REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

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

RESISTANCE INDUCTION MANAGEMENT ALTERS SOYBEAN ARCHITECTURE, YIELD COMPONENTS, AND PRODUCTIVITY

LAS PRÁCTICAS DE MANEJO QUE INDUCEN RESISTENCIA ALTERAN LA ARQUITECTURA, LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO Y LA PRODUCTIVIDAD DE LA SOJA

Julia Dias Costa
Acadêmica de Agronomia. Centro Universitário de Mineiros, Brasil
E-mail: juliadiascosta19@gmail.com

Ivan Ricardo Carvalho
Professor Titular. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: ivan.carvalho@unijui.edu.br

Diego Oliveira Ribeiro
Professor Titular. Centro Universitário de Mineiros, Brasil.
E-mail: diego@unifimes.edu.br

Glicélia Pereira Silva
Professora Titular. Centro Universitário de Mineiros, Brasil
E-mail: glicelia@unifimes.edu.br

Alexandre Igor de Azevedo Pereira
Professor Titular. Instituto Federal Goiano, Brasil
E-mail: alexandre.pereira@ifgoiano.edu.br

Carmen Rosa da Silva Curvelo
Professora Titular. Instituto Federal Goiano, Brasil.
E-mail: carmencurvelo@yahoo.com.br

Rodrigo Vieira da Silva
Professor Titular. Instituto Federal Goiano. Morrinhos, Brasil
E-mail: rodrigo.silva@ifgoiano.edu.br

Deborah Amorim Martins
Professora Substituta. Centro Universitário de Mineiros, Brasil
E-mail: deborahamartins@unifimes.edu.br

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

Luiz Leonardo Ferreira
Professor Titular. Centro Universitário de Mineiros, Brasil
E-mail: luizleonardo@unifimes.edu.br

Resumo

O estudo avaliou diferentes manejos de indução de resistência em soja, destacando que combinações de indutores e fungicidas podem modificar de forma significativa a arquitetura das plantas, os componentes de rendimento e a produtividade sob condições do Cerrado. A pesquisa enfatiza a importância econômica da cultura, os impactos de doenças foliares e de final de ciclo, as limitações do controle químico isolado e o potencial dos indutores de resistência para otimizar a sanidade e o desempenho morfofisiológico. O experimento foi conduzido em Mineiros (GO), em Latossolo sob clima tropical Aw, utilizando delineamento em blocos ao acaso com quatro manejos (ISR1–ISR4) aplicados à cultivar Brasmax Olimpo IPRO. Os tratamentos foram realizados em estádios vegetativos e reprodutivos, avaliando-se variáveis estruturais (ramificações, número de nós, altura e diâmetro do caule), reprodutivas (número de vagens e grãos por classe) e produtividade. As análises incluíram estatística descritiva, PCA, LASSO e análise de trilha para identificar as variáveis mais influentes no rendimento. ISR1 e ISR2 promoveram maior vigor vegetativo, aumento de vagens com três e quatro grãos e produtividades superiores, atingindo até 70,09 sc ha^{-1}. ISR3 resultou em arquitetura mais compacta e menor rendimento, enquanto ISR4 apresentou desempenho intermediário. A análise de trilha revelou P3S, P4S, BRN, MNN, PLH e TPD como contribuintes positivos ao rendimento. Conclui-se que manejos que equilibram vigor vegetativo e proporção elevada de vagens com três e quatro grãos são mais eficientes para maximizar a produtividade da soja.
Palavras-chave: Análises multivariadas; eficiência reprodutiva; Glycine max; resistência induzida; sanidade foliar.

Abstract

The study evaluated different resistance induction managements in soybean, highlighting that combinations of inducers and fungicides can significantly modify plant architecture, yield components, and productivity under Cerrado conditions. The research emphasizes the economic importance of the crop, the impacts of foliar and late-season diseases, the limitations of chemical control alone, and the potential of resistance inducers to optimize plant health and morphophysiological performance. The experiment was conducted in Mineiros, Goiás, on an Oxisol under tropical Aw climate, using a randomized block design with four managements (ISR1–ISR4) applied to the cultivar Brasmax Olimpo IPRO. Treatments were performed at vegetative and reproductive stages, evaluating structural traits (branching, node number, stem height and diameter), reproductive traits (number of pods and grains per category), and yield. Analyses included descriptive statistics, PCA, LASSO, and path analysis to identify variables most influencing yield. ISR1 and ISR2 promoted higher vegetative vigor, increased three- and four-grain pods, and achieved superior yields, up to 70.09 bags ha^{-1}. ISR3 resulted in a more compact architecture and lower yield, while ISR4 showed intermediate performance. Path analysis indicated P3S, P4S, BRN, MNN, PLH, and TPD as positive contributors to yield. It is concluded that managements balancing vegetative vigor and a high proportion of three- and four-grain pods are more efficient in maximizing soybean productivity.
Keywords: Foliar health; Glycine max; induced resistance; multivariate analyses; reproductive efficiency.

