

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

MICHELLE CATTERINA DE SOUSA FAVARETTO CASTELLAN

**MANEJOS DE INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA ALTERAM
ARQUITETURA, COMPONENTES DE RENDIMENTO E
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

**URUTAÍ - GOIÁS
2025**

MICHELLE CATTERINA DE SOUSA FAVARETTO CASTELLAN

**MANEJOS DE INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA ALTERAM
ARQUITETURA, COMPONENTES DE RENDIMENTO E
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

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

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

URUTAÍ - GOIÁS
2025

MICHELLE CATTERINA DE SOUSA FAVARETTO CASTELLAN

**MANEJOS DE INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA ALTERAM
ARQUITETURA, COMPONENTES DE RENDIMENTO E
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

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

Aprovada em 22 de dezembro de 2025



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



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



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

URUTAÍ - GOIÁS
2025

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

C348 Castellan, Michelle Catterina de Sousa Favaretto
 MANEJOS DE INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA ALTERAM
 ARQUITETURA, COMPONENTES DE RENDIMENTO E
 PRODUTIVIDADE DA SOJA / Michelle Catterina de Sousa
 Favaretto Castellan. Urutaí 2025.

28f. il.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira.
Tec (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0120024 -
Bacharelado em Agronomia - Urutaí (Campus Urutaí).
I. Título.

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

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

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

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

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

MICHELLE CATTERINA DE SOUSA FAVARETTO CASTELLAN

Matrícula:

2020101200240276

Título do trabalho:

MANEJOS DE INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA ALTERAM ARQUITETURA, COMPONENTES DE RENDIMENTO E PRODUTIVIDADE DA SOJA

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 31 / 01 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

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

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

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

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

Urutaí, Goiás

Local

13 / 01 / 2026

Data



Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO**

Campus Urutaí - Código INEP: 52063909

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

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

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulada **Manejos de indução de resistência alteram arquitetura, componentes de rendimento e produtividade da soja**, sob orientação de Alexandre Igor de Azevedo Pereira, apresentada pela aluna **Michelle Catterina de Sousa Favaretto Castellan (2020101200240276)** do Curso **Bacharelado em Agronomia (Campus Urutaí)**. Os trabalhos foram iniciados às 13:00 pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

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

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

[X] Aprovado

[] Reprovado

Nota (quando exigido): 9,0

Observação / Apreciações:

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

Carmen Rosa da Silva Curvelo

URUTAI / GO, 22 de dezembro de 2025.

Alexandre Igor de Azevedo Pereira**João Batista Coelho Sobrinho**

DEDICATÓRIA

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

AGRADECIMENTOS

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

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUÇÃO.....	10
MATERIAL E MÉTODOS.....	11
RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
CONCLUSÃO.....	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

MANEJOS DE INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA ALTERAM ARQUITETURA, COMPONENTES DE RENDIMENTO E PRODUTIVIDADE DA SOJA

Michelle Catterina de Sousa Favaretto Castellan¹

⁽¹⁾ Instituto Federal Goiano Campus Urutaí, Rodovia Prof. Geraldo Silva Nascimento, Km 2,5, CEP 75790-000 Urutaí, GO, Brasil. E-mail: michele.favorito@estudante.ifgoiano.edu.br

RESUMO - O presente estudo analisa diferentes manejos de indução de resistência em soja e demonstra que combinações de indutores e fungicidas podem alterar de forma significativa a arquitetura das plantas, os componentes de rendimento e a produtividade sob condições típicas do Cerrado. O objetivo central foi avaliar manejos de indução de resistência, isolados ou associados a fungicidas, integrando análises uni e multivariadas para identificar quais variáveis estruturais e produtivas mais contribuem ao rendimento. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos ao acaso com quatro manejos (ISR1–ISR4) aplicados à cultivar Brasmax Olimpo IPRO. Os produtos foram aplicados em estádios vegetativos e reprodutivos, e as variáveis avaliadas incluíram características estruturais (ramificações, número de nós, altura e diâmetro de caule), reprodutivas (vagens por classe de grãos, grãos por vagem, total de vagens e grãos) e produtividade, analisadas por estatística descritiva, PCA, LASSO e análise de trilha. Os resultados indicaram que ISR1 e ISR2 favoreceram maior vigor vegetativo, incremento de vagens com três e quatro grãos e maiores produtividades (até 70,09 sc ha⁻¹). ISR3 promoveu arquitetura mais compacta e menor rendimento, enquanto ISR4 apresentou desempenho intermediário. A análise de trilha identificou P3S, P4S, BRN, MNN, PLH e TPD como contribuintes positivos ao rendimento, enquanto aumentos excessivos em TSD e GPP exerceram efeitos negativos. Conclui-se que manejos que equilibram vigor vegetativo e elevada proporção de vagens com 3 e 4 grãos como ISR1 e ISR2 são mais eficientes para maximizar a produtividade, reforçando a importância de estratégias integradas que conciliem sanidade, arquitetura e eficiência reprodutiva.

Palavras-chave: *Glycine max*; eficiência reprodutiva; Análises multivariadas.

