéficos e o genótipo da planta pode gerar respostas distintas. Diante disso, o objetivo neste estudo foi avaliar o efeito da aplicação de *Trichoderma* sp. sobre as características agronômicas e bromatológicas dos híbridos de milho Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU. O experimento foi conduzido na fazenda experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), em Cruz das Almas-BA, sob delineamento de blocos casualizados em arranjo fatorial 2 x 2, com quatro repetições. Os fatores consistiram em dois híbridos (Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU) e dois tratamentos (com e sem aplicação de *Trichoderma* sp.). A inoculação com *Trichoderma* sp. promoveu incrementos na massa verde da parte aérea, colmo e espiga, produtividade de massa verde, massa seca da parte aérea, colmo e espiga, massa seca total e produtividade de massa seca. Em relação à qualidade bromatológica, a aplicação do bioinsumo elevou o teor de hemicelulose e demonstrou uma interação com os híbridos para o teor de celulose. A Análise de Componentes Principais (ACP) explicou 91,74% da variância total dos dados e revelou a formação de três grupos distintos: (1) tratamentos controle (sem *Trichoderma*), com menor desempenho geral; (2) híbrido Feroz com *Trichoderma*, associado a maiores ganhos de produtividade (massa verde e seca); e (3) híbrido Pioneer com *Trichoderma*, relacionado ao maior acúmulo das frações estruturais da parede celular (qualidade bromatológica). Conclui-se que a aplicação de *Trichoderma* sp. promoveu ganhos significativos para a cultura do milho, melhorando tanto a produtividade quanto a qualidade bromatológica. Contudo, a resposta é genótipo-dependente, com o híbrido Feroz maximizando o vigor produtivo e o Pioneer otimizando a composição estrutural da planta.

Palavras-chaves: Análise Bromatológica, Bioinsumo, Híbridos de Milho, *Zea mays*

EFFECT OF *TRICHODERMA* sp. APPLICATION ON AGRONOMIC CHARACTERISTICS OF CORN HYBRIDS

ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most important cereals globally, but its productivity is often limited by biotic and abiotic factors. The pursuit of sustainable agricultural practices has driven the use of bio-inputs, such as the fungus *Trichoderma* sp., which is recognized for its ability to promote plant growth and act as a biocontrol agent against pathogens. However, the interaction between beneficial microorganisms and the plant genotype can generate distinct responses. Given this, the objective of this study was to evaluate the effect of *Trichoderma* sp. application on the agronomic and bromatological characteristics of the maize hybrids Feroz VIP3 and Pioneer P3858PWU. The experiment was conducted at the experimental farm of the Federal University of Recôncavo da Bahia (UFRB), in Cruz das Almas, BA, under a randomized complete block design in a 2 x 2 factorial arrangement, with four replications. The factors consisted of two hybrids (Feroz VIP3 and Pioneer P3858PWU) and two treatments (with and without *Trichoderma* sp. application). Inoculation with *Trichoderma* sp. promoted increases in green mass of the aerial part, stalk, and ear; green mass yield; dry mass of the aerial part, stalk, and ear; total dry mass; and dry mass yield. Regarding bromatological quality, the application of the bio-input increased the hemicellulose content and demonstrated an interaction with the hybrids for the cellulose content. A Principal Component Analysis (PCA) explained 91.74% of the total data variance and revealed the formation of three distinct groups: (1) control treatments (without *Trichoderma*), with lower overall performance; (2) the Feroz hybrid with *Trichoderma*, associated with greater productivity gains (green and dry mass); and (3) the Pioneer hybrid with *Trichoderma*, related to a greater accumulation of the structural fractions of the cell wall (bromatological quality). It is concluded that the application of *Trichoderma* sp. promoted significant gains for the maize crop, improving both productivity and bromatological quality. However, the response is genotype-dependent, with the Feroz hybrid maximizing productive vigor and the Pioneer hybrid optimizing the plant's structural composition.

Keywords: Bromatological Analysis, Biological Input, Corn Hybrids, *Zea mays*

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) ocupa posição de destaque na agricultura mundial, sendo reconhecido como um dos cereais mais cultivados e consumidos globalmente, com aplicações na alimentação humana, nutrição animal e na produção industrial de biocombustíveis, rações e alimentos processados (MILIND; DHAMIJA, 2013; KAPIL et al., 2022; RAGLIN et al., 2024). Essa versatilidade contribui para seu cultivo em praticamente todos os continentes do planeta (CRUZ-CRUZ et al., 2017). O Brasil figura entre os maiores produtores mundiais, frequentemente oscilando entre a terceira e a quarta posição, com produção estimada em aproximadamente 126,9 milhões de toneladas na safra 2024/2025 (CONAB, 2025). o que o torna um ator estratégico tanto para o abastecimento interno quanto para a balança comercial do agronegócio nacional.

Apesar do protagonismo do milho na produção nacional, sua produtividade média ainda está aquém do potencial genético dos híbridos modernos. Entre os fatores abióticos mais limitantes, a deficiência hídrica é um dos principais, impactando negativamente o crescimento e o rendimento de grãos, especialmente em fases críticas de desenvolvimento da planta (SINGH et al., 2022; JING et al., 2023). Adicionalmente, a baixa fertilidade dos solos, particularmente em regiões tropicais e subtropicais, e a acidez do solo, são barreiras significativas para a expressão do potencial produtivo do milho (TANDZI et al., 2018; DAWAR et al., 2022).

No que tange aos fatores bióticos, as doenças fúngicas representam uma ameaça constante à produção de milho em todo o mundo, podem causar perdas substanciais de produtividade, afetando tanto a quantidade quanto a qualidade dos grãos (REHMAN et al., 2021). O ataque de pragas, também contribui para perdas significativas na produção (WEI et al., 2025). Além disso, condições climáticas adversas, incluindo o aumento da temperatura média, eventos de seca prolongada e padrões de precipitação irregulares, exercem um efeito considerável sobre a produtividade do milho (JONES e THORNTON, 2003; HERNANDEZ et al., 2025). Essas condições podem reduzir os rendimentos

esperados, necessitando de estratégias de adaptação e mitigação para garantir a sustentabilidade da produção.

Historicamente, a intensificação da produção agrícola tem sido sustentada por altos níveis de insumos químicos, como fertilizantes solúveis e defensivos agrícolas. Embora essa abordagem tenha favorecido aumentos de produtividade e expansão de área cultivada, também trouxe implicações ambientais e econômicas consideráveis. O uso excessivo de fertilizantes está associado à perda de eficiência no uso de nutrientes, aumento da poluição ambiental e elevação dos custos de produção (VOLKE-HALLER et al., 2024; IZEHIUWA et al., 2025). Adicionalmente, práticas de fertilização desequilibradas comprometem a sustentabilidade dos sistemas agrícolas a médio e longo prazo, ocasionando contaminação de recursos hídricos e à emissão de gases de efeito estufa (REN et al., 2021; KUMAR et al., 2022).

Nesse contexto, a busca por alternativas sustentáveis vem estimulando o desenvolvimento e a adoção de bioinsumos na agricultura, tem sido promovida como alternativa sustentável para reduzir o uso de fertilizantes e pesticidas químicos, melhorar a saúde do solo e aumentar a produtividade (SHARMA et al., 2023). Os bioinoculantes atuam não apenas na disponibilização de nutrientes, mas também promovem o crescimento vegetal e a resistência a estresses ambientais, sendo especialmente relevantes no contexto de mudanças climáticas (MAITRA et al., 2021). O uso desses agentes tem avançado de forma significativa, integrando práticas de manejo que visam reduzir a dependência de insumos sintéticos (SILVA et al., 2025).

Dentre os microrganismos de interesse agrônomo, o gênero *Trichoderma* destaca-se pela capacidade de biocontrole dos fitopatógenos e promoção do crescimento vegetal (SUBHALAKSHMI e SINGH, 2022). Espécies deste gênero são amplamente empregadas em formulações comerciais devido à produção de enzimas hidrolíticas como quitinases e glucanases, metabólitos secundários e moléculas sinalizadoras que modulam respostas fisiológicas das plantas (RODRIGUES, MAY DE MIO e SOCCOL, 2023).

Os mecanismos de ação de *Trichoderma* incluem competição por espaço e nutrientes, micoparasitismo, antibiose e indução de resistência sistêmica nas plantas (TYŚKIEWICZ et al., 2022). Além disso, a secreção de auxinas e

compostos similares a fitohormônios promove o alongamento celular e a ramificação do sistema radicular, melhorando a absorção de água e nutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal (MARTÍNEZ-MEDINA et al., 2014; LI et al., 2021). Esses mecanismos promovem aumento da microbiota benéfica e síntese de hormônios de crescimento, evidenciando sinergias que favorecem a produtividade.

Além desses fatores, a escolha criteriosa de híbridos é etapa crucial não só para a produtividade, mas também para o sucesso de práticas de manejo como o uso de bioinsumos. Estudos demonstram que a resposta à inoculação com agentes biológicos varia significativamente de acordo com o material genético utilizado (VIDOTTI et al., 2019). Ademais, observou que interações entre o genótipo do milho e a comunidade microbiana do solo afetam diretamente a expressão do melhor desempenho e os ganhos agrônômicos obtidos com a utilização de microrganismos benéficos (CLOUSE et al., 2024).

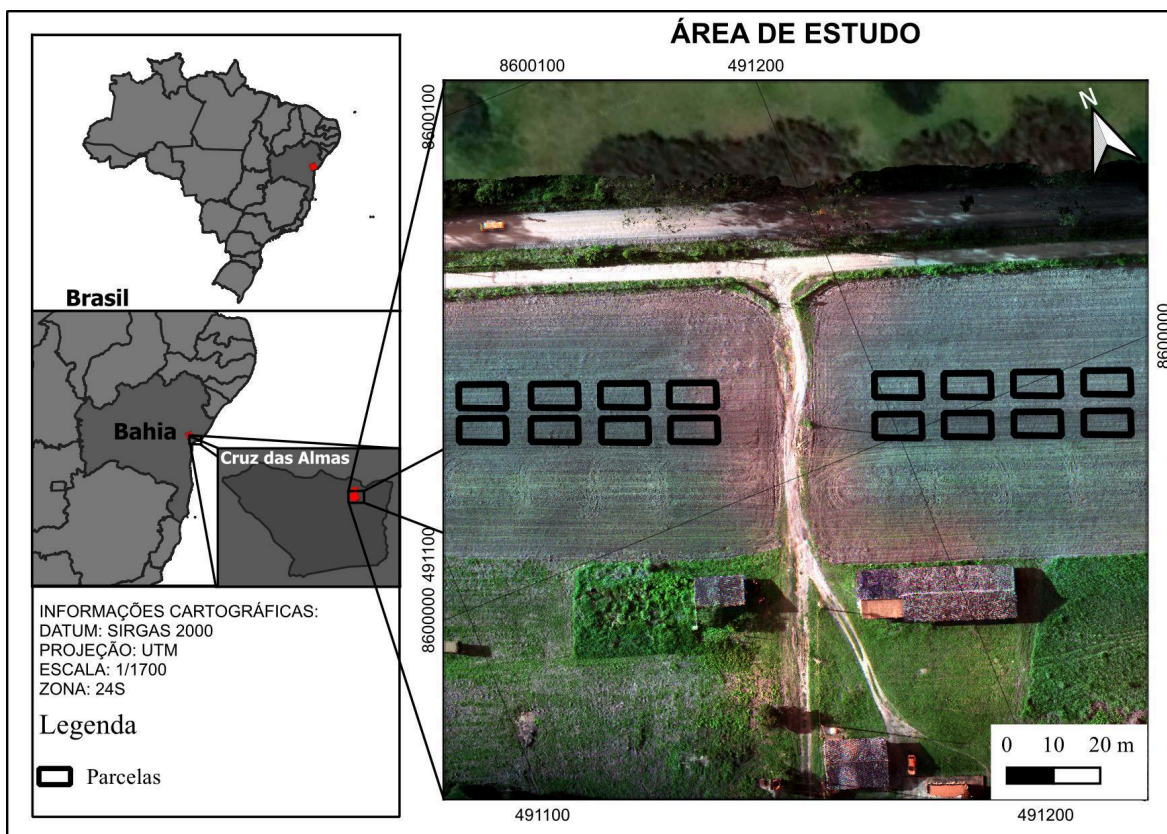
Desta forma, o objetivo deste estudo é avaliar o efeito da aplicação de *Trichoderma* sp. sobre variáveis agrônômicas e bromatológicas dos híbridos de milho Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU, tendo como a hipótese central deste que a inoculação com *Trichoderma* sp. promoverá efeitos positivos nas características dos híbridos estudados, apresentando respostas distintas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O experimento foi realizado na fazenda experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - (UFRB), localizada no campus de Cruz das Almas - BA, Figura 1.

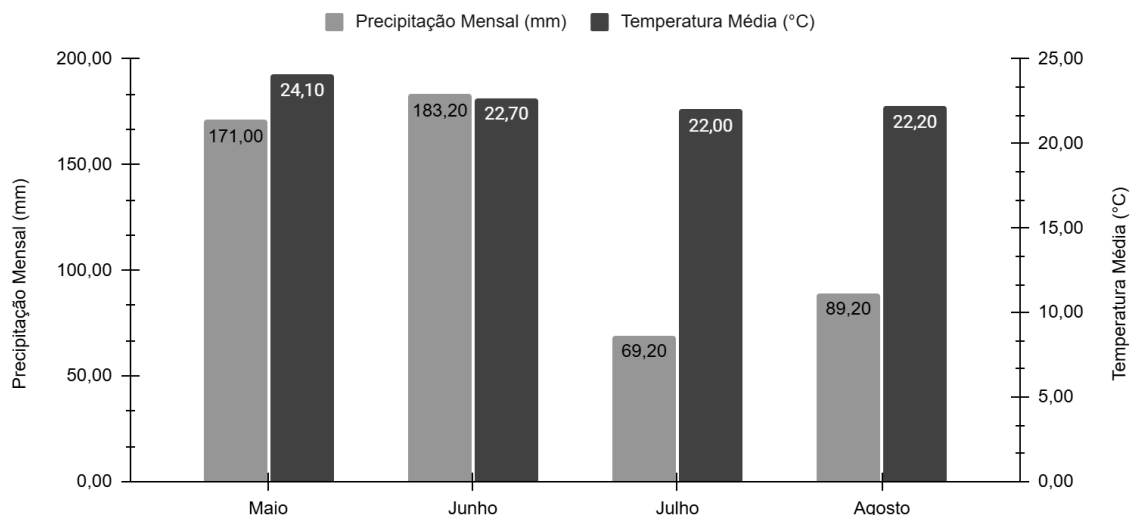
Figura 1. Delimitação da área de estudo (Cruz das Almas-BA)



Fonte: Arquivo Pessoal

De acordo com a estação meteorológica automática A406 do Instituto Nacional de Meteorologia, localizada no município de Cruz das Almas, nas coordenadas latitude $-12,675556$ e longitude $-39,089444$, a região apresenta temperatura média de e precipitação acumulada de $512,60$ mm para o período de maio a agosto de 2024 e temperatura média de $22,75$ °C para o mesmo período, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2. Precipitação pluviométrica e temperatura média para o período de maio a agosto de 2024 para o município de Cruz das Almas.