Resumen

Este estudio evaluó diferentes estrategias de manejo de inducción de resistencia en soya, destacando que las combinaciones de inductores y fungicidas pueden modificar significativamente

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

la arquitectura de la planta, los componentes del rendimiento y la productividad en condiciones de Cerrado. La investigación enfatiza la importancia económica del cultivo, los impactos de las enfermedades foliares y de fin de ciclo, las limitaciones del control químico aislado y el potencial de los inductores de resistencia para optimizar la salud de la planta y el desempeño morfofisiológico. El experimento se realizó en Mineiros (GO), en un Oxisol bajo un clima tropical Aw, utilizando un diseño de bloques aleatorizados con cuatro estrategias de manejo (ISR1–ISR4) aplicadas al cultivar Brasmax Olimpo IPRO. Los tratamientos se llevaron a cabo en etapas vegetativas y reproductivas, evaluando variables estructurales (ramificación, número de nudos, altura y diámetro del tallo), variables reproductivas (número de vainas y granos por clase) y productividad. Los análisis incluyeron estadística descriptiva, PCA, LASSO y análisis de ruta para identificar las variables más influyentes en el rendimiento. ISR1 e ISR2 promovieron un mayor vigor vegetativo, un aumento en la proporción de vainas con tres y cuatro granos, y mayores rendimientos, alcanzando hasta 70,09 sc ha^{-1}. ISR3 resultó en una arquitectura más compacta y un menor rendimiento, mientras que ISR4 mostró un desempeño intermedio. El análisis de ruta reveló que P3S, P4S, BRN, MNN, PLH y TPD contribuyen positivamente al rendimiento. Se concluye que las prácticas de manejo que equilibran el vigor vegetativo y una alta proporción de vainas con tres y cuatro granos son más eficientes para maximizar la productividad de la soja.
Palabras clave: Análisis multivariado; eficiencia reproductiva; Glycine max; resistencia inducida; salud foliar.

1. 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

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

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

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

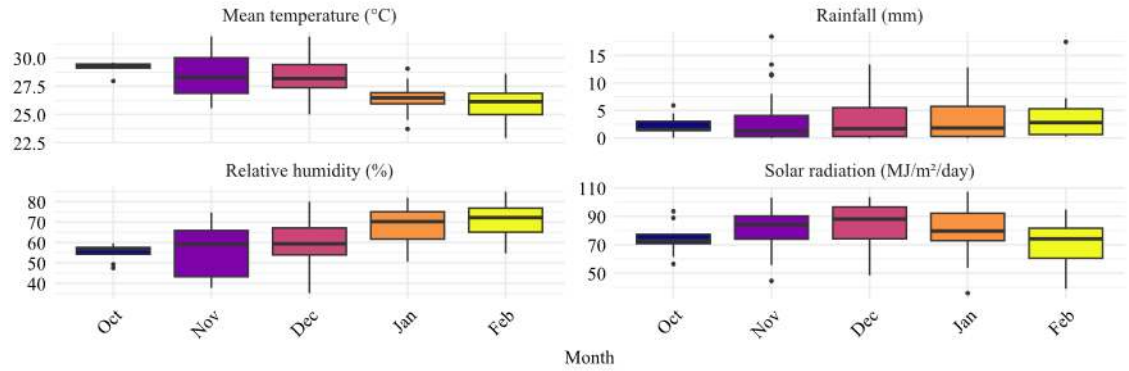
da soja é resultado do equilíbrio entre vigor vegetativo e eficiência reprodutiva, condição que pode ser influenciada por diferentes manejos.

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.

2. Metodologia

O experimento foi conduzido na Fazenda Invernadinha, localizada na zona rural de Mineiros, Goiás, Brasil (17°23'07.3"S; 52°16'54.3"W; altitude aproximada de 800 m). A região apresenta clima do tipo Aw (tropical quente com inverno seco), segundo a classificação de Kottek et al. (2006). Durante o período experimental, registraram-se temperatura máxima de 32,68 °C, mínima de 23,33 °C e média de 27,19 °C, além de precipitação acumulada de 472,90 mm (Figura 1).

Figura 1. Variação da precipitação e temperatura média durante o período experimental.