RESISTANCE-INDUCED MANAGEMENT PRACTICES ALTER THE ARCHITECTURE, YIELD COMPONENTS, AND PRODUCTIVITY OF SOYBEANS

Michelle Catterina de Sousa Favaretto Castellan¹

⁽¹⁾ Instituto Federal Goiano Campus Urutaí, Rodovia Prof. Geraldo Silva Nascimento, Km 2,5, CEP 75790-000 Urutaí, GO, Brasil. E-mail: michele.favorito@estudante.ifgoiano.edu.br

ABSTRACT - The present study analyzes different induced resistance management strategies in soybean and shows that combinations of resistance inducers and fungicides can significantly alter plant architecture, yield components, and productivity under typical Cerrado conditions. The main objective was to evaluate induced resistance management strategies, applied alone or in association with fungicides, integrating univariate and multivariate analyses to identify which structural and productive variables contribute most to yield. The experiment was conducted in a randomized complete block design with four management strategies (ISR1–ISR4) applied to the cultivar Brasmax Olimpo IPRO. Products were applied at vegetative and reproductive growth stages, and the evaluated variables included structural traits (branching, number of nodes, plant height, and stem diameter), reproductive traits (pods by seed-class, seeds per pod, total pods and grains), and yield. Data were analyzed using descriptive statistics, PCA, LASSO, and path analysis. The results indicated that ISR1 and ISR2 promoted greater vegetative vigor, increased numbers of pods with three and four seeds, and higher yields (up to 70.09 bags ha⁻¹). ISR3 resulted in a more compact architecture and lower yield, whereas ISR4 showed intermediate performance. Path analysis identified P3S, P4S, BRN, MNN, PLH, and TPD as positive contributors to yield, while excessive increases in TSD and GPP had negative effects. It is concluded that management strategies that balance vegetative vigor with a high proportion of three- and four-seeded pods, such as ISR1 and ISR2, are more efficient for maximizing productivity, reinforcing the importance of integrated approaches that align plant health, architecture, and reproductive efficiency.

Key-words: *Glycine max*; reproductive efficiency; multivariate analyses.

INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) ocupa posição central na economia agrícola mundial, destacando-se como fonte essencial de proteína e óleo vegetal, além de insumo estratégico para rações e biocombustíveis. No Brasil, a cultura sustenta grande parcela do PIB agropecuário, movimentando cadeias produtivas que geram emprego, renda e desenvolvimento regional. A elevada produtividade média, associada à expansão da área cultivada, demonstra a importância do país como líder global na produção de grãos. Como afirmam Paraginski et al. (2024), o desempenho produtivo da soja está diretamente associado à eficiência morfofisiológica da planta e às condições sanitárias ao longo do ciclo. De forma complementar, Zuffo et al. (2020) reforçam que os componentes de rendimento, especialmente o número de vagens por planta, exercem efeito direto expressivo sobre a produtividade, o que evidencia a necessidade de manejo eficaz.

Entre os principais entraves ao rendimento da soja estão as doenças foliares, radiculares e de final de ciclo. A ferrugem asiática, por exemplo, permanece como uma das mais severas ameaças à cultura. Chicowski et al. (2023) destacam que essa doença pode causar perdas superiores a 80% quando não manejada adequadamente. Além disso, patógenos como *Sclerotinia sclerotiorum* podem comprometer significativamente estruturas reprodutivas, sendo que, segundo Yang et al. (2023), a progressão da doença reduz a capacidade da planta de manter o enchimento de grãos. Esses problemas sanitários demandam intervenções químicas intensas, elevando custos de produção e pressão ambiental.

O manejo tradicional, baseado em fungicidas sistêmicos e multissítios, ainda é o método mais utilizado pelos produtores. Siqueira Filho et al. (2025) demonstraram que misturas químicas reduzem a severidade da ferrugem e elevam a massa de mil grãos. Contudo, estudos como o de Klosowski et al. (2021) alertam para a evolução da resistência de *Phakopsora pachyrhizi* a diversos ativos, dificultando o controle. Ceresini et al. (2024) reforçam que a adoção repetitiva dos mesmos modos de ação aumenta o risco de seleção de populações resistentes, indicando a necessidade de diversificação de estratégias.

Nesse cenário, cresce o interesse pela indução de resistência (IR), definida como um conjunto de respostas fisiológicas ativadas por estímulos químicos, biológicos ou nutricionais que aumentam a capacidade da planta de se defender. Segundo Fontes et al. (2024), a IR envolve sinalização hormonal, produção de compostos defensivos e ativação

de resistência sistêmica adquirida. Produtos como acibenzolar-S-methyl, fosfitos e aminoácidos têm mostrado bons resultados no manejo de doenças. Gabardo et al. (2021) verificaram que indutores podem reduzir sintomas de doenças de final de ciclo, enquanto Picanço et al. (2022) demonstraram que fosfitos associados a aminoácidos diminuem a severidade da ferrugem asiática em campo. Além disso, Li et al. (2024) enfatizam que a modulação de mecanismos de defesa pode influenciar também a arquitetura da planta, alterando nós, ramos e área foliar.

Apesar dos avanços, ainda existem lacunas sobre como diferentes indutores atuam sob condições reais de cultivo, principalmente em ambientes tropicais e quando combinados a fungicidas. Cruz et al. (2020) e Khan et al. (2025) ressaltam que o entendimento pleno dessas interações depende do uso de análises multivariadas capazes de integrar variáveis fisiológicas, estruturais e produtivas. Rigon et al. (2020) complementam ao demonstrar que alterações na arquitetura influenciam diretamente os componentes produtivos e, portanto, devem ser consideradas em estudos com IR. Obua et al. (2024) reforçam que a produtividade da soja é resultado do equilíbrio entre vigor vegetativo e eficiência reprodutiva, condição que pode ser influenciada por diferentes manejos.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes manejos de indução de resistência, isolados ou associados ao uso de fungicidas, sobre a arquitetura de plantas, componentes de rendimento e produtividade da soja em condições de Cerrado, integrando análises uni e multivariadas para compreender a contribuição relativa de cada variável na resposta final da cultura.

MATERIAL E MÉTODOS

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

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro tratamentos correspondentes a manejos de indução de resistência (ISR1, ISR2, ISR3 e ISR4). Cada parcela experimental foi composta por oito linhas de 5 m de comprimento, espaçadas a 0,45 m, totalizando área total de 18 m², sendo consideradas para avaliação apenas as seis linhas centrais, visando evitar bordaduras.