Fonte: INMET, 2024

Além disso, a área apresenta uma elevação média ao nível do mar de 200 metros e possui um clima Aw a Am, tropical quente e úmido de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2014).

2.2 Implantação da cultura

Para a implantação da cultura, procedeu-se ao preparo convencional do solo em uma área de 1,78 hectares (17.800 m²), a qual apresenta classificação física de Franco argilo arenoso. O preparo consistiu em uma aração, seguida de duas gradagens.

A adubação de base foi executada simultaneamente ao plantio no dia 24 de maio de 2024, utilizando-se uma plantadora adubadora, e seguiu as recomendações da análise química do solo da área (Tabela 1). Foram aplicados 200,00 kg.ha⁻¹ de cloreto de potássio 60% e 420,00 kg.ha⁻¹ de Super Simples 19%. A adubação de cobertura foi efetuada no estágio fenológico V4 da cultura, com a aplicação de 100 kg.ha⁻¹ de ureia.

Tabela 1. Resultado da análise química do solo utilizado antes da instalação do experimento

Profundidade (cm)	pH	P	K	Ca	Mg	Ca+Mg	Al	Na	H+AL	SB	CTC	V	MO
	H ₂ O	mg dm ⁻³					cmol/dm ³					%	g/kg
0 - 20	5,8	10	0,09	2,35	0,50	2,85	0,00	0,02	1,42	2,96	4,38	68,00	19,60
20 - 40	5,6	7	0,10	2,39	0,50	2,89	0,00	0,02	1,77	3,01	4,78	63,00	18,00

Fonte: EMBRAPA, 2024

Foram implantados dois híbridos comerciais de milho: Feroz VIP3 (Syngenta/NK Seeds) e Pioneer P3858PWU® (Corteva/Pioneer®), em densidade de 75.000 plantas ha⁻¹, espaçamento entre linhas de 0,6 m e espaçamento entre plantas no metro linear.

A formulação comercial de *Trichoderma* sp. utilizada no experimento foi adquirida junto ao fabricante, com a concentração de 5 x 10⁷ UFC/mL. O produto foi aplicado via pulverização foliar/solo, em dose de 5 L ha⁻¹, conforme recomendação técnica do fabricante. A aplicação ocorreu 7 dias após a emergência das plantas (7 DAE), no estágio fenológico V2, quando o sistema radicular passava por rápida expansão.

Para o controle de plantas daninhas, foram aplicados herbicidas aos 35 dias após a semeadura. Utilizou-se o herbicida Roundup Original® Mais (glifosato) na dose de 1,5 L ha⁻¹, e o herbicida Calaris® (mesotriona e atrazina) na dose de 1,0 L ha⁻¹.

2.3 Delineamento experimental

Para avaliar o efeito do fungo *Trichoderma* sp. sobre a resposta espectral dos híbridos, adotou-se o seguinte delineamento experimental: blocos casualizados em esquema fatorial 2 × 2, com quatro repetições. Os fatores foram: 1 - Híbrido, sendo o Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU. e 2 - Tratamento biológico, sendo com aplicação de *Trichoderma* sp. e sem aplicação.

Cada parcela experimental apresentou as seguintes dimensões 5 m × 10 m (50 m²) contendo 8 linhas com plantas em toda a extensão da linha. As quatro linhas internas de cada parcela foram consideradas como área útil (2,6 m × 8 m totalizando 20,80 m²), excluindo-se 1,20 m de bordadura em ambas

extremidades de cada parcela experimental.

2.4 Coleta das amostras amostras

Realizaram-se amostragens de três plantas representativas de estádio R5, para cada parcela, no dia 27 de agosto de 2024, separando-se e determinando-se a massa verde das diferentes partes da planta: folhas, colmos + pendão e espigas. Após a separação procedeu-se à determinação da massa fresca de cada componente. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 60 °C, por 72 h e pesadas, determinando-se o teor de matéria seca (MS) de cada uma das partes.

As análises posteriores foram realizadas no Laboratório de Bromatologia pertencente à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Posterior a determinação da MS das plantas, os materiais foram triturados e separados para determinação das frações fibrosas (FDN, FDA e Lignina), sendo confeccionados saquinhos de Tecido-Não-Tecido (TNT), com gramatura 100 g.m², com dimensões de 5 cm de comprimento por 5 cm de largura, o que corresponde a uma área de 25 cm².

A quantidade inicial de amostra em cada saquinho obedeceu a relação de 20 mg de matéria seca cm² de 11 superfície selada por calor, seguindo as recomendações feitas por Detmann et al. (2012).

Posteriormente, as amostras tiveram seus teores de MS avaliados conforme o método INCT-CA G-00311. A metodologia realizada nas análises da FDN, FDA e Lignina, seguiu as descrições feitas por Detmann et al. (2012) (FDN; Método INCT-CA F-001/1; FDA; Método INCT-CA F003/1; Lignina (INCT-CA no. F-005/1), sendo realizada análise sequencial da FDN, FDA e Lignina nas amostras.

2.5 Análise estatística

Os dados experimentais foram inicialmente submetidos à verificação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias, com a aplicação dos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. Ambos os pressupostos foram atendidos, permitindo o uso de modelos paramétricos.

Em seguida, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) em delineamento de blocos casualizados, com arranjo fatorial 2×2 , visando avaliar os efeitos principais dos fatores Híbrido e *Trichoderma* sp., bem como a interação entre os fatores. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software R, versão 4.5.0 (R CORE TEAM, 2024), e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Além da análise univariada, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP) com o objetivo de identificar padrões multivariados entre os tratamentos, agrupamentos naturais das variáveis e a contribuição de cada variável na separação dos grupos experimentais. A ACP foi conduzida com base na matriz de correlação das variáveis previamente padronizadas (z-score), visando equalizar as escalas de medição.

A ACP seguiu as etapas de: (i) normalização dos dados, (ii) cálculo da matriz de covariância, (iii) extração de autovalores e autovetores, A visualização dos resultados foi feita por meio de gráficos biplot, permitindo interpretar a distribuição dos tratamentos e a correlação entre as variáveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise de variância e teste de médias

A inoculação de *Trichoderma* sp. resultou em incrementos significativos em diversas variáveis avaliadas, conforme apresentado na Tabela 2 onde foram observados efeitos positivos dos tratamento sobre as variáveis: massa fresca da parte aérea, massa fresca do colmo, massa fresca da espiga, produtividade de massa fresca, massa seca da parte aérea, massa seca do colmo, massa seca da espiga, massa seca total e produtividade de massa seca para o fator *Trichoderma* sp., e massa verde do colmo para o fator híbrido ao teste de tukey ao nível de 5% de probabilidade, $p < 0,05$.

Tabela 2. Efeitos da Aplicação de *Trichoderma* sp. e Híbridos de Milho nas Variáveis avaliadas.

Variável	Híbrido		<i>Trichoderma</i> sp.			p-value Interação	CV (%)
	Feroz	Pioneer	p-value	Com	Sem		

MV Parte Aérea (g)	100,62 a	89,38 a	0,3302	119,38 a	70,63 b	0,0015 *	0,5099	23,01
MV Colmo (g)	261,88 a	187,5 b	0,0287 *	293,13 a	156,25 b	0,0009 *	0,1551	25,45
MV Espiga (g)	246,88 a	256,88 a	0,7575	299,38 a	204,38 b	0,0143 *	0,7869	24,94
MV Total (g)	2421,25 a	2236,87 a	0,5195	2402,50 a	2255,62 a	0,6062	0,2066	23,62
Prod MV (Kg.ha ⁻¹)	55859,37 a	48927,08 a	0,2647	65255,21 a	39531,25 b	0,0016 *	0,5147	22,25
MS Parte Aérea (g)	30,12 a	27,07 a	0,3304	34,46 a	22,73 b	0,0033 *	0,4566	20,74
MS Colmo (g)	54,76 a	42,17 a	0,1005	62,49 a	34,44 b	0,0027 *	0,2779	28,42
MS espiga (g)	94,68 a	102,28 a	0,5990	121,6 a	75,36 b	0,0091 *	0,8454	28,34
MS Total (g)	179,56 a	171,52 a	0,7116	218,54 a	132,54 b	0,0027 *	0,7316	24,00
Teor MS (%)	23,89 a	25,31 a	0,2605	23,67 a	25,53 a	0,1400	0,8863	9,57
Prod MS (kg ha ⁻¹)	13057,45 a	12250,96 a	0,5792	15331,06 a	9977,34 b	0,0040 *	0,6882	22,16

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey 5% de probabilidade de erro. MV = Massa Verde. MS = Massa Seca. Prod = Produtividade. CV = Coeficiente de Variação. * = Significativo.

Fonte: Arquivo pessoal

As plantas inoculadas com *Trichoderma* sp. tiveram valores superiores nas variáveis vegetativas e produtividade em comparação às plantas sem o bioinsumo. Ambos os híbridos responderam positivamente à inoculação, indicando que os efeitos benéficos do fungo não se restringem a um genótipo específico. Esses ganhos produtivos corroboram estudos prévios que reportam acréscimos de produtividade na cultura do milho mediante a aplicação de *Trichoderma* sp. (FU et al., 2020).

Akladius e Abbas (2012), verificaram que a inoculação com *T. harzianum* (estirpe T22) promoveu maior crescimento da raiz e da parte aérea do milho, refletindo-se em aumento no rendimento de grãos. De modo geral, a literatura indica ganhos na produtividade do milho associados à ação de *Trichoderma* sp., embora a magnitude exata depende das condições edafoclimáticas e do manejo.

Notavelmente, sob condições de estresse hídrico severo, os efeitos benéficos tendem a ser ainda mais pronunciados. (CSÓTÓ et al., 2024) relataram que a aplicação foliar de *Trichoderma* sp. chegou a dobrar a produtividade do milho em comparação ao controle em situação de seca.

Além das variáveis agronômicas de crescimento vegetativo e de produtividade previamente analisados, avaliou-se também os efeitos da

inoculação com *Trichoderma* sp. e sua interação com o genótipo sobre a qualidade bromatológica do milho. Para tanto, quantificaram-se os teores de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), lignina e hemicelulose, Tabela 3.

Tabela 3. Efeitos da Aplicação de *Trichoderma* sp. e Híbridos de Milho nas Variáveis de Qualidade Bromatológica.

Variável	Híbrido		p-value	<i>Trichoderma</i> sp.		p-value	p-value Interação	CV (%)
	Feroz	Pioneer		Com	Sem			
FDN (g.kg ⁻¹)	0,6631 a	0,6831 a	0,2222	0,6883 a	0,6579 a	0,2222	0,0640	4,53
Celulose (g.kg ⁻¹)	0,2724 a	0,2835 a	0,4250	0,2840 a	0,2776 a	0,6151	0,0359 *	4,23
Hemicelulose (g.kg ⁻¹)	0,3316 a	0,3479 a	0,0802	0,3499 a	0,3296 b	0,0361 *	0,5437	4,87
Lignina (g.kg ⁻¹)	0,0556 a	0,0544 a	0,8904	0,0585 a	0,0515 a	0,4441	0,1970	31,70

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey 5% de probabilidade de erro. FDN = Fibra em Detergente Neutro. FDA = Fibra em Detergente Ácido. CV = Coeficiente de Variação. * = Significativo.

Fonte: Arquivo pessoal

Observou-se por meio da análise estatística que o teor de fibra em detergente neutro (FDN) não apresentou diferença significativa nas variáveis híbrido ($p = 0,2222$) e na variável *Trichoderma* sp. ($p = 0,2222$), tampouco pela interação híbrido \times tratamento ($p = 0,0640$).

Em contraste com o comportamento uniforme observado para FDN, a celulose, tabela 4, apresentou uma interação significativa híbrido \times *Trichoderma* sp. ($p = 0,0359$), sem efeitos principais de híbrido ($p = 0,4252$) ou de inoculação ($p = 0,6151$).

Para compreender melhor essa interação, procedeu-se ao desdobramento da análise visando avaliar o efeito da inoculação em cada genótipo, tabela 4.

Tabela 4. Efeito da inoculação com *Trichoderma* sp. sobre o teor de celulose (g.kg⁻¹) em cada híbrido de milho

Híbrido	<i>Trichoderma</i> sp.	Média (g.kg ⁻¹)	CV (%)
Pioneer	Com	0,2895 a	0,0446*

Feroz	Com	0,2701 b	
Pioneer	Sem	0,2720 a	0,2793
Feroz	Sem	0,2815 a	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey 5% de probabilidade de erro. CV = Coeficiente de Variação. * = Significativo.

Fonte: Arquivo pessoal

Observou-se que, para o nível Com *Trichoderma* sp., o híbrido Pioneer apresentou teor de celulose significativamente maior do que Feroz, enquanto no nível Sem *Trichoderma* sp. ambos os híbridos não diferiram.

De forma complementar, realizou-se o desdobramento do efeito do genótipo em cada nível de inoculação, Tabela 5, o qual mostrou que, tanto em com quanto em sem *Trichoderma* sp., não houve diferença significativa entre Pioneer e Feroz, confirmando que a resposta diferenciada depende da combinação híbrido–bioinsumo e não de um efeito genotípico isolado.

Tabela 5. Comparação entre teor de celulose dos híbridos na presença e na ausência de inoculação com *Trichoderma* sp.

Híbrido	<i>Trichoderma</i> sp.	Média (g.kg ⁻¹)	CV (%)
Feroz	Com	0,2701 a	0,2028
Feroz	Sem	0,2815 a	
Pioneer	Com	0,2895 a	0,0651
Pioneer	Sem	0,2720 a	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey 5% de probabilidade de erro. CV = Coeficiente de Variação. * = Significativo.

Fonte: Arquivo pessoal

A hemicelulose apresentou aumento significativo nas plantas que foram submetidas a aplicação de *Trichoderma* sp. (0,3499 g) em comparação ao controle sem inoculação (0,3296 g; $p = 0,0361$).

Do ponto de vista nutricional, o aumento da hemicelulose tende a melhorar a digestibilidade da forragem, uma vez que tanto a celulose quanto a hemicelulose são degradadas e fermentadas pelos microrganismos ruminais

para formar ácidos graxos voláteis, enquanto a lignina permanece indigerível, assegurando a integridade estrutural do material foliar e a volumetria da biomassa (WEIMER et al., 2022).