As características químicas do solo foram determinadas em amostras coletadas na camada de 0–20 cm, seguindo metodologia da Embrapa (2009). Os resultados indicaram pH 5,7; Ca^{2+} = 5,62; Mg^{2+} = 1,77; Al^{3+} = 0,0; H+Al = 2,4; CTC = 9,9 cmolc dm^{-3}; K = 105; P = 5,5; Cu = 1; Fe = 54; Mn = 17,9; Zn = 2; Na = 2,4

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

mg dm^{-3}. A composição granulométrica consistiu em 46,5% de argila, 10% de silte e 43,5% de areia, com matéria orgânica de 4,07% e carbono orgânico de 2,36%.

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 CO_2, mantido a 3 kg cm^{-2}, com volume de calda de 120 L ha^{-1} e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

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:

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

$$\mathrm{Ce}_k = \lambda_k \mathrm{e}_k$$

em que:

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

- 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:

$$PC_k = \mathrm{Ze}_k$$

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):

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

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

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.

3. Resultados e Discussões

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 2).

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

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

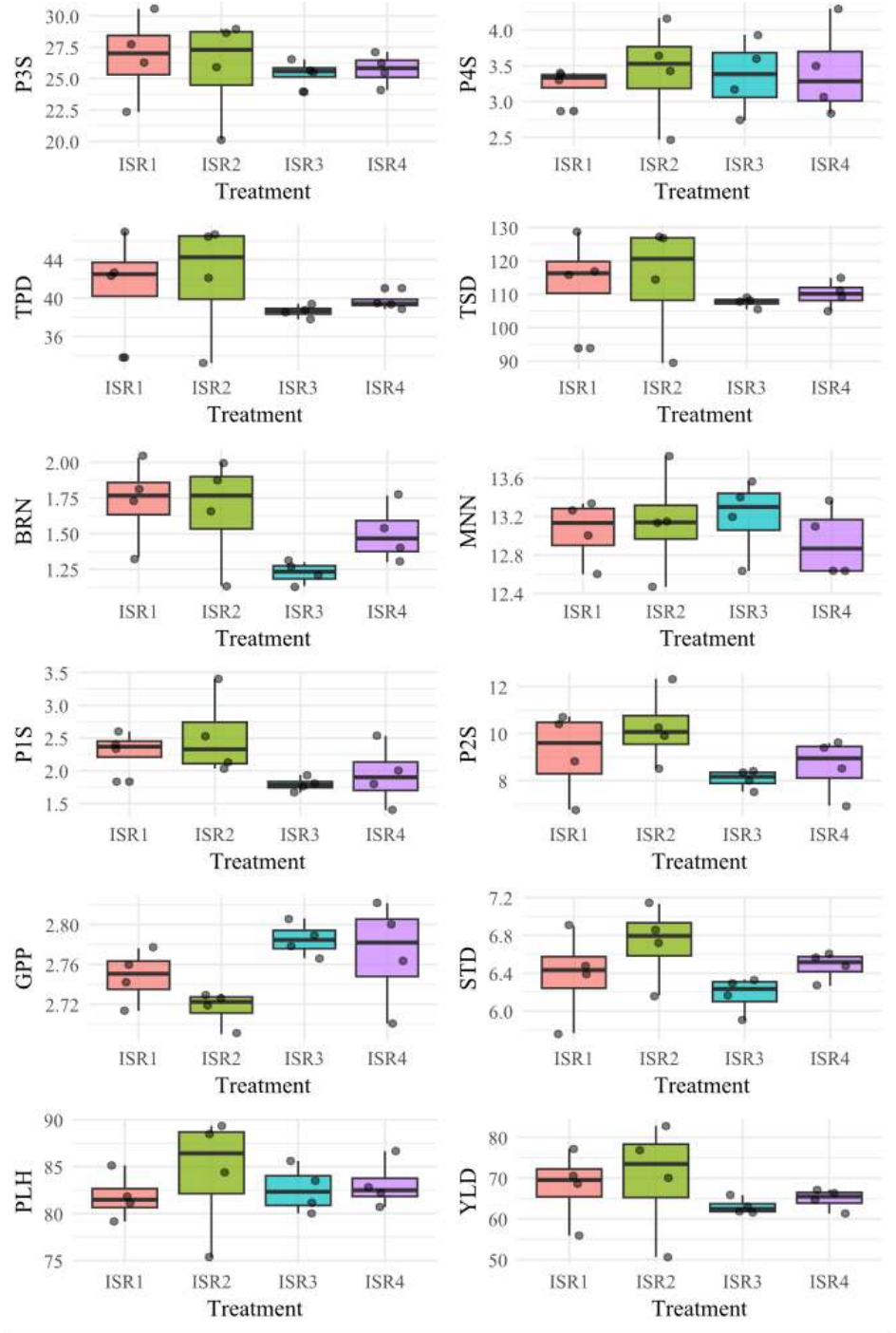
rendimento (63,06 sacas ha^{-1}), compatível com sua arquitetura mais reduzida e menor quantidade relativa de vagens em classes superiores, enquanto ISR4 se posicionou em nível intermediário (64,84 sacas ha^{-1}). A análise de efeitos diretos indicou que P3S (vagens com 3 grãos) apresentou o maior efeito 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.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