A semeadura ocorreu em 23/10/2023, utilizando a cultivar Brasmax Olimpo IPRO, pertencente ao grupo de maturação 7.8, hábito indeterminado, população de 10 plantas por metro linear, de alta exigência nutricional e reconhecida por sua ampla adaptabilidade às condições do Cerrado. A colheita foi realizada em 15/02/2024. A adubação de base consistiu na aplicação de 220 kg ha⁻¹ de MAP no sulco, e o KCl foi distribuído em cobertura no total de 180 kg ha⁻¹, parcelado em três momentos (1, 20 e 40 dias após a semeadura). Os tratamentos foram compostos por uma aplicação em fase vegetativa e três aplicações sequenciais de fungicidas ao longo das fases reprodutivas R1, R3 e R5.

No manejo ISR1, aplicou-se Score Flex na fase vegetativa (31/11/2023). Em R1, utilizou-se Orkestra + Clorotalonil Nortox; em R3, Vessaria + Unizeb Gold (600 mL + 1,5 kg ha⁻¹); e em R5, Ativum + Clorotalonil Nortox (800 mL + 1 L ha⁻¹). O manejo ISR2 recebeu Score Flex (150 mL ha⁻¹) + Elision (500 mL ha⁻¹) na fase vegetativa. Em R1, aplicaram-se Orkestra + Safe (300 mL + 500 mL ha⁻¹); em R3, Vessaria + Safe (600 mL + 500 mL ha⁻¹); e em R5, Ativum + Clorotalonil Nortox (800 mL + 1 L ha⁻¹). O manejo ISR3 iniciou-se com Score Flex (150 mL ha⁻¹). Em R1, aplicou-se Orkestra + Safe (300 mL + 800 mL ha⁻¹); em R3, Vessaria + Safe (600 mL + 800 mL ha⁻¹); e em R5, Ativum + Clorotalonil Nortox. No manejo ISR4, após aplicação de Score Flex (150 mL ha⁻¹) na fase vegetativa, realizaram-se as seguintes aplicações: em R1, Orkestra + Safe + Icon Copper (300 mL + 500 mL + 50 mL ha⁻¹); em R3, Vessaria + Safe + Icon Copper; e em R5, Ativum + Clorotalonil Nortox.

Todas as pulverizações foram realizadas com pulverizador costal pressurizado a CO₂, mantido a 3 kg cm⁻², com volume de calda de 120 L ha⁻¹ e barra com seis pontas AXI 110.02 espaçadas a 0,5 m, garantindo cobertura uniforme.

Ao final do ciclo, foram coletadas 30 plantas ao acaso na área útil de cada parcela. As avaliações estruturais incluíram. BRN: número de ramos laterais, obtido por contagem direta; MNN: número de nós na haste principal; PLH: altura da planta, medida do solo ao ápice da haste principal com régua graduada; STD: diâmetro do caule, mensurado a 2 cm do solo com paquímetro digital. A avaliação reprodutiva foi realizada na maturação fisiológica. As vagens foram classificadas conforme o número de grãos: P1S (1 grão), P2S (2 grãos), P3S (3 grãos) e P4S (4 grãos). A soma resultou em TPD (número total de vagens), enquanto o total de grãos contabilizado proporcionou TSD (número total de grãos). A razão TSD/TPD forneceu GPP (grãos por vagem), representando a eficiência reprodutiva. O rendimento de grãos (YLD) foi determinado pela colheita manual, trilha,

limpeza e padronização da umidade a 13%, com posterior conversão para sacas por hectare.

As variáveis agronômicas foram inicialmente submetidas à análise exploratória por meio de diagramas de caixa (Figura 2), permitindo avaliar a distribuição dos dados, identificar possíveis valores discrepantes e visualizar tendências gerais entre os tratamentos com indutores de resistência. Em seguida, procedeu-se à verificação dos pressupostos necessários para a validade das análises subsequentes. A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro–Wilk, enquanto a homogeneidade de variâncias foi verificada pelo teste de Levene.

Com o objetivo de sintetizar a estrutura multivariada dos dados e identificar os grupos de variáveis que mais contribuíram para a diferenciação entre manejos, aplicou-se a análise de componentes principais (PCA) (Figura 3). A PCA foi realizada a partir da matriz de correlações padronizada, calculando-se autovetores e autovalores segundo:

$$C = \frac{1}{n-1} Z^T Z$$

$$C e_k = \lambda_k e_k$$

em que:

- Z = matriz de dados padronizada;
- C = matriz de correlação;
- λ_k = autovalor associado ao componente k ;
- e_k = autovetor (carga) do componente.

Os escores dos componentes principais foram obtidos por:

$$PC_k = Z e_k$$

A PCA permitiu visualizar a contribuição conjunta de variáveis estruturais e produtivas e sua associação com cada manejo.

Para seleção das variáveis de maior relevância na explicação da produtividade, utilizou-se o método de regressão penalizada LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) (Figura 4).

O modelo LASSO minimiza:

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \left\{ \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij})^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \right\}$$

em que:

- λ é o parâmetro de penalização que controla o encolhimento dos coeficientes. Valores maiores de λ forçam mais coeficientes a se aproximarem de zero, promovendo seleção de variáveis.

A escolha do λ ótimo foi realizada via validação cruzada k-fold, selecionando o valor que minimizou o erro quadrático médio (MSE). As variáveis retidas no modelo final representaram o subconjunto mais parcimonioso e explicativo do comportamento produtivo.