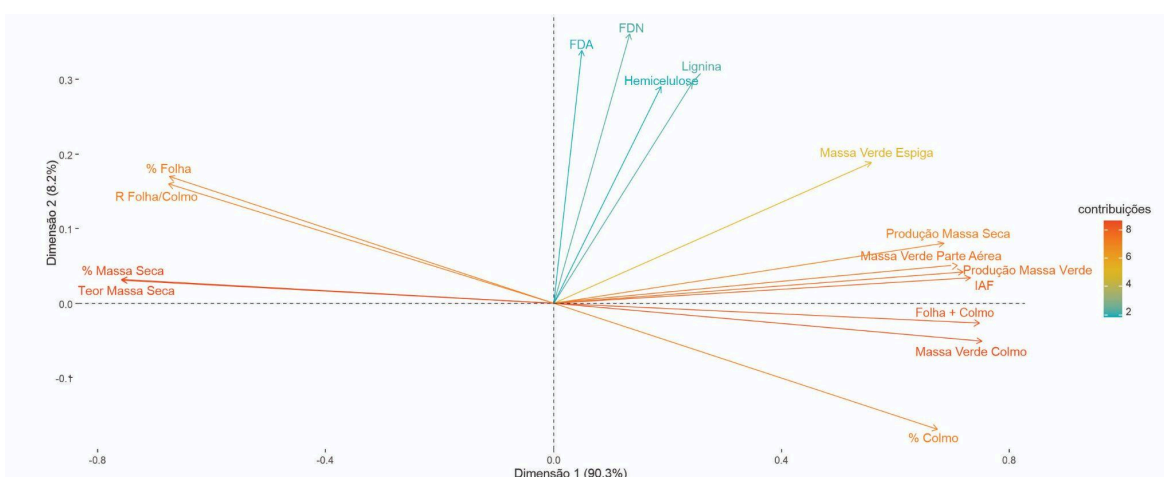
Já lignina, componente altamente recalcitrante, também não foi influenciada nem pelo híbrido ($p = 0,8904$) nem pelo tratamento ($p = 0,4441$) ou interação ($p = 0,1970$), indicando estabilidade dessa fração mesmo na presença do *Trichoderma* sp.

Desta forma, observa-se que a aplicação de *Trichoderma* sp. promove melhores resultados no que tange a qualidade bromatológica do milho, sobretudo por meio do aumento de hemicelulose, sem comprometer as frações mais rígidas da parede celular.

3.2 Análise de componentes principais

Além da análise de variância e do teste de Tukey, realizou-se uma Análise de Componentes Principais (ACP) com o objetivo de agrupar e sintetizar a informação contida nos 14 parâmetros agrônômicos e bromatológicos estudados. Os dois primeiros componentes explicaram 91,74 % da variância total (Dimensão 1 = 67,26 %; Dimensão 2 = 24,48 %), indicando que a maior parte do comportamento das variáveis pode ser representada em um bi-espço bidimensional, conforme apresentado na figura 3.

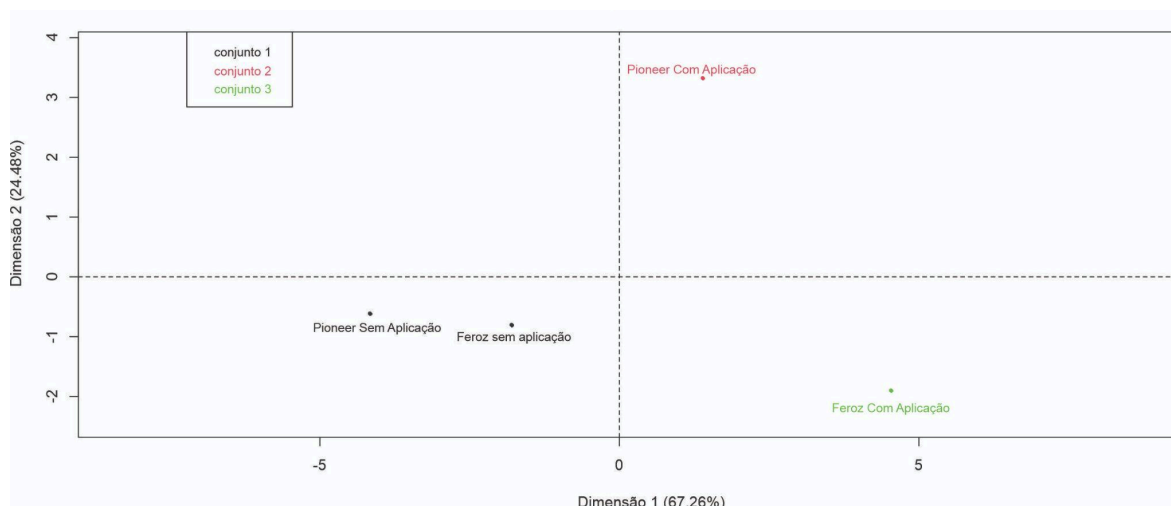
Figura 3. Gráfico Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis agrônômicas e bromatológicas em relação aos tratamentos.



Fonte: Arquivo pessoal

Observa-se que as métricas de crescimento vegetativo e de produtividade estão fortemente projetadas na dimensão 1, apontando para correlações positivas entre si. Já as frações correspondentes a parede celular (FDN, FDA, lignina e hemicelulose) se projetam principalmente ao longo da Dimensão 2, revelando um segundo eixo de variação independente, associado à qualidade bromatológica. No mapa de fatores, conforme apresentado na figura 4, os tratamentos se agruparam em três *clusters* bem definidos.

Figura 4. Mapa de fatores da ACP ilustrando a interação genótipo × aplicação de *Trichoderma* sp. em híbridos de milho.



Fonte: Arquivo pessoal

No mapa de fatores da ACP, Figura 3 identificou três grupos bem delineados ao longo das duas dimensões de maior variância.

O grupo 1, composto pelas parcelas-controle (Feroz sem *Trichoderma* sp. e Pioneer sem *Trichoderma* sp.), situa-se no quadrante inferior esquerdo (Dimensão 1 negativa; Dimensão 2 negativa), o que reflete desempenho produtivo reduzido e baixos teores de frações estruturais quando comparado com os demais tratamentos com a aplicação do *Trichoderma* sp..

Em oposição, o grupo 2, formado exclusivamente por Pioneer com aplicação de *Trichoderma* sp., localiza-se na parte superior central do gráfico (Dimensão 1 próxima de zero; Dimensão 2 positiva), indicando produtividade

superior quando comparado com os tratamentos sem a aplicação acompanhada de maior qualidade bromatológica.

Para o grupo 3, observa-se o híbrido Feroz com aplicação de *Trichoderma* sp., no quadrante inferior direito (Dimensão 1 positiva; Dimensão 2 negativa), evidenciando expressivos ganhos em produtividade com manutenção de níveis moderados para as variáveis relacionadas a qualidade bromatológica.

Esse arranjo espacial na ACP evidência respostas híbrido–bioinsumo distintas: o tratamento Pioneer com aplicação desloca-se sobretudo ao longo da Dimensão 2, eixo vertical, indicando maior acúmulo das frações estruturais da parede celular (FDN, FDA, lignina e hemicelulose) sem elevação proporcional na produtividade, Dimensão 1 próxima de zero. Em contrapartida, o Feroz com aplicação avança principalmente ao longo da Dimensão 1, eixo horizontal, refletindo ganhos expressivos em massa verde e massa seca, enquanto preserva níveis médios das frações estruturais, Dimensão 2 negativa.

Esses padrões ressaltam que a aplicação de *Trichoderma* sp. atua de forma genótipo-dependente, ora enfatizando a modulação da composição da parede celular, ora maximizando o vigor produtivo sem comprometer a integridade estrutural (ARISPE, VÁZQUEZ-CADENA e ZAMUDIO, 2023).

4. CONCLUSÃO

O *Trichoderma* sp. promoveu incrementos em diversas variáveis vegetativas e de produtividade, como massa verde e massa seca da parte aérea, colmo, espiga, e produtividade geral. Além disso, a aplicação do bioinsumo resultou em um aumento significativo no teor de hemicelulose.

A análise de componentes principais (ACP) revelou padrões genótipo-dependentes na resposta ao bioinsumo. O híbrido Pioneer, com aplicação do *Trichoderma* sp., demonstrou maior acúmulo das frações estruturais da parede celular. Em contrapartida, o híbrido Feroz com *Trichoderma* sp. apresentou ganhos expressivos em massa verde e massa seca. Essa diferenciação ressalta que a ação do *Trichoderma* sp. pode ser modulada pelo genótipo do milho.

Para futuras pesquisas, sugere-se aprofundar a investigação sobre os mecanismos moleculares e fisiológicos específicos que regulam as respostas genótipo-dependentes dos híbridos de milho à inoculação com *Trichoderma* sp. ao longo de todo o ciclo da cultura, proporcionando uma modelagem preditiva acerca do comportamento e do desenvolvimento da cultura submetida ao bioinsumo.

5. REFERÊNCIAS

AKLADIOUS, S. A.. Application of *Trichoderma harzianum* T22 as a biofertilizer supporting maize growth. **African Journal of Biotechnology**, v. 11, n. 35, 1 maio 2012. doi:10.5897/ajb11.4323. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/ajb11.4323>. Acesso em: 18 jul. 2025.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G.. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, dez. 2013. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 18 jul. 2025.

ARISPE-VÁZQUEZ, J. L.; SÁNCHEZ-ARIZPE, A.; CADENA-ZAMUDIO, D. A.; GALINDO-CEPEDA, M. E.; NORIEGA-CANTÚ, D. H.; BARRÓN-BRAVO, O. G.; CARNERO-AVILÉS, L.; MAYO-HERNÁNDEZ, J.; RAMÍREZ-SÁNCHEZ, S. E.; ANTONIO-BAUTISTA, A.. The Beneficial Effect of *Trichoderma* spp. in Seed Treatment of Four Maize (*Zea mays* L.) Genotypes. **American Journal of Plant Sciences**, v. 14, n. 6, p. 625–637, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ajps.2023.146042>. Acesso em: 21 jul. 2025.

CLOUSE, K. M.; ELLIS, M. L.; FORD, N. E.; HOSTETLER, R.; BALINT-KURTI, P. J.; KLEINER, M.; WAGNER, M. R. The interaction between abiotic and biotic soil factors drive heterosis expression in maize. **bioRxiv**, 30 ago. 2024. Disponível em: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2024.08.30.610574v1>. Acesso em: 22 jul. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safra de grãos está estimada em 332,9 milhões de toneladas influenciada por boa produção de soja, milho e arroz.** 15 mai. 2025. Disponível em:

<https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-de-graos-esta-estimada-em-332-9-milhoes-de-toneladas-influenciada-por-boa-producao-de-soja-milho-e-arroz>. Acesso em: 04 jun. 2025.

CSÓTÓ, A.; TÓTH, G.; RICZU, P.; ZABIÁK, A.; TARJÁNYI, V.; FEKETE, E.; KARAFFA, L.; SÁNDOR, E. Foliar spraying with endophytic *Trichoderma* biostimulant increases drought resilience of maize and sunflower. **Agriculture**, v. 14, Art. 2360, 2024. doi:10.3390/agriculture14122360. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122360>. Acesso em: 18 jul. 2025.

DAWAR, K.; KHAN, A.; MIAN, I. A.; KHAN, B.; ALI, S.; AHMAD, S.; SZULC, P.; FAHAD, S.; DATTA, R.; HATAMLEH, A.A.; AL-DOSARY, M. A.; DANISH, Subhan. Maize productivity and soil nutrients variations by the application of vermicompost and biochar. **PLOS ONE**, v. 17, n. 5, p. e0267483, 11 maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267483>. Acesso em: 22 jul. 2025.

DETMANN, E.; SOUZA, M. A.; VALADARES FILHO, S. C.; QUEIROZ, A. C.; BERCHIELLI, T. T.; SALIBA, E. O. S.; CABRAL, L. S.; PINA, D. S.; LADEIRA, M. M.; AZEVEDO, J. A. G. (Eds.). **Métodos para análise de alimentos**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2012. 214 p.

DUTTA, R.; KUMAR, S.; JAYALAKSHMI, K.; RADHAKRISHNA, A.; BHAGAT, K.; GOWDA, D. C. M.; KARUPPAIAH, V.; BHANDARI, H. R.; BOMBLE, R.; GURAV, V.; MAHAJAN, V.; SINGH, M.. Potential of *Trichoderma* strains to positively modulate plant growth processes and bulb yield in Rabi onion. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, Art. 1427303, 19 set. 2024. doi:10.3389/fsufs.2024.1427303. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1427303>. Acesso em: 18 jul. 2025.

FU, J.; XIAO, Y.; LIU, Z.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; YANG, K.. *Trichoderma asperellum* improves soil microenvironment in different growth stages and yield

of maize in saline-alkaline soil of the Songnen Plain. **Plant, Soil and Environment**, v. 66, n. 12, p. 639–647, 2 dez. 2020. doi:10.17221/456/2020-pse. Disponível em: <https://doi.org/10.17221/456/2020-pse>. Acesso em: 18 jul. 2025.

HERNÁNDEZ, N. A. L.; SIFUENTES, A. R. M.; HALECKI, W.; CACIANO, R. T.; MORENO, V. M. R.. An assessment of the impact of climate change on maize production in Northern Mexico. **Atmosphere**, v. 16, n. 4, p. 455, 15 abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos16040455>. Acesso em: 22 jul. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **BDMEP**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 18 jul. 2025.

JING, L.; WENG, B.; YAN, D.; ZHANG, S.; BI, W.; YAN, S.. The persistent impact of drought stress on the resilience of summer maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 25 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1016993>. Acesso em: 22 jul. 2025.

JONES, P.; THORNTON, P. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. **Global Environmental Change**, v. 13, n. 1, p. 51–59, abr. 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(02\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(02)00090-0). Acesso em: 22 jul. 2025.

KUMAR, K.; SINGH, J.; SINGH, B. R.; CHANDRA, S.; CHAUHAN, N.; YADAV, M. K.; KUMAR, P.. Consumption and processing patterns of maize (*Zea mays*): a review. **The Pharma Innovation Journal**, v. 11, n. 5, p. 51–57, 2022. Disponível em: <https://www.thepharmajournal.com/archives/2022/vol11issue5/PartA/11-5-217-445.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

LI, L.; ZENG, X.; CHEN, J.; TIAN, J.; HUANG, J.; SU, S.. Genome sequence of the fungus *Trichoderma asperellum* SM-12F1 revealing candidate functions of growth promotion, biocontrol, and bioremediation. **PhytoFrontiers**, v. 1, n. 3, p. 239–243, 3 ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1094/PHYTOFR-12-20-0052-A>. Acesso em: 22 jul. 2025.

MAITRA, S.; BRESTIC, M.; BHADRA, P.; SHANKAR, T.; PRAHARAJ, S.; PALAI, J. B.; SHAH, M. M. R.; BAREK, V.; ONDRISIK, P.; SKALICKÝ, M.; HOSSAIN, A.. Bioinoculants—Natural Biological Resources for Sustainable Plant Production.