Figura 2. Diagramas de caixa de características agronômicas 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

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

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 3).

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.

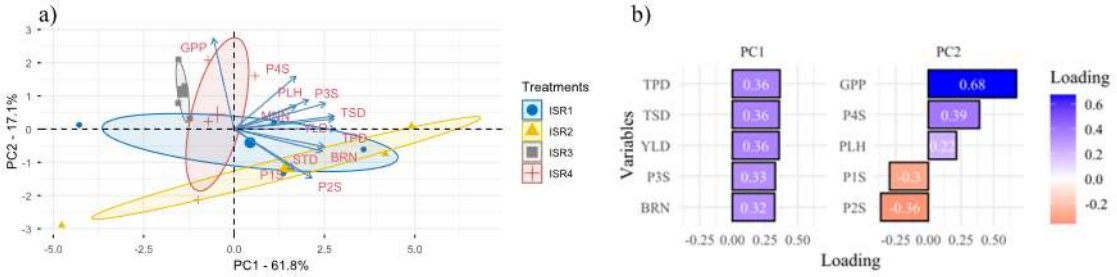
Em contraste, ISR3 e ISR4 não se associaram às características estruturais iniciais (BRN, P1S, P2S, STD), mas apresentaram vínculo com atributos reprodutivos de maior valor agregado, especialmente P3S, P4S, TPD, TSD, PLH, YLD e GPP — este último o principal determinante do PC2. Assim, esses manejos exibem 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

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

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 3. 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 4a) 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 4b), 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,

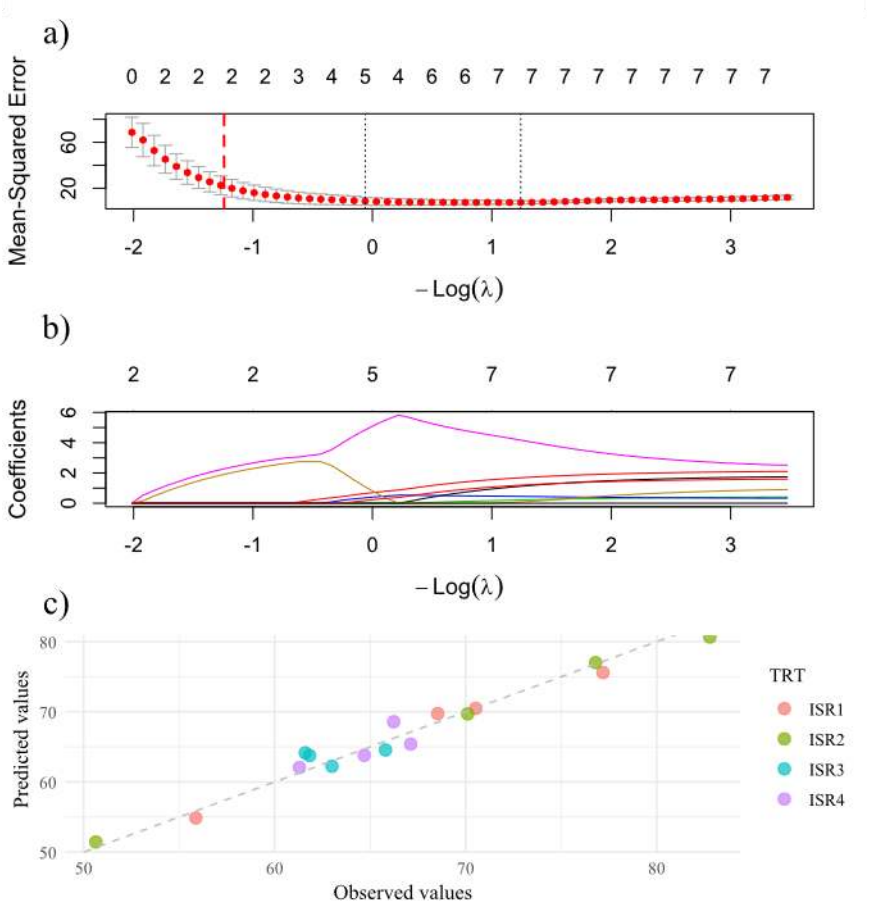
REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