A acurácia preditiva foi avaliada pelo coeficiente de determinação:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

e pelo RMSE (Root Mean Squared Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Para decompor as correlações entre variáveis estruturais e produtivas e identificar os efeitos diretos e indiretos sobre o rendimento, utilizou-se Análise de Trilha (Path Analysis) (Figura 5), derivada do modelo de Wright (1921).

O rendimento (YLD) foi considerado variável dependente e as demais variáveis agronômicas como explicativas. Os efeitos diretos foram estimados a partir do sistema matricial:

$$R_{xx}p = r_{yx}$$

em que:

- R_{xx} = matriz de correlações entre variáveis explicativas;
- r_{yx} = vetor de correlações entre a variável resposta e as explicativas;
- p = vetor de coeficientes de trilha (efeitos diretos).

Os efeitos indiretos foram calculados multiplicando-se os efeitos diretos pelos coeficientes de correlação entre variáveis intermediárias. A soma de efeitos diretos e indiretos permitiu compreender a contribuição de cada característica para o rendimento.

Todas as análises foram realizadas no ambiente R (versão 2025), utilizando os pacotes ggplot2, FactoMineR, glmnet, performance, corrplot e lavaan.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os manejos de indução de resistência avaliados apresentaram diferenças marcantes nos caracteres estruturais e produtivos da soja. Os tratamentos ISR1 e ISR2 promoveram maior vigor vegetativo, refletido em maiores valores médios de vagens com 1, 2, 3 e 4 grãos (P1S, P2S, P3S e P4S), além de maior número de ramos laterais (BRN), número de nós na haste principal (MNN), diâmetro de caule (STD) e altura de planta (PLH). Em contraste, ISR3 resultou em plantas mais compactas, com menor ramificação e porte reduzido, enquanto ISR4 apresentou desempenho intermediário entre os demais manejos, tanto em estrutura quanto em produção de vagens (Figura 1).

A distribuição dos rendimentos acompanhou esses padrões estruturais. O tratamento ISR2, com produtividade de 70,09 sacas ha^{-1} , e ISR1, com 68,04 sacas ha^{-1} , destacaram-se como os mais produtivos. Já ISR3 apresentou o menor rendimento (63,06 sacas ha^{-1}), compatível com sua arquitetura mais reduzida e menor quantidade relativa de vagens em classes superiores, enquanto ISR4 se posicionou em nível intermediário (64,84 sacas ha^{-1}). A análise de efeitos diretos indicou que P3S (vagens com 3 grãos) apresentou o maior efeito positivo sobre o rendimento ($\beta = 0,78$), confirmando seu papel central como principal determinante estrutural da produtividade. Em contrapartida, TSD (número total de grãos) exibiu o maior efeito direto negativo ($\beta = -0,70$), sugerindo que aumentos desproporcionais no número total de grãos, sem adequado suporte estrutural e fisiológico, podem resultar em menor eficiência de enchimento.

De modo geral, esse conjunto de resultados evidencia que o rendimento de grãos foi influenciado principalmente pelo desenvolvimento de vagens trisseminadas (P3S) e pela altura de planta (PLH), variáveis intimamente associadas à maior expressão produtiva nos manejos de indução de resistência. No entanto, embora a análise descritiva e os efeitos diretos permitam identificar tendências claras entre manejos e caracteres agronômicos, elas não capturam plenamente a estrutura multivariada das relações entre as variáveis. Nesse contexto, a aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) torna-se necessária para sintetizar a informação em eixos ortogonais e compreender de forma conjunta como os manejos se distribuem no espaço formado pelos múltiplos caracteres avaliados.