Microorganisms, v. 10, n. 1, p. 51, 27 dez. 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/microorganisms10010051>. Acesso em: 22 jul. 2025.

MARTÍNEZ-MEDINA, A.; ALGUACIL, M. D. M.; PASCUAL, J. A.; VAN WEES, S. C. M. Phytohormone profiles induced by *Trichoderma* isolates correspond with their biocontrol and plant growth-promoting activity on melon plants. **Journal of Chemical Ecology**, v. 40, n. 7, p. 804–815, jul. 2014. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s10886-014-0478-1>. Acesso em: 22 jul. 2025.

MILIND, P.; DHAMIJA, I.. Zea maize: a modern craze. **International Research Journal of Pharmacy**, v. 4, n. 6, p. 39–43, 5 jul. 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.7897/2230-8407.04609>. Acesso em: 22 jul. 2025.

RAGLIN, S. S.; FAVELA, A.; LASPISA, D.; WALLACE, J. G. Manipulating the maize (*Zea mays*) microbiome. **Cold Spring Harbor Protocols**, 5 set. 2024.

Disponível em: <https://doi.org/10.1101/pdb.prot108584>. Acesso em: 22 jul. 2025.

REHMAN, F. Ur; ADNAN, M.; KALSOOM, M.; NAZ, N.; HUSNAIN, M. Ghayoor; ILAHI, H.; ILYAS, M. A.; YOUSAF, G.; TAHIR, R.; AHMAD, U.. Seed-Borne Fungal Diseases of Maize (*Zea mays* L.): A Review. **Agriinula: Jurnal Agroteknologi dan Perkebunan**, v. 4, n. 1, p. 43–60, 12 fev. 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.36490/agri.v4i1.123>. Acesso em: 22 jul. 2025.

REN, H.; HAN, K.; LIU, Y.; ZHAO, Y.; ZHANG, L.; HE, Q.; LI, Z.; ZHANG, J.; LIU, P.; WANG, H.; ZHANG, J.; ZHAO, B.. Improving smallholder farmers' maize yields and economic benefits under sustainable crop intensification in the North China Plain. **Science of the Total Environment**, p. 143035, out. 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143035>. Acesso em: 22 jul. 2025.

RODRIGUES, A. O.; MAY DE MIO, L. L.; SOCCOL, C. R. Trichoderma as a powerful fungal disease control agent for a more sustainable and healthy agriculture: recent studies and molecular insights. **Planta**, v. 257, n. 2, 5 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00425-022-04053-4>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SHARMA, I.; RAINA, A.; CHOUDHARY, M.; APRA; KAUL, S.; DHAR, M. K. Fungal endophyte bioinoculants as a green alternative towards sustainable agriculture. **Heliyon**, v. 9, p. e19487, ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19487>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SILVA, J. M.; DALBON, V. A.; ALVES, A. C.; ATAÍDE, C. B.; SANTOS, T. M. C.; COSTA, M. E. L.; MONTALDO, Y. C.. Bioinputs in sustainable agriculture: benefits, challenges, and pathways for resilient farming systems. **Asian Journal of Research in Crop Science**, v. 10, n. 2, p. 85–97, 21 abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/ajrcs/2025/v10i2354>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SINGH, G. M.; GOSAVI, G.; SRINATHAREDDY, S.; PATEL, S. S.; SOLANKI, P. S.; ZHANG, F.; XU, J.; MISHRA, V. K.; SHARMA, S.. Impact of drought on maize yield and exploration of in-situ maize crop genetic resources for drought tolerance. **Preprints.org**, 2022. Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/202212.0210/v1>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SUBHALAKSHMI, T.; SINGH, R. K. I.. Trichoderma: a beneficial organism for agriculture. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 11, n. 1, p. 440–444, 10 jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2022.1101.055>. Acesso em: 22 jul. 2025.

VIDOTTI, M. S.; MATIAS, F. I.; ALVES, F. C.; PÉREZ-RODRÍGUEZ, P.; BELTRAN, G. A.; BURGUEÑO, J.; CROSSA, J.; FRITSCHÉ-NETO, R.. Maize responsiveness to *Azospirillum brasilense*: insights into genetic control, heterosis and genomic prediction. **PLOS ONE**, v. 14, n. 6, p. e0217571, 7 jun. 2019.

Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217571>. Acesso em: 22 jul. 2025.

VOLKE-HALLER, V. H.; ORTÍZ-MONASTERIO, I.; SÁNCHEZ-ROLDÁN, M. M.; ETCHEVERS-BARRA, J. D. Generating nitrogen recommendations for maize: economic considerations. **Agrociencia**, v. 58, n. 2, 19 mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i2.2935>. Acesso em: 22 jul. 2025.

WEIMER, P. J. Degradation of Cellulose and Hemicellulose by Ruminant Microorganisms. **Microorganisms**, v. 10, n. 12, p. 2345, 27 nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122345>. Acesso em: 19 jul. 2025.

WEI, Q.; ZHANG, X.; YANG, F.; DUAN, S.; FAN, Z.; NIE, P.; CHEN, Z.; JIANMENG. Future range shifts in major maize insect pests suggest their increasing impacts on global maize production. **Insects**, v. 16, n. 6, p. 568, 28 maio 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/insects16060568>. Acesso em: 22 jul. 2025.

CAPÍTULO 3

UTILIZAÇÃO DE IMAGEAMENTO MULTIESPECTRAL PARA AVALIAÇÃO DE VARIÁVEIS AGRONÔMICAS EM CAMPO PARA A CULTURA DO MILHO SOB APLICAÇÃO DE *TRICHODERMA* sp.

UTILIZAÇÃO DE IMAGEAMENTO MULTIESPECTRAL PARA AVALIAÇÃO DE VARIÁVEIS AGRONÔMICAS EM CAMPO PARA A CULTURA DO MILHO SOB APLICAÇÃO DE *Trichoderma* sp.

RESUMO

A agricultura de precisão tem impulsionado a adoção de tecnologias de sensoriamento remoto para otimizar o monitoramento de culturas, visando uma gestão mais eficiente e sustentável. Objetivou-se a partir deste estudo avaliar as correlações entre índices de vegetação multiespectrais em dois híbridos de milho submetidos a aplicação do *Trichoderma* sp, e um conjunto de variáveis agronômicas e bromatológicas. O experimento foi conduzido na fazenda experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), em Cruz das Almas-BA, utilizando um delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 2x2. Os fatores consistiram em dois híbridos comerciais de milho (Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU) e dois tratamentos biológicos (com e sem aplicação de *Trichoderma* sp.), com quatro repetições cada. As imagens multiespectrais foram capturadas por um VANT DJI Phantom P4 Multiespectral, a partir das quais foram calculados os índices de vegetação de diferença normalizada (NDVI), verde (GNDVI) e da borda vermelha (NDRE). As coletas de dados agronômicos em campo e os sobrevoos foram realizados simultaneamente no dia 27 de agosto de 2024, quando a cultura se encontrava no estágio fenológico R5. Foram mensuradas variáveis como massa verde e seca dos componentes da planta (colmo, folha, espiga), peso verde total (PVT), massa seca total (MST), além de componentes da parede celular como Fibra em Detergente Neutro (FDN), Fibra em Detergente Ácido (FDA) e Lignina. As relações entre os dados foram quantificadas por meio da correlação de Pearson (r) em software R. Os índices espectrais apresentaram correlações significativas com as variáveis de campo, contudo, os padrões de correlação variaram de forma distinta entre os híbridos. Para o híbrido Feroz, na presença de *Trichoderma* sp., os índices NDVI, GNDVI e NDRE mostraram correlações negativas com o PVT e com os componentes fibrosos (lignina e FDA). Na ausência do microrganismo, o sinal da correlação com lignina e FDA inverteu-se para positivo. Em contrapartida, para o híbrido Pioneer com *Trichoderma* sp., os índices apresentaram correlações fortemente positivas com lignina, FDN e FDA, um comportamento oposto ao observado no híbrido Feroz. Sem o bioinsumo, o híbrido Pioneer exibiu o padrão espectral esperado, com correlações positivas entre os índices e a biomassa, e negativas com a lignina. Conclui-se que o imageamento multiespectral obtido por VANT demonstrou ser uma ferramenta eficaz, apresentando correlações significativas entre os índices NDVI, GNDVI e NDRE e as variáveis agronômicas e bromatológicas analisadas.. A aplicação de *Trichoderma* sp. modifica a assinatura espectral da cultura, e a natureza dessa modificação é dependente da interação específica entre o microrganismo e o genótipo do híbrido.

Palavras-chaves: Agricultura de Precisão, GNDVI, NDVI, NDRE, VANT.

USE OF MULTISPECTRAL IMAGING FOR THE EVALUATION OF AGRONOMIC VARIABLES IN THE CORN CROP UNDER THE APPLICATION OF *Trichoderma* sp.

ABSTRACT

Precision agriculture has driven the adoption of remote sensing technologies to optimize crop monitoring, aiming for more efficient and sustainable management. The objective of this study was to evaluate the correlations between multispectral vegetation indices in two maize hybrids subjected to the application of *Trichoderma* sp. and a set of agronomic and bromatological variables. The experiment was conducted at the experimental farm of the Federal University of Recôncavo da Bahia (UFRB), in Cruz das Almas, BA, using a randomized complete block design in a 2x2 factorial scheme. The factors consisted of two commercial maize hybrids (Feroz VIP3 and Pioneer P3858PWU) and two biological treatments (with and without *Trichoderma* sp. application), with four replications each. Multispectral images were captured by a DJI Phantom P4 Multispectral UAV, from which the normalized difference (NDVI), green (GNDVI), and red-edge (NDRE) vegetation indices were calculated. Field agronomic data collection and drone flights were carried out simultaneously on August 27, 2024, when the crop was at the R5 phenological stage. Variables such as green and dry mass of plant components (stalk, leaf, ear), total green weight (TGW), total dry mass (TDM), as well as cell wall components like Neutral Detergent Fiber (FDN), Acid Detergent Fiber (FDA), and Lignin were measured. The relationships between the data were quantified using Pearson's correlation (r) in R software. The spectral indices showed significant correlations with the field variables; however, the correlation patterns varied distinctly between the hybrids. For the Feroz hybrid, in the presence of *Trichoderma* sp., the NDVI, GNDVI, and NDRE indices showed negative correlations with TGW and with fibrous components (lignin and FDA). In the absence of the microorganism, the sign of the correlation with lignin and FDA inverted to positive. In contrast, for the Pioneer hybrid with *Trichoderma* sp., the indices showed strongly positive correlations with lignin, NDF, and ADF, an opposite behavior to that observed in the Feroz hybrid. Without the bio-input, the Pioneer hybrid exhibited the expected spectral pattern, with positive correlations between the indices and biomass, and negative correlations with lignin. It is concluded that multispectral imaging obtained by UAV proved to be an effective tool, showing significant correlations between the NDVI, GNDVI, and NDRE indices and the analyzed agronomic and bromatological variables. The application of *Trichoderma* sp. modifies the crop's spectral signature, and the nature of this modification is dependent on the specific interaction between the microorganism and the hybrid's genotype.

Keywords: Precision Agriculture, GNDVI, NDVI, NDRE, UAV.

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays L.*) é uma das principais culturas alimentares globais, com produção mundial superior a 1,1 bilhão de toneladas em 2023 (EICHOLZ, et al, 2023). O Brasil se destaca como o terceiro maior produtor mundial, com uma produção estimada em aproximadamente 126,9 milhões de toneladas na safra 2024/2025, impulsionado por seu potencial de expansão agrícola (CONAB, 2025; ANTOLIN et al., 2025).

Na região Nordeste, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024) registrou uma produção de 9,7 milhões de toneladas na safra 2023/2024, com destaque para Bahia (4,0 milhões de toneladas), Maranhão (2,7 milhões de toneladas) e Piauí (2,1 milhões de toneladas).

Tradicionalmente, o monitoramento de lavouras baseia-se em técnicas convencionais, como inspeções visuais, amostragens pontuais e avaliações agronômicas diretas no campo. Tais métodos, apesar de consolidados, revelam-se onerosos e demorados em grandes áreas, além de estarem sujeitos a vieses humanos e a variações na frequência de amostragem (KUMAR, et al., 2021). Como consequência, torna-se difícil obter informações contínuas e em alta resolução espacial para subsidiar decisões de manejo em tempo hábil. Visando solucionar essa problemática diversas tecnologias e sistemas vêm sendo estudadas e aplicadas no monitoramento agrícola (YEHOSHUA; EDAN, 2023).

Nos últimos anos, as ferramentas de sensoriamento remoto têm se destacado como alternativas para uma melhor eficiência no monitoramento agrícola. Plataformas espaciais, veículos tripulados e, sobretudo, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) equipados com sensores ópticos oferecem possibilidades de aquisição rápida e não destrutiva de dados (GETAHUN, KEFALE E GELAYE, 2024). Essas tecnologias permitem mapear atributos fisiológicos das plantas em escalas de detalhe que antes exigiam esforços logísticos consideráveis (ZHANG, et al, 2025).

Entre as soluções disponíveis, o imageamento multiespectral por VANTs apresenta vantagens significativas: alta resolução espacial, flexibilidade de voo e capacidade de captar reflectâncias em bandas específicas do espectro eletromagnético (SANKARARAO, RAJAKSMI e CHOUDHARU, 2024; ZHONG et

al, 2020). A operação de drones reduz custos operacionais e facilita a repetição de voos em diferentes estádios fenológicos, viabilizando monitoramento temporal detalhado das condições da cultura (KALISCHUK et al., 2019)..

Os índices de vegetação derivam-se de combinações matemáticas entre bandas espectrais, servindo como proxies para variáveis fisiológicas e bioquímicas das plantas (PARIDA, et al., 2024). O Índice de Diferença Normalizada de Vegetação (NDVI), calculado a partir das bandas de infravermelho próximo e vermelho, é amplamente utilizado para estimar vigor e área foliar (FERNANDES, 2016; FERNANDES, 2023). Já o Índice de Diferença Normalizada de Vegetação Verde (GNDVI) troca a banda vermelha pela banda verde, apresentando maior sensibilidade a variações de clorofila em dosséis densos, biomassa e sanidade (MELLO et al, 2019).

O Índice da Diferença Normalizada da Borda Vermelha (NDRE) substitui a banda vermelha pela banda red-edge, oferecendo melhor correlação com teor de clorofila e estresse nutricional, sobretudo em fases intermediárias e avançadas da cultura (OLIVEIRA, 2017). Assim, a combinação de diferentes índices como o NDVI, GNDVI e NDRE possibilita avaliar a cultura de uma forma ampla.

Na vertente das novas tecnologias a integração de bioinsumos, como o fungo benéfico *Trichoderma* sp., com plataformas digitais de sensoriamento remoto representa uma vertente inovadora na agricultura de precisão. Enquanto *Trichoderma* sp. estimula o sistema radicular e modula respostas de defesa, os índices multiespectrais permitem quantificar, de forma rápida e não destrutiva, efeitos sobre o vigor e a sanidade da cultura.