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



REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

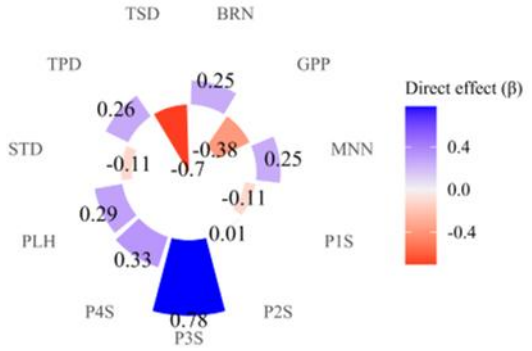
A análise de trilha revelou contrastes marcantes entre as magnitudes e direções dos efeitos diretos das variáveis explicativas sobre o rendimento de grãos (YLD). O maior efeito direto positivo foi observado para P3S (β = 0,78), indicando sua forte contribuição individual para a produtividade, em consonância com os resultados descritivos, da PCA e da seleção via LASSO. Outros efeitos positivos relevantes incluíram P4S (β = 0,33), PLH (β = 0,29), TPD (β = 0,26), bem como BRN (β = 0,25) e MNN (β = 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 5).

Por outro lado, destacaram-se efeitos diretos negativos expressivos em TSD (β = –0,70) e GPP (β = –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 (β = –0,11) e P1S (β = –0,11), indicando impactos adversos moderados. A variável P2S (β = 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.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

Figura 5. 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)

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

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

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

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.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

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.

4. 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

Ceresini, P. C., Silva, T. C., Vicentini, S. N. C., Júnior, R. P. L., Moreira, S. I., Castro-Ríos, K., de Jesus Júnior, W. C. (2024). Strategies for managing fungicide resistance in the Brazilian tropical agroecosystem: Safeguarding food safety, health, and the environmental quality. *Tropical Plant Pathology*, 49(1), 36-70.

Chicowski, A. S., Bredow, M., Utiyama, A. S., Marcelino-Guimarães, F. C., Whitham, S. A. (2023). Soybean–*Phakopsora pachyrhizi* interactions: advances and challenges in understanding soybean rust. *Tropical Plant Pathology*, 48(1), 75–90.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

Cruz, C. D., Nascimento, M., Regazzi, A. J., Carneiro, P. C. S. (2020). Multivariate approaches in selecting superior soybean genotypes based on agronomic and physiological traits. *Euphytica*, 216(5), 1–16.

Fontes, B. A., Silva, L. C., Picanço, B. M., Guimarães, F. M., Zambolim, L., Rodrigues, F. A. (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., May De Mio, L. L., Mezzomo, R. F., Ward, N. A., Godoy, C. V. (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., Luz, A. R., Thiel, A. M., Castagnaro, R., Sponchiado, J. C., Pivetta, L. A. (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., Silva, L. C., Azevedo, L. A. S., Moraes, M. C. B., Faria, M. V., Rodrigues, F. A. (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., Capuani, S., Rosa, T. C., Lenz, G., Zanon, A. J. (2020). Effects of plant density on soybean agronomic traits and grain yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55, e01693.

Siqueira Filho, J. A., Silva, D. C. G., Juliatti, F. C., Juliatti, B. C., Rios, J. A. (2025). Fungicide mixtures to control Asian soybean rust. *Revista de Ciências Agrárias*, 48(1), 88–97.

Yang, Y., Liu, Z., Zhao, H., Li, Z., Li, W., Yang, C., Wang, Z. (2023). Induced defense response in soybean to *Sclerotinia sclerotiorum* by the antibiotic wuyiencin. *Plant Disease*, 107(5), 1323–1332.

Zuffo, A. M., Bruzi, A. T., Zambiazzi, E. V., Soares, I. O., Silva, K. B., Rezende, P. M. (2020). Correlations and path analysis in agronomic traits of soybeans under defoliation. *Bioscience Journal*, 36(2), 515–523.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 16/03/2026 - **Accepted:** 22/04/2026
Vol: 13.08
DOI: 10.66104/6rws9277
Pages: 1-21

Zuffo, A. M., Bruzi, A. T., Zambiazzi, E. V., Soares, I. O., Silva, K. B., Rezende, P. M. (2025). Correlations and path analysis of soybean cultivars sown in two seasons. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 16(1), 54–68.