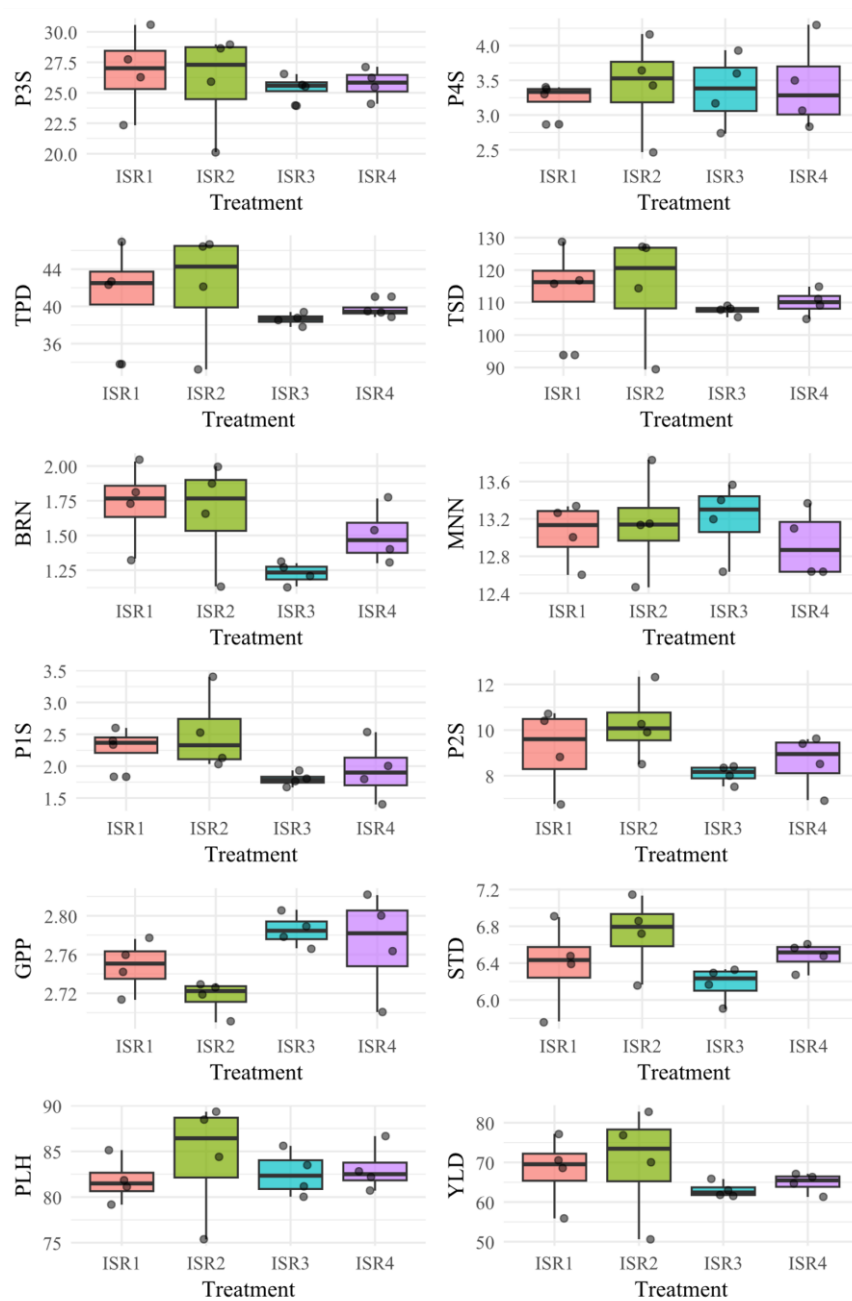


Figura 1. Diagramas de caixa de características agrônômicas sob tratamentos de manejo com indutores de resistência.

A PCA explicou 78,9% da variabilidade total nos dois primeiros componentes, proporcionando uma visão sintética e robusta do comportamento dos manejos de indução de resistência. O PC1 (61,8%) representou um gradiente de vigor vegetativo e potencial produtivo, influenciado principalmente por TPD (número total de vagens), TSD (número total de grãos), YLD (rendimento de grãos), P3S (vagens com 3 grãos), BRN (número de ramos laterais), STD (diâmetro de caule) e PLH (altura de planta). As altas cargas positivas dessas variáveis indicam que plantas mais robustas, com maior formação de

vagens e grãos, tendem a se posicionar na extremidade positiva desse componente, associando-se a maiores rendimentos. O PC2 (17,1%), por sua vez, refletiu essencialmente a eficiência reprodutiva, sendo fortemente determinado pela média de grãos por vagem (GPP) e pela proporção de vagens com 4 grãos (P4S), além de contribuição adicional de PLH e P3S (Figura 2).

A análise de associação entre tratamentos e variáveis no biplot mostrou que ISR1 e ISR2 se alinham ao eixo positivo do PC1, apresentando associação direta com praticamente todas as variáveis de maior peso nesse componente: BRN, MNN, P1S, P2S, P3S, P4S, TPD, TSD, STD, PLH e YLD. Esse padrão caracteriza esses manejos como promotores de plantas vigorosas e altamente produtivas, cujo desempenho está relacionado, sobretudo, à capacidade de formar maior número de vagens e grãos. A ausência de associação com GPP indica que a superioridade de ISR1 e ISR2 não decorre de maior eficiência individual de cada vagem, mas sim da quantidade global de estruturas reprodutivas produzidas.

Em contraste, ISR3 e ISR4 não se associaram às características estruturais iniciais (BRN, P1S, P2S, STD), mas apresentaram vínculo com atributos reprodutivos de maior valor agregado, especialmente P3S, P4S, TPD, TSD, PLH, YLD e GPP — este último o principal determinante do PC2. Assim, esses manejos exibem plantas estruturalmente mais compactas, porém com melhor eficiência reprodutiva, refletida no maior número médio de grãos por vagem e na maior participação de vagens de 3 e 4 grãos. Em outras palavras, enquanto ISR1 e ISR2 alcançam maior rendimento pela ampla produção de estruturas vegetativas e reprodutivas, ISR3 e ISR4 tendem a compensar parte do menor vigor vegetativo com maior eficiência de enchimento das vagens. Ainda assim, a PCA, por ser essencialmente descritiva, não seleciona quais variáveis são mais importantes para fins preditivos. Por isso, fez-se necessária a aplicação de um modelo de regressão penalizada, como o LASSO, para identificar o subconjunto mínimo de características com maior contribuição para explicar o desempenho da cultura.

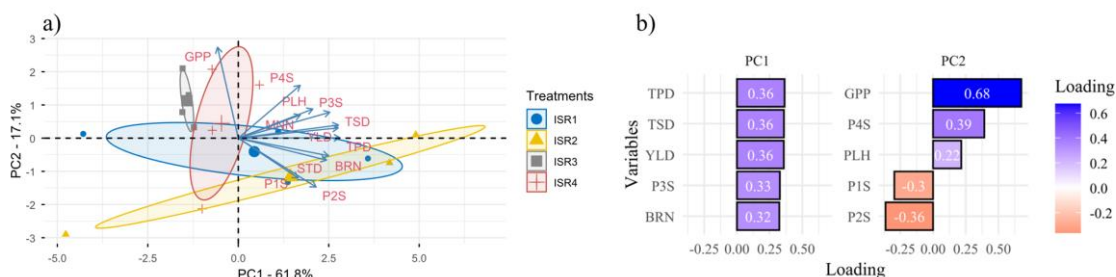


Figura 2. Análise de Componentes Principais (PCA) com Biplot e Cargas das Variáveis das principais características.