Estudos recentes têm correlacionado índices obtidos por sensores embarcados em VANTs com parâmetros fenológicos e agronômicos do milho, demonstrando a viabilidade de prever variáveis como massa seca, massa verde, produtividade de grãos e altura de plantas (YANG et al., 2022), (CHIVASA et al., 2021), (GUO et al., 2024). No entanto, apesar dos avanços na utilização de índices de sensores embarcados em VANTs para avaliação de culturas, nenhum progresso significativo foi relatado na correlação entre índices espectrais e variáveis agronômicas e bromatológicas em tratamentos com produtos biológicos e em diferentes híbridos.

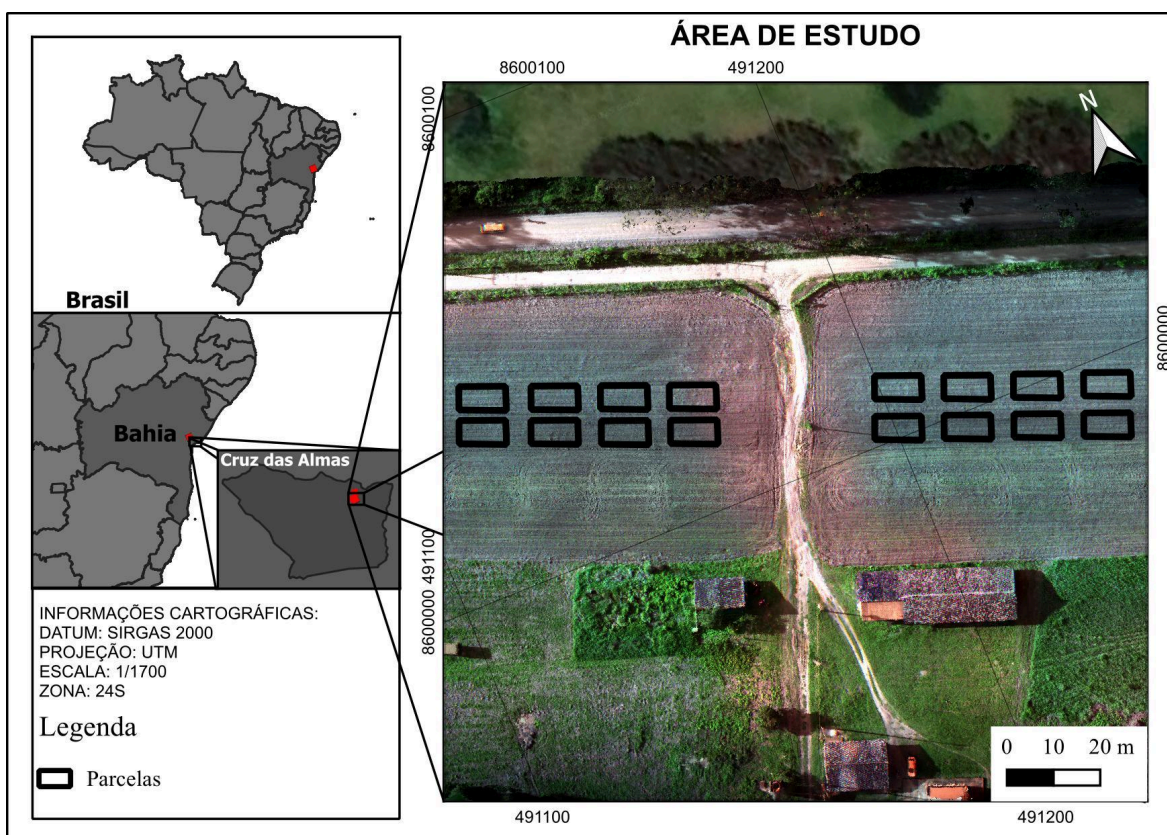
Este trabalho busca preencher essa lacuna, testando a hipótese de que índices multiespectrais extraídos de imagens de VANT podem ter correlações significativas com variáveis agronômicas e bromatológicas de campo. Objetivando-se assim avaliar as possíveis correlações entre os índices espectrais NDVI, GNDVI e NDRE, obtidos por imageamento multiespectral de VANT, e as variáveis agronômicas e bromatológicas medidas em campo, para os híbridos Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU inoculados com *Trichoderma* sp.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O experimento foi realizado na fazenda experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), localizada no campus de Cruz das Almas, Bahia, conforme apresentado na figura 1.

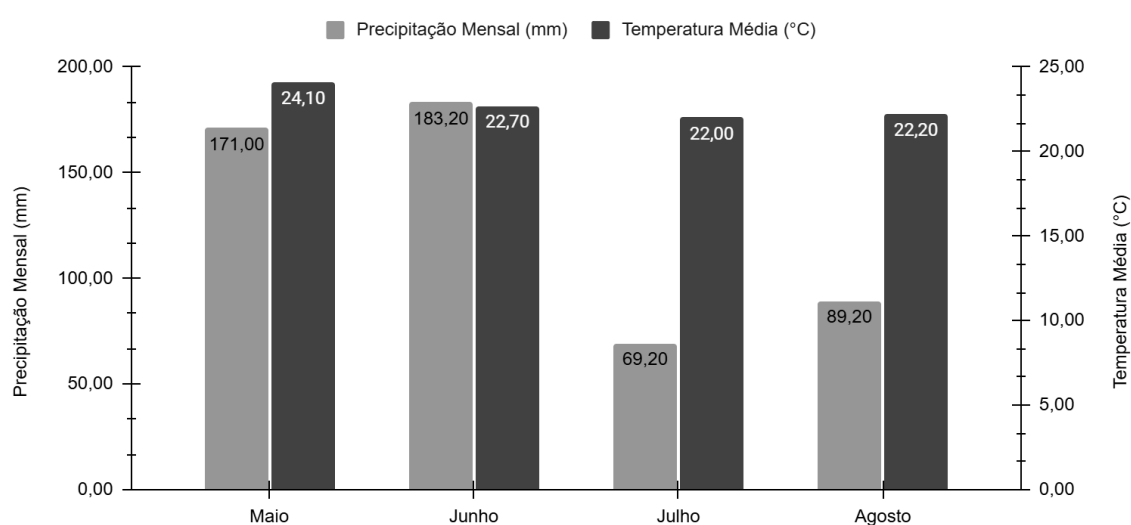
Figura 1. Delimitação da área de estudo (Cruz das Almas-BA)



Fonte: Arquivo Pessoal

De acordo com dados da estação meteorológica automática A406 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situada no município de Cruz das Almas, nas coordenadas geográficas de latitude $-12,675556^{\circ}$ e longitude $-39,089444^{\circ}$, a região registrou uma temperatura média de $22,75^{\circ}\text{C}$ e uma precipitação acumulada de $512,60\text{ mm}$ para o período de maio a agosto de 2024, conforme demonstrado na figura 2.

Figura 2. Precipitação pluviométrica e temperatura média para o período de maio a agosto de 2024 para o município de Cruz das Almas.



Fonte: INMET, 2024

Além disso, a área de estudo possui uma elevação média de 200 metros acima do nível do mar. O clima local é classificado como Aw a Am, caracterizado como tropical quente e úmido, conforme a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2014).

2.2 Implantação da cultura

A implantação da cultura iniciou-se com o preparo convencional do solo em uma área de 17.800 m^2 (1,7 hectares). Esse processo envolveu uma aração, seguida de duas gradagens.

A adubação de base foi realizada simultaneamente à etapa de plantio, utilizando uma plantadora adubadora. A formulação e as quantidades dos

fertilizantes foram definidas com base na análise química do solo da área, conforme detalhado na Tabela 1. Especificamente, foram aplicados 200 kg.ha⁻¹ de cloreto de potássio, 400 kg.ha⁻¹ de Super Simples e 100 kg.ha⁻¹ de uréia aplicada de forma fracionada. As características físico-químicas do solo da área de estudo indicam uma classificação de franco-argilo-arenoso.

Tabela 1. Resultado da análise química do solo utilizado antes da instalação do experimento

Profundidade (cm)	pH	P	K	Ca	Mg	Ca+Mg	Al	Na	H+AL	SB	CTC	V	MO
	H ₂ O	mg.dm ⁻³					cmol/dm ⁻³					%	g.kg ⁻¹
0 - 20	5,8	10	0,09	2,35	0,50	2,85	0,00	0,02	1,42	2,96	4,38	68,00	19,60
20 - 40	5,6	7	0,10	2,39	0,50	2,89	0,00	0,02	1,77	3,01	4,78	63,00	18,00

Fonte: EMBRAPA, 2024

Foram implantados dois híbridos comerciais de milho: Feroz VIP3 (Syngenta/NK Seeds) e Pioneer P3858PWU® (Corteva/Pioneer®). A densidade de semeadura foi de 75.000 plantas ha⁻¹, com espaçamento entre linhas de 0,6 m e 0,22 m entre plantas.

A formulação comercial de *Trichoderma* sp. utilizada no experimento foi adquirida diretamente do fabricante, apresentando uma concentração de 5 x 10⁷ UFC mL⁻¹. O produto foi aplicado via pulverização foliar e no solo, na dose de 5 L ha⁻¹, seguindo a recomendação técnica do fabricante. Esta aplicação ocorreu aos 7 dias após a emergência das plantas (7 DAE), quando as plantas se encontravam no estágio fenológico V4 e o sistema radicular passava por um período de rápida expansão.

Para o controle de plantas daninhas, foram aplicados herbicidas aos 35 dias após a semeadura. Utilizou-se o herbicida Roundup Original® Mais (glifosato) na dose de 1,5 L ha⁻¹, e o herbicida Calaris® (mesotriona e atrazina) na dose de 1,0 L ha⁻¹.

2.3 Delineamento experimental

Para avaliar o efeito do fungo *Trichoderma* sp. sobre a resposta espectral dos híbridos, adotou-se o delineamento experimental em blocos casualizados

sob esquema fatorial 2×2 , com quatro repetições. Os fatores foram: Híbrido de milho, sendo o Feroz VIP3 e Pioneer P3858PWU. e Uso de bioinsumo, com aplicação de *Trichoderma* sp. e sem aplicação.

Cada parcela experimental apresentou as dimensões 5 m \times 10 m (50 m²) contendo 8 linhas com plantas em toda a extensão da linha. As quatro linhas internas de cada parcela foram consideradas como área útil (2,6 m \times 8 m totalizando 20,80 m²), excluindo-se 1,20 m de bordadura em ambas extremidades de cada parcela experimental.

2.4 Coleta e análise das amostras

Amostragens de três plantas representativas foram realizadas por parcela no dia 27 de agosto de 2024, quando as plantas se encontravam no estágio fenológico R5. As plantas foram separadas em folhas, colmos + pendão e espigas, e a massa verde de cada componente foi determinada. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa de ventilação forçada a 60 °C por 72 h e pesadas para a determinação do teor de matéria seca (MS) de cada parte.

As análises laboratoriais subsequentes foram conduzidas no Laboratório de Bromatologia da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Após a determinação da MS das plantas, os materiais foram triturados e preparados em peneira de 2 mm para a determinação das frações fibrosas (FDN, FDA e Lignina). Para isso, foram confeccionados saquinhos de tecido não tecido (TNT) com gramatura de 100 g m⁻² e dimensões de 5 cm de comprimento por 5 cm de largura, totalizando uma área de 25 cm².

A quantidade inicial de amostra em cada saquinho obedeceu à relação de 20 mg de matéria seca por cm² de superfície selada por calor, seguindo as recomendações de Detmann et al. (2012).

Posteriormente, os teores de MS definitiva das amostras foram avaliados conforme o método INCT-CA G-003/1. A metodologia para as análises de FDN, FDA e Lignina seguiu as descrições de Detmann et al. (2012): FDN (Método INCT-CA F-001/1), FDA (Método INCT-CA F-003/1) e Lignina (INCT-CA no. F-005/1). As análises foram realizadas de forma sequencial para FDN, FDA e Lignina nas amostras.

2.5 Aquisição das imagens multiespectrais

A aquisição de dados multiespectrais foi sistematicamente executada por meio de uma missão de voo, no dia 27 de agosto de 2024. A operação foi realizada no intervalo das 10:00 às 14:00 h, um período estratégico que, maior probabilidade do sol a pino, selecionado para otimizar a qualidade radiométrica das imagens.

Essa escolha de horário visa minimizar o efeito de sombreamento e a distorção espectral causados por ângulos de elevação solar baixos, garantindo uma iluminação mais uniforme e consistente sobre a área de estudo. A coleta foi realizada priorizando condições meteorológicas ideais, considerando a ausência de precipitação pluviométrica nos 30 minutos subsequentes ao período de voo, garantindo a estabilidade do voo e a integridade e qualidade dos dados coletados.

A aquisição das imagens foi realizada utilizando um veículo aéreo não tripulado (VANT) DJI Phantom P4 Multiespectral. Este VANT integra um sistema de câmera com seis sensores CMOS de 1/2.9", devidamente calibrados para captura em multibandas. As especificações espectrais dos sensores são: azul (450 nm \pm 16 nm), verde (560 nm \pm 16 nm), vermelho (650 nm \pm 16 nm), *red edge* (730 nm \pm 16 nm) e infravermelho próximo (840 nm \pm 26 nm). Em cada ponto georreferenciado do plano de voo, o VANT registrou simultaneamente uma imagem por sensor.

Para garantir a uniformidade e a parametrização do processo de coleta, utilizou-se o software de planejamento de voo autônomo DJI GS GO. Nele, foram configurados os seguintes parâmetros operacionais: altura de voo de 50 metros, sobreposição lateral e frontal de 75%, e uma velocidade de 15 m/s. Com base nessas definições, foi utilizado o padrão do software para determinar a quantidade de fotos e suas respectivas coordenadas, para assegurar a cobertura total da área de estudo.

O voo resultou na aquisição de 576 imagens, de forma que obteve-se uma imagem por sensor em cada um dos 96 pontos de coleta. O tempo de voo foi de 7 m e 17 s.

2.6 Processamento dos dados coletados

O processamento das imagens iniciou-se com a importação e o alinhamento dos dados. Este alinhamento foi realizado por meio da identificação de pontos homólogos, permitindo o cálculo das orientações relativas entre as imagens. Subsequentemente, foi gerada uma nuvem de pontos densa, fundamental para a reconstrução tridimensional precisa da área de estudo.

Com o modelo tridimensional estabelecido, procedeu-se à produção dos ortomosaicos multiespectrais para cada voo. Durante este processo, foram aplicadas correções geométricas e radiométricas rigorosas, visando eliminar distorções e garantir a fidelidade espacial e espectral das imagens.

Para assegurar a elevada precisão espacial, todos os dados foram georreferenciados com o auxílio de pontos de controle terrestres (GCPs). As coordenadas desses GCPs foram obtidas previamente na área de estudo por meio de levantamento GNSS em modo RTK (Real Time Kinematic), correlacionando cada pixel às coordenadas reais do campo e, conseqüentemente, eliminando erros geométricos.