A aplicação do modelo LASSO aos dados dos manejos de indução de resistência permitiu refinar a interpretação, selecionando as principais variáveis associadas ao rendimento de grãos. O caminho dos coeficientes (Figura 3a) indicou que, à medida que o parâmetro de penalização (λ) diminuiu, apenas sete variáveis mantiveram coeficientes distintos de zero: TPD, MNN, PLH, BRN, P4S, P1S e TSD. Essas características sintetizam eixos estruturais (BRN, MNN, PLH), reprodutivos (P1S, P4S, TPD) e fenológicos (TSD) previamente identificados na PCA, mas agora organizados de forma parcimoniosa, ressaltando quais variáveis são de fato mais relevantes para explicar o comportamento dos tratamentos.

A escolha do λ ótimo por validação cruzada (Figura 3b), mostrada na relação entre o erro médio e o nível de penalização, garantiu equilíbrio entre ajuste e simplicidade do modelo. O modelo final (Figura 4c) apresentou boa capacidade de previsão, com estreita proximidade entre valores observados e preditos, reforçando a consistência das variáveis selecionadas. As métricas de desempenho apontaram R^2 elevado (0,974 para o modelo linear simples e 0,9665 para o LASSO), com RMSE em níveis compatíveis com a variação experimental, evidenciando que a redução do número de variáveis não comprometeu a qualidade de ajuste. Já a validação cruzada, mais rigorosa por utilizar subconjuntos independentes de dados, apresentou RMSE médio de 3,02 e MAE de 2,48, valores considerados adequados para experimentos de campo com variação natural entre blocos e manejos.

Do ponto de vista prático, o LASSO indica que o monitoramento de um conjunto reduzido de variáveis sobretudo TPD, P1S, P4S, BRN, MNN, PLH e TSD é suficiente para capturar a maior parte da resposta da cultura aos diferentes indutores de resistência, otimizando esforços de avaliação em condições de campo. No entanto, apesar de selecionar eficientemente as características mais importantes, o modelo LASSO não

explicita como esses caracteres influenciam o rendimento em termos de efeitos diretos e indiretos. Para isso, fez-se necessária a utilização da análise de trilha, a fim de decompor as correlações e elucidar os mecanismos pelos quais essas variáveis contribuem para o desempenho produtivo.

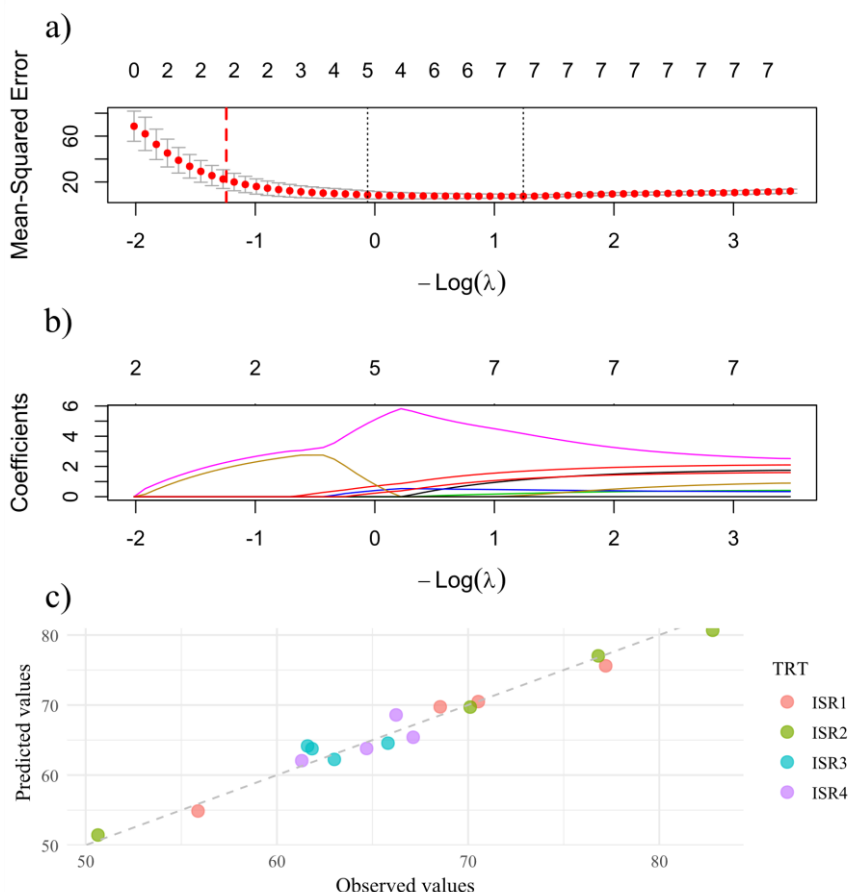


Figura 3. Caminhos dos coeficientes (a), Seleção do λ (b) e desempenho preditivo (c) do modelo LASSO aplicado a indutores de resistência.

A análise de trilha revelou contrastes marcantes entre as magnitudes e direções dos efeitos diretos das variáveis explicativas sobre o rendimento de grãos (YLD). O maior efeito direto positivo foi observado para P3S ($\beta = 0,78$), indicando sua forte contribuição individual para a produtividade, em consonância com os resultados descritivos, da PCA e da seleção via LASSO. Outros efeitos positivos relevantes incluíram P4S ($\beta = 0,33$), PLH ($\beta = 0,29$), TPD ($\beta = 0,26$), bem como BRN ($\beta = 0,25$) e MNN ($\beta = 0,25$), apontando que tanto a arquitetura da planta (mais ramos, mais nós e maior altura) quanto a formação

de vagens de maior valor reprodutivo (principalmente P3S e P4S) contribuem de forma direta e consistente para o aumento do rendimento (Figura 4).

Por outro lado, destacaram-se efeitos diretos negativos expressivos em TSD ($\beta = -0,70$) e GPP ($\beta = -0,38$), sugerindo que incrementos nessas variáveis, quando não acompanhados de suporte estrutural adequado, estão associados a reduções no desempenho produtivo. Efeitos negativos de menor magnitude foram registrados para STD ($\beta = -0,11$) e P1S ($\beta = -0,11$), indicando impactos adversos moderados. A variável P2S ($\beta = 0,01$) apresentou efeito direto praticamente nulo, revelando participação mínima na explicação do rendimento. Esses resultados reforçam a ideia de que não é apenas o número absoluto de grãos que importa, mas o equilíbrio entre a quantidade de estruturas reprodutivas e a capacidade fisiológica da planta em sustentá-las e enchê-las adequadamente.

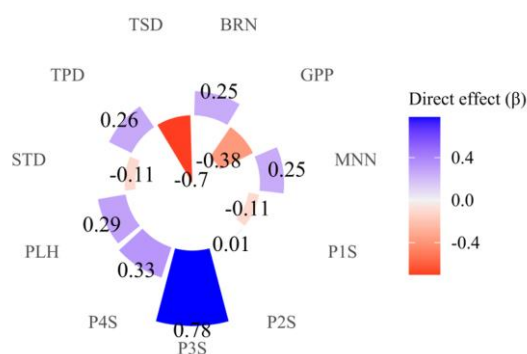


Figura 4. Diagrama radial dos efeitos diretos estimados (β) para as variáveis explanatórias no modelo de análise de trilha.

Dessa forma, conclui-se que manejos de indução de resistência capazes de promover equilíbrio entre vigor vegetativo e eficiência reprodutiva, favorecendo a formação de vagens trisseminadas bem distribuídas na planta e suportadas por adequada estrutura vegetativa, são os mais eficientes para maximizar a produtividade da soja. Os manejos ISR1 e ISR2, em particular, configuram-se como alternativas agronomicamente superiores, oferecendo maior estabilidade e potencial produtivo em sistemas de cultivo que visam aliar sanidade, arquitetura de planta e alto rendimento de grãos.

Os resultados deste estudo demonstram que os manejos de indução de resistência foram determinantes para a melhoria da arquitetura das plantas e dos componentes de rendimento da soja. Os tratamentos ISR1 e ISR2 favoreceram maior número de ramos laterais, maior número de nós, maior altura das plantas e maior proporção de vagens com

três e quatro sementes, resultando nos melhores rendimentos. Esses resultados estão alinhados à literatura atual, que aponta a arquitetura vegetal como elemento central para o potencial produtivo da cultura. Como destacam Li et al. (2024), características como número de nós, ramificação e padrão de distribuição de vagens exercem influência direta sobre a captação de luz e a eficiência fotossintética, afetando diretamente o rendimento.

A relação entre arquitetura, componentes de rendimento e produtividade é amplamente documentada. Zuffo et al. (2020) demonstram que o número de vagens exerce o maior efeito direto sobre a produtividade, e Paraginski et al. (2024) reforçam que componentes como número de vagens por planta e número de grãos por vagem são altamente correlacionados com o rendimento final. Obua, Egesa e Osiru (2024) também ressaltam que genótipos superiores se destacam especialmente pela maior proporção de vagens trisseminadas, enfatizando que tais estruturas apresentam forte impacto sobre o rendimento. A análise de trilha apresentada por Zuffo et al. (2025) confirma essa interpretação ao demonstrar que o número de grãos por planta contribui positivamente para a produtividade somente quando há suporte estrutural adequado, o que é plenamente coerente com o observado no presente estudo, sobretudo nos tratamentos ISR de maior desempenho.

O efeito combinado de maior vigor vegetativo e eficiência reprodutiva observado aqui também é discutido por Rigon et al. (2020), que mostram que plantas mais altas e com maior número de ramos tendem a formar mais vagens e grãos por planta, desde que não haja acamamento. Esses autores reforçam que práticas de manejo que promovem equilíbrio entre crescimento vegetativo e reprodutivo tendem a potencializar o rendimento, o que explica o bom desempenho de ISR1 e ISR2, que ampliaram tanto BRN quanto a formação de vagens com mais sementes.

No âmbito da proteção fitossanitária, é amplamente estabelecido que a manutenção da área foliar sadia é condição indispensável para o enchimento de grãos. Siqueira Filho et al. (2025) verificaram que misturas de fungicidas sistêmicos e multissítios reduziram significativamente a severidade de ferrugem asiática e aumentaram a massa de mil grãos. Os autores afirmam que “a integração de diferentes modos de ação é fundamental para garantir maior durabilidade do controle”. Estudos como o de Klosowski et al. (2021) complementam essa visão ao demonstrarem que a sensibilidade de *Phakopsora pachyrhizi* a fungicidas tem variado ao longo dos anos, exigindo programas de manejo mais robustos e diversificados estratégia adotada nos manejos ISR deste estudo.

Além dos fungicidas tradicionais, os indutores de resistência (IR) aparecem como alternativas promissoras e complementares. Gabardo et al. (2021) demonstraram que acibenzolar-S-methyl contribui para redução de sintomas de doenças de final de ciclo, preservando a área foliar ativa. Picanço et al. (2022) reforçam que fosfitos combinados a aminoácidos aumentam a resistência da soja à ferrugem asiática, observando redução expressiva na severidade. Yang et al. (2023) ampliam essa discussão ao mostrar que compostos como o antibiótico wuyiencin estimulam mecanismos de defesa contra *Sclerotinia sclerotiorum*, evidenciando a relevância do estímulo fisiológico contra patógenos.

Revisões amplas, como a de Fontes et al. (2024), demonstram que múltiplos compostos incluindo silício, níquel e IRs comerciais ativam rotas de defesa complementares, “favorecendo maior estabilidade produtiva mesmo sob pressão de doença”. Na mesma linha, Ceresini et al. (2024) destacam a necessidade de programas que combinem fungicidas de diferentes grupos químicos com estratégias fisiológicas, ressaltando o papel crucial dos multissítios para mitigação da resistência de patógenos.