Adicionalmente, para corrigir as variações radiométricas e garantir que cada banda espectral representasse a reflectância real do dossel vegetal, o ortomosaico foi submetido a ajustes radiométricos. Estes ajustes basearam-se em um painel de calibração específico, modelo target package (v2) mapir. Ao término desta fase, todos os produtos gerados: ortomosaico (RGB e multiespectrais), Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT), foram exportados no formato GeoTIFF.

O ortomosaico ajustado foi então importado para o software QGIS (versão 3.40.5, Bratislava), onde se procedeu à extração dos índices espectrais através de álgebra de bandas, utilizando as equações descritas na tabela 2.

Tabela 2. Álgebras de Bandas para extração dos índices espectrais utilizados no experimento

NDVI	GNDVI	NDRE
------	-------	------

$$\frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)}$$

$$\frac{(NIR-Green)}{(NIR+Green)}$$

$$\frac{(NIR-RedEdge)}{(NIR+RedEdge)}$$

Fonte: Adaptado de Index DataBase, 2025

Após a extração dos índices, as parcelas experimentais de cada voo foram delimitadas, considerando exclusivamente a área útil e excluindo as bordaduras. A partir desses polígonos, foram extraídos os valores médios, mínimos, máximos e desvio-padrão dos índices espectrais para cada parcela, o que permitiu caracterizar a resposta espectral de cada tratamento. Esses dados foram subsequentemente compilados em tabelas para análise estatística.

2.7 Correlação e análise de dados

Para cada índice espectral (NDVI, GNDVI e NDRE), a variação média de cada tratamento foi calculada em relação à média geral de todos os tratamentos por voo. Posteriormente, com o objetivo de investigar as relações entre a resposta espectral da cultura e suas características de desempenho, foram estabelecidas correlações de Pearson (r) entre essas variações médias dos índices e os dados agronômicos e bromatológicos coletados.

Para a execução desta análise estatística, empregou-se o software R (versão 4.5), utilizando-se especificamente o pacote corPlot para a extração das matrizes de correlação e a geração dos respectivos correlogramas. A interpretação dos coeficientes de correlação de Pearson (r) foi realizada com base na metodologia de Shimakura (2006), que atribui um valor qualitativo aos coeficientes numéricos encontrados, Tabela 3.

Tabela 3. Classificação dos Coeficientes de Correlação de Pearson (r) segundo Shimakura (2006).

Valor de ρ (+ ou -)	Interpretação
0.00 a 0.19	Uma correlação bem fraca
0.20 a 0.39	Uma correlação fraca
0.40 a 0.69	Uma correlação moderada
0.70 a 0.89	Uma correlação forte
0.90 a 1.00	Uma correlação muito forte

Fonte: Adaptado de Shimakura (2006).

Os resultados obtidos nessas análises subsidiarão a discussão apresentada nas seções seguintes.

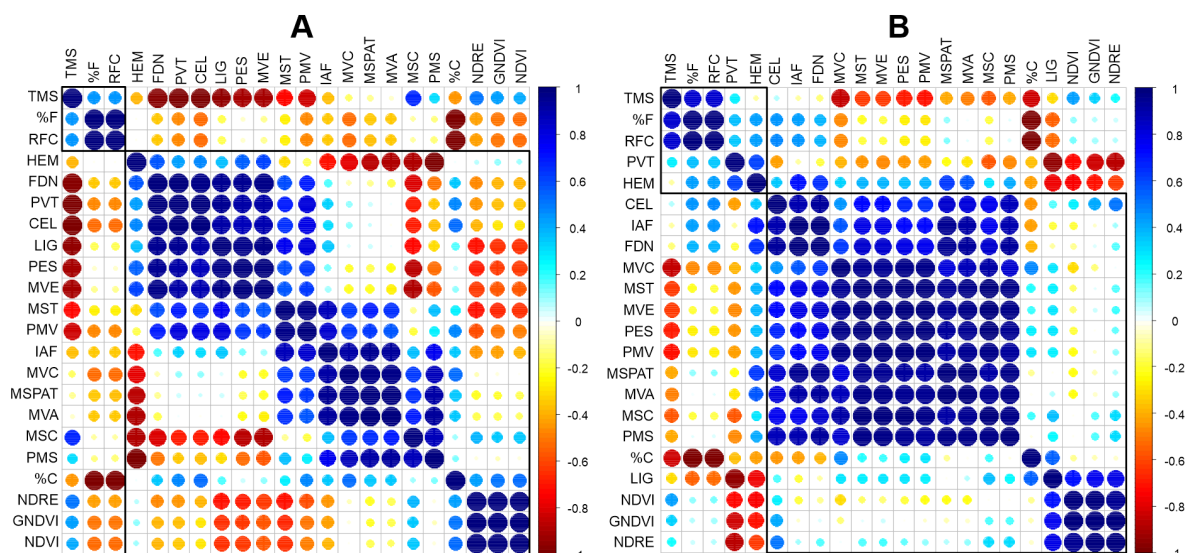
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, é apresentada uma análise detalhada de cada matriz de correlação (correlograma) obtida para cada tratamento (FC - Feroz Com Aplicação de *Trichoderma* sp., FS - Feroz Sem Aplicação de *Trichoderma* sp., PC - Pioneer Com Aplicação de *Trichoderma* sp. e PS - Pioneer Sem Aplicação de *Trichoderma* sp.).

3.1 Análise para o híbrido Feroz com e sem aplicação de *Trichoderma* sp.

Nesta seção, é avaliado as correlações de Pearson entre os índices espectrais GNDVI, NDVI e NDRE e um conjunto diversificado de variáveis agrônômicas e bromatológicas do híbrido Feroz, com e sem aplicação de *Trichoderma* sp. Esses padrões são apresentados no correlograma na figura 3.

Figura 3. Híbrido Feroz com e sem a aplicação do *Trichoderma* sp.



A: Correlograma para o tratamento híbrido feroz com aplicação do *Trichoderma* sp.; B: Correlograma para o tratamento híbrido feroz sem aplicação do *Trichoderma* sp. RFC = Razão folha colmo; %FOLHA = Porcentagem de folha; PVT = Peso Verde total; PMV = Produção de Matéria Verde; MVA = Massa Verde Aérea; MVE = Massa Verde Espiga; MVC = Massa Verde Colmo; MSC = Matéria Seca do Colmo; FDN = Fibra em Detergente Neutro; LIG = Lignina; HEM = Hemicelulose; IAF = Índice da Área Foliar; TMS = Teor de massa seca; MST = Massa seca Total; CEL = Celulose; PES = Peso Espiga; MSPAT = Massa Seca Parte Aérea Total; PMS = Produção Massa Seca; NDVI; NDRE e GNDVI.

Fonte: Arquivo pessoal

3.1.1 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice GNDVI

Para o tratamento com aplicação de *Trichoderma* sp., o GNDVI apresentou correlação negativa forte com o peso verde total ($r = -0,7551$); Correlações moderadas ocorreram para peso de espiga seca ($r = -0,6241$), massa seca total ($r = -0,6687$), massa verde de espiga ($r = -0,5612$), índice de área foliar ($r = -0,4232$), teor de massa seca ($r = 0,4218$), produtividade de massa verde ($r = -0,5110$), porcentagem de folha ($r = -0,5109$), porcentagem de colmo ($r = 0,5109$), razão folha/colmo ($r = -0,5080$), FDA ($r = -0,4554$) e lignina ($r = -0,6482$); As correlações fracas abrangeram massa seca da parte aérea total ($r = -0,2034$), massa seca de colmo ($r = 0,3408$), FDN ($r = -0,3912$) e celulose ($r = -0,2969$); As muito fracas referiram-se a massa verde da parte aérea ($r = -0,1750$), massa verde de colmo ($r = -0,0384$), total folha/colmo ($r = -0,0722$), produção de massa seca ($r = -0,0624$) e hemicelulose ($r = 0,1073$).

Sem aplicação de *Trichoderma* sp., o GNDVI evidenciou correlação muito forte negativa com o peso verde total ($r = -0,9551$); fortes associações com lignina ($r = 0,7791$) e hemicelulose ($r = -0,7006$); correlação moderada com FDA ($r = 0,6973$) e celulose ($r = 0,4068$); correlação fraca com teor de massa seca ($r = 0,3221$); e muito fraca nas demais variáveis: peso de espiga seca $r = -0,0038$ massa seca total $r = 0,0257$ massa seca de colmo $r = 0,1693$; massa seca da parte aérea total $r = -0,0695$ massa verde da parte aérea $r = -0,0491$; massa verde de colmo $r = -0,1371$; massa verde de espiga $r = 0,0477$; índice de área foliar $r = -0,0424$ total folha/colmo $r = -0,1161$ produtividade de massa verde $r = -0,0425$ produção de massa seca $r = 0,1660$ porcentagem de folha $r = 0,0762$ porcentagem de colmo $r = -0,0762$ razão folha/colmo $r = 0,0949$; FDN $r = 0,0386$.

Em ambos os tratamentos, o GNDVI demonstrou uma correlação forte e negativa com o peso verde total, neste contexto, o índice pode estar atuando como um indicador inverso de massa vegetal total, possivelmente refletindo o avanço fenológico da cultura. ZHAO et al. (2023) em seu estudo identificaram correlação forte negativa para estágios avançados na avaliação da produtividade da cultura do milho com o índice GNDVI, em diferentes cultivares. Em fases mais tardias do desenvolvimento, onde a biomassa seca se eleva ou processos de senescência foliar iniciam, o GNDVI tende a decrescer (AKBARIAN et al, 2021).

Na presença do microrganismo, o GNDVI exibiu correlações negativas moderadas a fortes com lignina ($r = -0,6482$) e FDA ($r = -0,4554$). Isso indica que um aumento no valor do GNDVI está associado à redução das concentrações desses componentes fibrosos não digeríveis, ou redução na quantidade de água presente na vegetação, sugerindo que a aplicação do microrganismo promove uma correlação inversa.

Gonilha et al. (2024) observou que plantas que foram inoculadas com *Trichoderma* sp. apresentaram melhores respostas agronômicas e um desenvolvimento mais acelerado em comparação a plantas não tratadas. À medida que a cultura avança nos estádios fenológicos e se aproxima da senescência, o teor de água foliar diminui de forma progressiva (GAO et al., 2023).

Em contrapartida, na ausência de *Trichoderma* sp., o padrão correlacional foi revertido, com o GNDVI apresentando correlações positivas com lignina ($r = 0,7791$), FDA ($r = 0,6973$) e celulose ($r = 0,4068$). Esta inversão demonstra que *Trichoderma* sp. exerce influência fisiológica alterando a biossíntese da parede celular ou retardando processos de lignificação excessiva.

3.1.2 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice NDVI

No tratamento com aplicação de *Trichoderma* sp., o NDVI apresentou correlação negativa forte com o peso verde total ($r = -0,7419$); Correlações moderadas foram identificadas para peso de espiga seca ($r = -0,6264$), massa seca total ($r = -0,6423$), massa verde de espiga ($r = -0,5636$), teor de massa seca ($r = 0,4100$), produtividade de massa verde ($r = -0,4834$), porcentagem de folha ($r = -0,5361$), porcentagem de colmo ($r = 0,5361$), razão folha/colmo ($r = -0,5333$), FDA ($r = -0,4460$) e lignina ($r = -0,6414$); As correlações fracas englobaram massa seca de colmo ($r = 0,3596$), índice de área foliar ($r = -0,3886$), FDN ($r = -0,3875$) e celulose ($r = -0,2859$); e as muito fracas referiram-se a massa seca da parte aérea total ($r = -0,1679$), massa verde da parte aérea ($r = -0,1400$), massa verde de colmo ($r = -0,0012$), total folha/colmo ($r = -0,0354$), produção de massa seca ($r = -0,0336$) e hemicelulose ($r = 0,0822$).

Sem aplicação de *Trichoderma* sp., o NDVI evidenciou correlação muito forte negativa com o peso verde total ($r = -0,9380$); Fortes associações negativas com hemicelulose ($r = -0,7599$) e positivas com lignina ($r = 0,7163$); As correlações moderadas ocorreram para teor de massa seca ($r = 0,4389$) e FDA ($r = 0,5603$); As correlações fracas envolveram massa seca da parte aérea total ($r = -0,2390$), massa verde da parte aérea ($r = -0,2248$), massa verde de colmo ($r = -0,3106$), total folha/colmo ($r = -0,2949$), produtividade de massa verde ($r = -0,2245$) e celulose ($r = 0,2736$); Enquanto as muito fracas referiram-se a peso de espiga seca ($r = -0,1867$), massa seca total ($r = -0,1576$), massa seca de colmo ($r = -0,0139$), massa verde de espiga ($r = -0,1358$), índice de área foliar ($r = -0,1811$), produção de massa seca ($r =$

-0,0115), porcentagem de folha ($r = 0,1190$), porcentagem de colmo ($r = -0,1190$), razão folha/colmo ($r = 0,1354$) e FDN ($r = -0,1094$).

Em ambos os tratamentos, com e sem *Trichoderma* sp., o NDVI demonstrou uma correlação fortemente negativa com o peso verde total ($r = -0,7419$ com *Trichoderma* sp. e $r = -0,9380$ sem *Trichoderma* sp.). Este padrão é consistentemente observado em culturas forrageiras em fases mais avançadas de desenvolvimento, onde o pico de biomassa seca é alcançado ou a senescência foliar se inicia. Nessas fases, a reflectância no vermelho (utilizada no denominador do NDVI) pode aumentar devido à menor absorção de clorofila, e a reflectância no infravermelho próximo pode diminuir ligeiramente, resultando em um NDVI decrescente mesmo enquanto o acúmulo de biomassa total contínua ou se estabiliza a medida em que a cultura se aproxima da senescência (KAUR; MAHEY; MUKHERJEE, 2010).

No tratamento com *Trichoderma* sp., o NDVI apresentou correlações negativas moderadas a fortes com lignina ($r = -0,6414$) e FDA ($r = -0,4460$). Este padrão indica que um NDVI mais elevado tende a estar associado a menores concentrações de lignina e FDA, que são conhecidos como componentes indigestíveis da parede celular.

Em contraste, na ausência de *Trichoderma* sp., a dinâmica correlacional inverte-se drasticamente: o NDVI evidenciou associações positivas com lignina ($r = 0,7163$) e FDA ($r = 0,5603$), e uma forte correlação negativa com hemicelulose ($r = -0,7599$). Esta inversão implica que, sem o microrganismo, um NDVI mais alto estaria ligado a maiores teores de lignina e FDA.

Essa diferença de comportamento pode ser explicada pela influência de microrganismos como o *Trichoderma* sp. na modulação da composição da parede celular. Diversos estudos apontam que o conteúdo de lignina e FDA está diretamente relacionado à maturidade das plantas, sendo esses componentes menos digestíveis e mais abundantes em estágios avançados de desenvolvimento (MARKOVIĆ et al., 2024).

Além disso, o NDVI tende a decrescer à medida que a lignificação aumenta, pois a concentração de clorofila ativa diminui com o avanço da senescência, reduzindo a eficiência fotossintética e alterando o padrão de reflectância espectral. Esse processo resulta em maior reflectância na faixa do

vermelho e leve queda na reflectância no infravermelho próximo, o que reduz o valor do NDVI, mesmo sem uma queda proporcional da biomassa. Estudos mostram que essas alterações estruturais e pigmentares na vegetação estão diretamente ligadas à resposta espectral, sendo o NDVI sensível tanto à estrutura do dossel quanto ao conteúdo de pigmentos, como a clorofila (CORDON; LAGORIO E PARUELO, 2016).

3.1.3 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice NDRE

No tratamento com aplicação de *Trichoderma* sp., o NDRE apresentou correlações negativas fortes com massa seca total ($r = -0,7199$), peso verde total ($r = -0,8164$) e lignina ($r = -0,7194$); Correlações moderadas foram observadas para peso de espiga seca ($r = -0,6889$), massa verde de espiga ($r = -0,6304$), índice de área foliar ($r = -0,4499$), teor de massa seca ($r = 0,5100$), produtividade de massa verde ($r = -0,5809$), porcentagem de folha ($r = -0,4323$), porcentagem de colmo ($r = 0,4323$), razão folha/colmo ($r = -0,4292$), FDN ($r = -0,4765$) e FDA ($r = -0,5410$); As correlações fracas abrangeram massa seca de colmo ($r = 0,3913$) e celulose ($r = 0,3899$); e as muito fracas referiram-se a massa seca da parte aérea total ($r = -0,2122$), massa verde da parte aérea ($r = -0,1792$), massa verde de colmo ($r = -0,0600$), total folha/colmo ($r = -0,0897$), produção de massa seca ($r = -0,0333$) e hemicelulose ($r = 0,0657$).

Sem aplicação de *Trichoderma* sp., o NDRE manteve correlação muito forte negativa com o peso verde total ($r = -0,9389$); Apresentou correlações fortes positivas com FDA ($r = 0,7966$) e lignina ($r = 0,7995$); As correlações moderadas envolveram hemicelulose ($r = -0,6220$), celulose ($r = 0,5179$), massa seca de colmo ($r = 0,3164$) e produção de massa seca ($r = 0,3128$); O teor de massa seca apresentou correlação fraca ($r = 0,2313$); As demais variáveis registraram correlações muito fracas para peso de espiga seca ($r = 0,1461$), massa seca da parte aérea total ($r = 0,0788$), massa seca total ($r = 0,1766$), massa verde da parte aérea ($r = 0,1020$), massa verde de colmo ($r = 0,0041$), massa verde de espiga ($r = 0,1983$), índice de área foliar ($r = 0,0858$), total folha/colmo ($r = 0,0318$), produtividade de massa verde ($r = 0,1076$),

porcentagem de folha ($r = 0,0584$), porcentagem de colmo ($r = -0,0584$), razão folha/colmo ($r = 0,0786$) e FDN ($r = 0,1712$).

Similar aos índices anteriores (GNDVI e NDVI), o NDRE demonstrou uma correlação consistentemente forte e negativa com o peso verde total em ambos os cenários ($r = -0,8164$ com *Trichoderma* sp. e $r = -0,9389$ sem *Trichoderma* sp.). Isso indica que, à medida que a planta se desenvolve e acumula biomassa, especialmente em estágios mais avançados do ciclo de vida, ocorrem alterações fisiológicas como a redução da clorofila foliar, mudanças na estrutura do dossel e diminuição do teor relativo de água. Essas transformações influenciam diretamente a reflectância na banda red edge, resultando na redução dos valores de NDRE (LIU et al., 2023).

Com a presença do microrganismo, o NDRE apresentou correlações negativas fortes com lignina ($r = -0,7194$) e moderadas com FDA ($r = -0,5410$) e FDN ($r = -0,4765$). Essa mudança no sinal das correlações pode estar relacionada ao papel do *Trichoderma* sp. como promotor de crescimento vegetal, modulando processos fisiológicos e bioquímicos que afetam diretamente a composição da parede celular e a dinâmica de acúmulo de biomassa.

O *Trichoderma* é conhecido por produzir fitormônios, além de estimular a absorção de nutrientes e induzir alterações morfofisiológicas nas plantas hospedeiras (KHAN et al., 2023). Esses efeitos podem influenciar a concentração de compostos, resultando em menor deposição de frações fibrosas e maior eficiência fotossintética, o que, por sua vez, se reflete nas alterações espectrais detectadas pelo NDRE. Além disso, o *Trichoderma* sp. pode impactar a arquitetura foliar e o teor de clorofila, alterando a reflectância na banda red edge utilizada pelo índice NDRE (MENG et al., 2019).

3.2 Análise para o híbrido Pioneer com e sem aplicação do *Trichoderma* sp.

Nesta seção, avalia-se as relações entre os índices espectrais GNDVI, NDVI e NDRE e as variáveis agronômicas e bromatológicas do híbrido Pioneer, comparando o comportamento do tratamento com e sem aplicação de *Trichoderma* sp., conforme apresentado na figura 4.

Figura 4. híbrido pionner com e sem a aplicação do *Trichoderma* sp.

colmo ($r = -0,0069$), massa verde de espiga ($r = 0,0679$), total folha/colmo ($r = 0,0870$) e produtividade de massa verde ($r = 0,0795$).

No tratamento sem aplicação de *Trichoderma* sp., o GNDVI apresentou correlações muito fortes positivas com índice de área foliar ($r = 0,9890$), massa seca da parte aérea total ($r = 0,9024$) e massa verde da parte aérea ($r = 0,9007$); Associações fortes foram registradas para peso de espiga seca ($r = 0,7314$), massa seca de colmo ($r = 0,8644$), massa seca total ($r = 0,7864$), massa verde de colmo ($r = 0,7146$), massa verde de espiga ($r = 0,7446$), peso verde total ($r = 0,7685$), total folha/colmo ($r = 0,7732$), produtividade de massa verde ($r = 0,7599$), produção de massa seca ($r = 0,8701$) e lignina ($r = -0,8205$); Foi observada correlação moderada negativa com FDA ($r = -0,6283$); Correlações fracas para teor de massa seca ($r = 0,2431$), FDN ($r = -0,3517$) e celulose ($r = 0,2414$); As demais variáveis exibiram correlações muito fracas: porcentagem de folha ($r = 0,0346$), porcentagem de colmo ($r = -0,0346$), razão folha/colmo ($r = 0,0438$) e hemicelulose ($r = -0,1327$).

Para o híbrido Pioneer, a interpretação do GNDVI apresenta padrões de correlação distintos em comparação com o híbrido anterior. No tratamento sem aplicação de *Trichoderma* sp., o GNDVI demonstrou correlações muito fortes e positivas com atributos diretamente ligados ao crescimento e biomassa foliar. Este comportamento sugere que, para este híbrido específico e na ausência do bioinsumo, o GNDVI é um excelente preditor do desenvolvimento vegetativo e da produção de biomassa (MACEDO et al, 2023).

Com *Trichoderma* sp., o GNDVI apresentou uma correlação muito forte e *positiva* com a lignina, e associações fortes e *positivas* com FDN e FDA. Desta forma observa-se que esses dados são contrastantes em relação ao híbrido anterior: para o Pioneer, um GNDVI mais elevado na presença de *Trichoderma* sp. está associado a um aumento nos componentes de fibra indigestíveis.

Observa-se, portanto, que a interação entre o bioinsumo *Trichoderma* sp. e o material genético utilizado pode gerar respostas fisiológicas e qualitativas distintas, conforme o híbrido avaliado. Estudos recentes demonstram que diferentes híbridos de milho respondem de maneira diferente à aplicação de *Trichoderma* sp, tanto em relação ao acúmulo de biomassa quanto a parâmetros produtivos e de qualidade (REIS, et al, 2024).

3.2.2 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice NDVI

Com aplicação de *Trichoderma* sp., o NDVI apresentou correlação muito forte positiva com a lignina ($r = 0,9689$); Associações fortes com porcentagem de folha ($r = 0,7651$), porcentagem de colmo ($r = -0,7651$), razão folha/colmo ($r = 0,7678$), FDN ($r = 0,8270$), FDA ($r = 0,8163$) e celulose ($r = -0,8181$); As correlações moderadas envolveram peso verde total ($r = -0,4865$), índice de área foliar ($r = 0,5297$), teor de massa seca ($r = 0,5595$) e hemicelulose ($r = 0,4948$); Foram consideradas fracas as correlações de massa seca de colmo ($r = 0,2236$), massa verde da parte aérea ($r = 0,2069$) e produção de massa seca ($r = 0,2025$); Muito fracas as demais variáveis: peso de espiga seca ($r = -0,0623$), massa seca da parte aérea total ($r = 0,1841$), massa seca total ($r = 0,0437$), massa verde de colmo ($r = -0,0747$), massa verde de espiga ($r = 0,0023$), total folha/colmo ($r = 0,0184$) e produtividade de massa verde ($r = 0,0112$).

Sem aplicação de *Trichoderma* sp., o NDVI revelou correlação muito forte positiva com índice de área foliar ($r = 0,9926$); Associações fortes envolveram peso de espiga seca ($r = 0,7070$), massa seca da parte aérea total ($r = 0,8866$), massa seca de colmo ($r = 0,8518$), massa seca total ($r = 0,7653$), massa verde da parte aérea ($r = 0,8795$), massa verde de espiga ($r = 0,7169$), peso verde total ($r = 0,7402$), total folha/colmo ($r = 0,7511$), produtividade de massa verde ($r = 0,7351$), produção de massa seca ($r = 0,8528$) e lignina ($r = -0,8440$); A FDA apresentou correlação moderada negativa ($r = -0,6338$); Foram observadas correlações fracas para teor de massa seca ($r = 0,2834$), FDN ($r = -0,3945$) e celulose ($r = 0,2578$), e muito fracas para porcentagem de folha ($r = 0,0429$), porcentagem de colmo ($r = -0,0429$), razão folha/colmo ($r = 0,0503$) e hemicelulose ($r = -0,1882$).

No tratamento sem *Trichoderma* sp., o NDVI manteve correlações muito fortes e positivas com atributos foliares ligados ao conteúdo de clorofila e à presença de água nos tecidos, como o índice de área foliar ($r = 0,9926$), a massa seca da parte aérea ($r = 0,8866$) e a massa verde parte aérea ($r = 0,8795$). Esse padrão evidencia a resposta espectral típica do NDVI: quanto

maior a concentração de pigmentos e a turgidez foliar, menor é a reflectância no vermelho e maior no infravermelho próximo, elevando o índice (REDDY et al, 2001).

A forte correlação negativa com a lignina ($r = -0,8440$) e a moderada com FDA ($r = -0,6338$) confirmam que o aumento de componentes estruturais e de fibras reduz a sensibilidade do NDVI, uma vez que esses constituintes aumentam a reflectância no vermelho e atenuam a do infravermelho. O aumento do teor de fibras está diretamente relacionado com alterações nos padrões de reflectância, sendo observado aumento na reflectância do vermelho e diminuição no infravermelho próximo e plantas desenvolvimento avançado, reduzindo o NDVI e indicando a forte influência dos componentes estruturais sobre o índice (ALBAYRAK, 2008).

Quando aplicado o bioinsumo, o NDVI exibiu correlação muito forte e positiva com a lignina ($r = 0,9689$) e associações fortes com FDN ($r = 0,8270$) e FDA ($r = 0,8163$). Essa inversão no sinal das correlações sugere que o *Trichoderma sp.* pode influenciar o metabolismo e a composição estrutural da cultura, promovendo alterações na parede celular e, conseqüentemente, modificando a interação da planta com a luz nos comprimentos de onda utilizados no cálculo do NDVI (BASIŃSKA-BARCZAK; BŁASZCZYK; SZENTNER, 2020).

3.2.3 Análise dos Padrões de Correlação para o Índice NDRE

No tratamento com aplicação de *Trichoderma sp.*, o NDRE apresentou correlações muito fortes positivas com porcentagem de folha ($r = 0,9164$), porcentagem de colmo ($r = -0,9164$), razão folha/colmo ($r = 0,9178$) e lignina ($r = 0,9708$); Foram registradas associações fortes com índice de área foliar ($r = 0,7594$), teor de massa seca ($r = 0,7624$), FDA ($r = 0,8048$) e celulose ($r = -0,8423$); Correlações moderadas ocorreram para massa seca de colmo ($r = 0,4155$), massa seca da parte aérea total ($r = 0,3332$), produção de massa seca ($r = 0,4141$) e FDN ($r = 0,6793$); As demais variáveis exibiram correlações muito fracas: peso de espiga seca ($r = 0,1297$), massa seca total ($r = 0,2331$), massa verde da parte aérea ($r = 0,3422$), massa verde de colmo ($r = -0,0179$), massa

verde de espiga ($r = 0,1821$), total folha/colmo ($r = 0,1029$) e produtividade de massa verde ($r = 0,1415$).

Sem aplicação de *Trichoderma* sp., o NDRE evidenciou correlações muito fortes positivas com massa seca da parte aérea total ($r = 0,9560$), massa seca de colmo ($r = 0,9270$), massa verde da parte aérea ($r = 0,9536$), índice de área foliar ($r = 0,9564$) e produção de massa seca ($r = 0,9331$); Associações fortes foram observadas para peso de espiga seca ($r = 0,8239$), massa seca total ($r = 0,8687$), massa verde de colmo ($r = 0,8094$), massa verde de espiga ($r = 0,8345$), peso verde total ($r = 0,8535$), total folha/colmo ($r = 0,8581$), produtividade de massa verde ($r = 0,8474$) e lignina ($r = -0,8278$); A FDA apresentou correlação moderada negativa ($r = -0,5186$); Foram registradas correlações fracas para FDN ($r = -0,2140$) e celulose ($r = 0,3302$), e muito fracas para teor de massa seca ($r = 0,0990$), porcentagem de folha ($r = -0,0977$), porcentagem de colmo ($r = 0,0977$), razão folha/colmo ($r = -0,0866$) e hemicelulose ($r = -0,0053$).

Sem aplicação de *Trichoderma* sp., o NDRE apresentou correlação muito forte e negativa com a lignina e moderada negativa com FDA, evidenciando sua sensibilidade à degradação da clorofila e ao acúmulo de compostos estruturais que elevam a reflectância em red-edge à medida que a folha senesce (HORLER, DOCKRAY e BARBER, 1983). Correlações muito fortes e positivas com massa seca da parte aérea, índice de área foliar e massa verde total confirmam o padrão clássico de resposta do red-edge e infravermelho ao vigor, à quantidade de tecido foliar e teor de matéria seca (POLLEY et al., 2020).