O presente estudo também faz uso de abordagens multivariadas, as quais são amplamente recomendadas para interpretação de sistemas complexos. Khan et al. (2025) demonstraram que modelos penalizados como LASSO e PCA-LASSO apresentam precisão superior a 95% na predição de severidade de doenças, evidenciando o potencial dessas técnicas para identificação de variáveis-chave. Cruz et al. (2020) também reforçam que PCA e análise de trilha permitem compreender relações estruturais entre caracteres morfofisiológicos e o rendimento de genótipos de soja, destacando a eficiência desses métodos na diferenciação entre tratamentos exatamente o que se observou na separação entre os manejos ISR0, ISR1 e ISR2.

De forma complementar, Chicowski et al. (2023) discutem detalhadamente a interação soja-*Phakopsora pachyrhizi*, reforçando que programas de manejo integrados têm efeito positivo não apenas na sanidade, mas também na expressão de características agronômicas decisivas, como número de vagens e massa de grãos. Esse conhecimento ajuda a explicar por que os tratamentos ISR com melhor desempenho fisiológico também apresentaram maior eficiência reprodutiva e, consequentemente, maior produtividade.

Assim, considerando a totalidade dos resultados e o suporte consistente da literatura, fica evidente que o manejo integrado de fungicidas, multissítios e indutores de resistência promove não apenas a proteção do dossel foliar, mas também condições fisiológicas superiores para o desenvolvimento reprodutivo, favorecendo especialmente

vagens com três e quatro sementes estruturas sabidamente determinantes para o rendimento da cultura. Esses achados reforçam a importância do equilíbrio entre arquitetura, sanidade foliar e componentes de rendimento para maximizar a produtividade da soja em ambientes de Cerrado.

CONCLUSÃO

Os manejos de indução de resistência influenciaram de forma distinta o desenvolvimento e a produtividade da soja. ISR1 e ISR2 apresentaram melhor desempenho por promoverem maior vigor vegetativo e maior formação de vagens com 3 e 4 grãos, resultando nos maiores rendimentos. Já ISR3 e ISR4 mostraram arquitetura mais compacta e produtividade inferior, ainda que com maior eficiência por vagem.

Variáveis como P3S, P4S, BRN, MNN, PLH e TPD foram determinantes para o rendimento, enquanto excessos em TSD e GPP se mostraram prejudiciais. Assim, manejos que equilibram crescimento e eficiência reprodutiva tendem a ser mais favoráveis ao produtor.

Por fim, reforça-se a necessidade de novos estudos para aprofundar a compreensão dos mecanismos envolvidos e orientar com maior precisão o uso de indutores de resistência em diferentes condições de cultivo, garantindo recomendações cada vez mais robustas aos produtores rurais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ceresini, P. C., et al. (2024). Strategies for managing fungicide resistance in Brazilian agroecosystems. *Tropical Plant Pathology*, 49(2), 201–220.
- Chicowski, A. S., et al. (2023). Soybean–*Phakopsora pachyrhizi* interactions: advances and challenges in understanding soybean rust. *Tropical Plant Pathology*, 48(1), 75–90.
- Cruz, C. D., et al. (2020). Multivariate approaches in selecting superior soybean genotypes based on agronomic and physiological traits. *Euphytica*, 216(5), 1–16.
- Fontes, N., et al. (2024). Resistance in soybean against infection by *Phakopsora pachyrhizi*: current knowledge and future perspectives. *Plants*, 13(5), 1–25.
- Gabardo, G. C., Santos, I. dos, Costa, A. T., & Vargas, L. (2021). Alternative products to control late season diseases in soybean. *Ciência Rural*, 51(3), e20200432.
- Khan, J., Akhtar, J., Rafique, M., & Saleem, N. (2025). Comparative evaluation of hybrid and individual models for soybean disease severity prediction using machine learning approaches. *Scientific Reports*, 15(1), 1125–1140.
- Klosowski, A. C., et al. (2021). Sensitivity of *Phakopsora pachyrhizi* to fungicides and implications for disease management in soybean. *Plant Disease*, 105(3), 698–706.
- Li, C., Wang, Y., Zhao, L., & Liu, B. (2024). Molecular and genetic basis of plant architecture in soybean. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1–18.
- Obua, T., Egesa, S. A., & Osiru, D. (2024). Unravelling yield and yield-related traits in soybean using GGE biplot and path analysis. *Agronomy*, 14(4), 915.
- Paraginski, R. T., et al. (2024). Correlation between productive components and grain yield of soybean cultivars sown in the northwest region of Rio Grande do Sul. *Revista Ceres*, 71(2), 153–162.

- Picanço, M. C., et al. (2022). Potentiation of soybean resistance against *Phakopsora pachyrhizi* infection using phosphite combined with free amino acids. *Plant Pathology*, 71(7), 1355–1367.
- Rigon, J. P. G., et al. (2020). Effects of plant density on soybean agronomic traits and grain yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55, e01693.
- Siqueira Filho, J. A., et al. (2025). Fungicide mixtures to control Asian soybean rust. *Revista de Ciências Agrárias*, 48(1), 88–97.
- Yang, Y., et al. (2023). Induced defense response in soybean to *Sclerotinia sclerotiorum* by the antibiotic wuyiencin. *Plant Disease*, 107(5), 1323–1332.
- Zuffo, A. M., et al. (2020). Correlations and path analysis in agronomic traits of soybeans under defoliation. *Bioscience Journal*, 36(2), 515–523.
- Zuffo, A. M., et al. (2025). Correlations and path analysis of soybean cultivars sown in two seasons. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 16(1), 54–68.