Com aplicação de *Trichoderma* sp., o índice inverteu o sinal para lignina e FDA, indicando que o fungo interage com a planta de modo a antecipar a lignificação e a perda de água ou acelerando os estádios de desenvolvimento, modificando a composição química e estrutural dos tecidos foliares (AGOSTINI et al., 2021).

Associações muito fortes com porcentagem de folha e razão folha/colmo mostram que o NDRE também reflete mudanças na proporção de tecidos com a parte estrutural da planta. Correlações fortes com FDN e moderadas com massa seca de colmo reforçam a capacidade do red-edge de captar o acúmulo de fibra

e matéria seca, tornando-o um indicador eficaz tanto do vigor inicial quanto da senescência funcional precoce em resposta ao tratamento.

4. CONCLUSÃO

Portanto conclui-se que o imageamento multiespectral por VANT possui correlações fortes e muito fortes com variáveis agronômicas e bromatológicas em híbridos de milho submetidos a aplicação de *Trichoderma* sp.

As variações no sinal das correlações dos índices, apontam que a aplicação de *Trichoderma* sp. pode influenciar o metabolismo e a composição estrutural da planta, modificando sua interação com a luz e, conseqüentemente, sua assinatura espectral.

Para futuras pesquisas, é crucial investigar os mecanismos fisiológicos e bioquímicos que levam às inversões de correlação observadas nos índices espectrais, em resposta ao *Trichoderma* sp.. Além disso, aprofundar o estudo da interação genótipo-microrganismo ao longo de todo o ciclo fenológico proporcionando explorar a aplicação de modelos preditivos baseados em sensoriamento índices multiespectrais para estimar variáveis agronômicas e bromatológicas.

5. REFERÊNCIAS

- AGOSTINI, R. B.; RIUS, S. P.; VARGAS, W. A.; CAMPOS-BERMUDEZ, V. A. Proteome impact on maize silks under the priming state induced by *Trichoderma* root colonization. **Planta**, v. 253, n. 5, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03633-0>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- AKBARIAN, S.; XU, C.; WANG, W.; GINNS, S.; LIM, S.. An investigation on the best-fit models for sugarcane biomass estimation by linear mixed-effect modelling on unmanned aerial vehicle-based multispectral images: a case study of Australia. **Information Processing in Agriculture**, abril 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.03.005>. Acesso em: 21 jul. 2025.

ALBAYRAK, S.. Use of reflectance measurements for the detection of N, P, K, ADF and NDF contents in sainfoin pasture. **Sensors**, v. 8, n. 11, p. 7275–7286, 14 nov. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s8117275>. Acesso em: 21 jul. 2025.

ANTOLIN, L. A. S.; SILVA, E. H. F. M.; ZANON, A. J.; ROLIM, B. S. M. R.; MARIN, F. R.. How much would irrigation increase maize production in Brazil? **Scientia Agricola**, v. 82, e20240083, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2024-0083>. Acesso em: 04 jun. 2025.

BASIŃSKA-BARCZAK, A.; BŁASZCZYK, L.; SZENTNER, K.. Plant cell wall changes in common wheat roots as a result of their interaction with beneficial fungi of Trichoderma. **Cells**, v. 9, n. 10, p. 2319, 19 out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cells9102319>. Acesso em: 22 jul. 2025.

CHIVASA, W.; MUTANGA, O.; BURGUEÑO, J.. UAV-based high-throughput phenotyping to increase prediction and selection accuracy in maize varieties under artificial MSV inoculation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 184, p. 106128, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106128>. Acesso em: 23 jul. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Produção de milho no Brasil: safra 2023/24**. Brasília, DF: Conab, 2024. 9 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/milho-e-sorgo/2024/48a-ro/producao-de-milho-no-brasil.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safra de grãos está estimada em 332,9 milhões de toneladas influenciada por boa produção de soja, milho e arroz**. Brasília, DF: Conab, 15 mai. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-de-graos-esta-estimada-em-332-9-milhoes-de-toneladas-influenciada-por-boa-producao-de-soja-milho-e-arroz>. Acesso em: 04 jun. 2025.

CORDON, G.; LAGORIO, M. G.; PARUELO, J. M. Chlorophyll fluorescence, photochemical reflective index and normalized difference vegetative index during plant senescence. **Journal of Plant Physiology**, v. 199, p. 100–110, jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.05.010>. Acesso em: 21 jul. 2025.

LIMA G., D. B.; SANTOS, C. H. B.; FREZARIN, E. T.; SIQUEIRA, J. S.; RIGOBELLO, E. C.. Biological Strategies to Minimize Fertilizer Use in Maize: Efficacy of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus subtilis*. **Microbiology Research**, v. 15, n. 4, p. 2261–2273, 4 nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microbiolres15040151>. Acesso em: 21 jul. 2025.

EICHOLZ, E. D.; RUGERI, A.; AFONSO R., A. P. S.; BREDEMEIER, C.; BERMUDEZ PEREIRA, F.; MACHADO SANTOS, F.; THEISEN, G.; R A. MACHADO, J.; CARRAFA, M. (eds. téc.). **MISOSUL 2024: informações técnicas para o cultivo de milho e sorgo na região subtropical do Brasil: safras 2023/24 e 2024/25: 3ª Reunião Técnica Sul-Brasileira de Pesquisa de Milho e Sorgo, Pelotas, 10 a 12 de setembro de 2023**. Sete Lagoas, MG: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2024. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202406/19154728-informacoes-tecnicas-milho-e-sorgo-2023-24-2024-25-misosul-2023.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

FERNANDES, P.. **Estimativa da produtividade de milho (*Zea mays* L.) através de imagens multiespectrais obtidas por veículo aéreo não tripulado**. 79 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/4842/FERNANDES%2c%20PABLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 04 jun. 2025

FERNANDES, S.. **Índices de vegetação para diagnóstico nutricional de nitrogênio na cultura do milho a partir de imagens geradas por drone**. 47 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2023. Disponível em:

<https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/31177/1/indicesdevegetacaodiagnosticonutricional.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025

GAO, S.; MING, B.; LI, L.; WANG, Y.; XUE, J.; HOU, P.; WANG, K.; ZHOU, S.; LI, S.; XIE, R.. Temporal and Spatial Dynamics of Organ Water Content in Maize with Different Senescence Types. **Plants**, v. 12, n. 18, p. 3269, 14 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12183269>. Acesso em: 21 jul. 2025.

GETAHUN, S.; KEFALE, H.; GELAYE, Y.. Application of precision agriculture technologies for sustainable crop production and environmental sustainability: a systematic review. **The Scientific World Journal**, v. 2024, Article ID 2126734, jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2024/2126734>. Acesso em: 22 jul. 2025.

GUO, Y.; FU, Y. H.; CHEN, S.; HAO, F.; ZHANG, X.; BEURS, K.; HE, Y.. Predicting grain yield of maize using a new multispectral-based canopy volumetric vegetation index. **Ecological Indicators**, v. 166, p. 112295, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112295>. Acesso em: 23 jul. 2025.

IDB - Index DataBase. Disponível em: <https://www.indexdatabase.de/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SHIMAKURA , interpretação do coeficiente de correlação, 2006. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html>. Acesso em: 21 jul. 2025.

KALISCHUK, M.; PARET, M. L.; FREEMAN, J. H.; RAJ, D.; SILVA, S.; EUBANKS, S.; WIGGINS, D. J.; LOLLAR, M.; MAROIS, J. J.; MELLINGER, H. C.; DAS, J.. An improved crop scouting technique incorporating unmanned aerial vehicle–assisted multispectral crop imaging into conventional scouting practice for gummy stem blight in watermelon. **Plant Disease**, v. 103, n. 7, p. 1642–1650, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-18-1373-RE>. Acesso em: 23 jul. 2025.

KAUR, R.; MAHEY, R. K.; MUKHERJEE, J. Study of the optimum time span for distinguishing *Avena ludoviciana* from wheat crop based on their spectral reflectance characteristics. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 38, n. 1, p. 25-34, mar. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12524-010-0009-7>. Acesso em: 21 jul. 2025.

KHAN, R. A. A.; NAJEEB, S.; CHEN, J.; WANG, R.; ZHANG, J.; HOU, J.; LIU, T.. Insights into the molecular mechanism of *Trichoderma* stimulating plant growth and immunity against phytopathogens. **Physiologia Plantarum**, v. 175, n. 6, nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ppl.14133>. Acesso em: 21 jul. 2025.

KUMAR, A.; DESAI, S. V.; BALASUBRAMANIAN, V. N.; RAJALAKSHMI, P.; GUO, W.; NAIK, B. B.; BALRAM, M.; DESAI, U. B. Efficient maize tassel-detection method using UAV-based remote sensing. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 23, p. 100549, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100549>. Acesso em: 04 jun. 2025.

LIU, Z.; LI, H.; DING, X.; CAO, X.; CHEN, H.; ZHANG, S.. Estimating maize maturity by using UAV multi-spectral images combined with a CCC-based model. **Drones**, v. 7, n. 9, p. 586, 19 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones7090586>. Acesso em: 21 jul. 2025.

MACEDO, F. L.; NÓBREGA, H.; FREITAS, J. G. R.; RAGONEZI, C.; PINTO, L.; ROSA, J.; CARVALHO, M. A. A. P.. Estimation of productivity and above-ground biomass for corn (*Zea mays*) via vegetation indices in Madeira Island. **Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 1115, 24 maio 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture13061115>. Acesso em: 21 jul. 2025.

MARKOVIĆ, J.; RACIĆ, N.; BEKČIĆ, F.; LAZAREVIĆ, Đ.; VASIĆ, T.; ŽIVKOVIĆ, S.; CEKIĆ, B.. Lignification as the major factor limiting red clover dm and ndf

digestibility. In: **2nd International Symposium on Biotechnology**, 2024.
Disponível em: <https://doi.org/10.46793/SBT29.09JM>. Acesso em: 21 jul. 2025.

MELLO, D. C.; MEDEIROS NETO, L. G.; LANA, M. G.; FIORINO, P.. Uso e ocupação do solo: comparação de índices NDVI e GNDVI e inferências sobre biomassa de dossel vegetal. **Cadernos de Agroecologia**, v. 15, n. 1, ed. esp. do V Simpósio Mineiro de Ciência do Solo, 2019. Disponível em: <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/6282/2377>. Acesso em: 04 jun. 2025.

MENG, X.; MIAO, Y.; LIU, Q.; MA, L.; GUO, K.; LIU, D.; RAN, W.; SHEN, Q.. TgSWO from *Trichoderma guizhouense* NJAU4742 promotes growth in cucumber plants by modifying the root morphology and the cell wall architecture. **Microbial Cell Factories**, v. 18, n. 1, 3 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1196-8>. Acesso em: 21 jul. 2025.

OLIVEIRA, M. F.. **Modelos de predição de produtividade da cultura do milho por meio de NDVI em arranjos espaciais**. 44 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Estadual Paulista, [S.l.], 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/4fc1f037-86e8-4e5a-8faa-414392120cc5/content>. Acesso em: 04 jun. 2025.

PARIDA, P. K.; SOMASUNDARAM, E.; KRISHNAN, R.; RADHAMANI, S.; SIVAKUMAR, U.; PARAMESWARI, E.; RAJA, R.; SHRI RANGASAMI, S. R.; SANGEETHA, S. P.; GANGAI SELVI, R.. Unmanned aerial vehicle-measured multispectral vegetation indices for predicting LAI, SPAD chlorophyll, and yield of maize. **Agriculture**, v. 14, n. 7, p. 1110, jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071110>. Acesso em: 04 jun. 2025.

POLLEY, H. W.; YANG, C.; WILSEY, B. J.; FAY, P. A. Spectrally derived values of community leaf dry matter content link shifts in grassland composition with change in biomass production. **Remote Sensing in Ecology and**

Conservation, v. 6, n. 3, p. 344–353, 13 jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/rse2.145>. Acesso em: 22 jul. 2025.

REDDY, G. S.; RAO, C. L. N.; RAO, P. V. K.. Influence of plant pigments on spectral reflectance of maize, groundnut and soybean grown in semi-arid environments. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 18, p. 3377–3382, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160152609218>. Acesso em: 21 jul. 2025.

REIS, B. S. S.; OLIVEIRA, C. S.; CARVALHO, D. D. C.; NETA, F. X. Q.; RESENDE, C. L. P.; SILVA, L. M.; RODRIGUES, F.. Performance of corn hybrids as a function of nitrogen doses and *Trichoderma harzianum*. **Journal of Sustainable Development**, v. 17, n. 4, p. 26, 19 jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5539/jsd.v17n4p26>. Acesso em: 21 jul. 2025.

SANKARARAO, A. U. G.; RAJALAKSHMI, P.; CHOUDHARY, S.. UC-HSI: UAV-based crop hyperspectral imaging datasets and machine learning benchmark results. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2024.3431644>. Acesso em: 23 jul. 2025.

SHIMAKURA, S.E. Correlação. In: CE003 - Estatística II. Paraná: Dep. de Estatística da Universidade Federal do Paraná: 71-78p. 2006.

YANG, B.; ZHU, W.; REZAEI, E. E.; LI, J.; SUN, Z.; ZHANG, J.. The optimal phenological phase of maize for yield prediction with high-frequency UAV remote sensing. **Remote Sensing**, v. 14, n. 7, p. 1559, 24 mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14071559>. Acesso em: 23 jul. 2025.

YEHOSHUA, A.; EDAN, Y.. Mobile robots sampling algorithms for monitoring of insects populations in agricultural fields. **Cornell University**, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2308.13806>. Acesso em: 22 jul. 2025.

ZHANG, D.; QI, H.; GUO, X.; SUN, H.; MIN, J.; LI, Si; HOU, L.; LIANGJIE.
Integration of UAV multispectral remote sensing and random forest for full-growth stage monitoring of wheat dynamics. **Agriculture**, v. 15, n. 3, p. 353, 6 fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15030353>. Acesso em: 22 jul. 2025.

ZHAO, X.; WANG, S.; WEN, T.; XU, J.; HUANG, B.; YAN, S.; GAO, G.; ZHAO, Y.i; LI, H.; QIAO, J.; YANG, J.; WU, L.; WANG, H.; LIU, T.; MU, X.. On correlation between canopy vegetation and growth indexes of maize varieties with different nitrogen efficiencies. **Open Life Sciences**, v. 18, n. 1, 1 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/biol-2022-0566>. Acesso em: 21 jul. 2025.

ZHONG, Y.; HU, X.; LUO, C.; WANG, X.; ZHAO, J.; ZHANG, L.. WHU-Hi: UAV-borne hyperspectral with high spatial resolution (H2) benchmark datasets and classifier for precise crop identification based on deep convolutional neural network with CRF. **Remote Sensing of Environment**, v. 250, p. 112012, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112012>. Acesso em: 23 jul. 2025.