

APLICAÇÃO DE MANOVA E ANÁLISE CANÔNICA NA AVALIAÇÃO DE INDUTORES DE RESISTÊNCIA EM SOJA

Lucas Candido Ferreira¹

Gabriel Nunes Moraes²

Madiessa Cristiéli Lemanski²

Gabriele Lima de Souza²

Rayssa Rocha Camargo Vasconcelos²

Luiz Leonardo Ferreira³

Resumo: Este estudo avaliou a eficácia da aplicação foliar de produtos com potencial indutor de resistência na cultura da soja, considerando seus impactos em características morfológicas e na produtividade. O experimento foi conduzido em campo, em Mineiros-GO, utilizando delineamento em blocos ao acaso com quatro tratamentos distintos, os quais consistiram em diferentes combinações de fungicidas convencionais e produtos alternativos, como Safe, Elision e Icon Copper, em substituição aos multissítios clorotalonil e mancozebe. Foram avaliadas 12 variáveis agronômicas relacionadas ao crescimento e ao rendimento da planta. As análises estatísticas incluíram manova e análise de variáveis canônicas. O Teste de Roy na MANOVA indicou efeito altamente significativo dos tratamentos ($p < 0,001$), demonstrando que os indutores de resistência influenciaram de forma consistente os caracteres agronômicos da soja. As variáveis relacionadas ao crescimento vegetativo e ao rendimento (NRL, NNH, DC, AP, NV1G, NV2G, NV3G, NV4G, NTV e REN) foram diferenciadas conforme o produto aplicado. A Análise de Variáveis Canônicas (CVA) explicou 99,1% da variância entre os grupos, destacando contrastes claros: Indu.Res1 apresentou maior vigor vegetativo, Indu.Res2 mostrou equilíbrio entre crescimento e produtividade, Indu.Res4 desempenho intermediário e Indu.Res3 menor resposta fisiológica. Esses resultados evidenciam que a escolha do indutor é determinante para ganhos produtivos e confirmam a utilidade das análises multivariadas como ferramenta para o manejo sustentável da cultura.

Palavras-chave: Análise multivariada. *Glycine max*. Indução de resistência. Produtos foliares.

¹ Graduando em Engenharia Agrônoma – lucascfcostarica@gmail.com

² Graduando(a) em Engenharia Agrônoma.

³ Professor Titular do Centro Universitário de Mineiros – GO.

INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) ocupa posição de destaque no cenário agrícola mundial, tanto pela relevância econômica quanto pelo papel fundamental na alimentação humana e animal. No Brasil, é a principal cultura, com área plantada de 40,921 milhões de hectares na safra 2021/2022 e produção de 123,829 milhões de toneladas, consolidando o país como o maior produtor global do grão (CONAB, 2022).

A nutrição vegetal constitui um dos pilares para o desenvolvimento e a produtividade agrícola. O manejo adequado dos nutrientes é essencial para garantir crescimento saudável das plantas e maximizar o rendimento. De acordo com Fageria (2009), a eficiência no uso de nutrientes é fator determinante para a sustentabilidade da agricultura moderna. O fornecimento equilibrado de macro e micronutrientes também é indispensável para manter a saúde do solo e reduzir impactos ambientais negativos decorrentes do uso intensivo de fertilizantes químicos (Hawkesford et al., 2012).

Entre as estratégias de manejo fitossanitário, a indução de resistência tem se mostrado eficaz, pois ativa mecanismos de defesa natural das plantas. Borges et al. (2022) destacam que essa prática pode representar alternativa viável ao uso de defensivos químicos, ampliando a sustentabilidade do manejo. Camochena et al. (2020) verificaram que fosfitos de potássio são capazes de induzir respostas defensivas significativas, evidenciando seu potencial no aumento da resistência vegetal.

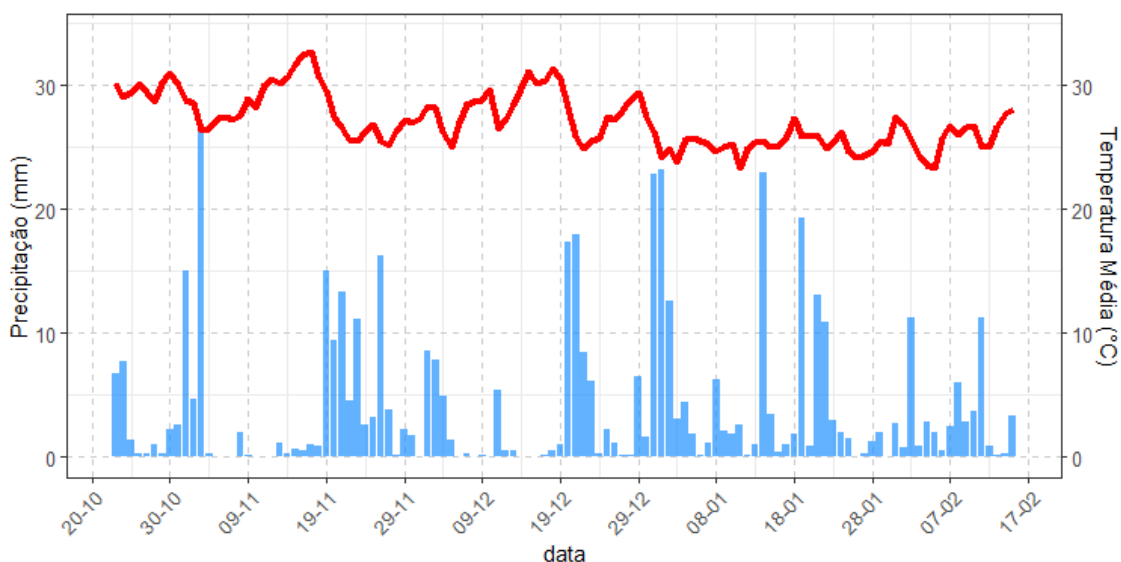
Resultados prévios também apontam efeitos positivos de produtos foliares na indução de resistência da soja. Lorenzetti et al. (2021) observaram que leveduras como *Cryptococcus laurentii* e *Zygoascus hellenicus* intensificaram a atividade de enzimas relacionadas à defesa, incluindo peroxidase e polifenoloxidase. Zheng et al. (2021) ressaltaram, ainda, a importância de compreender os mecanismos genéticos que regulam as respostas a nutrientes aplicados, reforçando a ligação entre regulação genética e acúmulo de compostos protetores.

Considerando a relevância da soja para a economia e para a alimentação mundial, bem como a necessidade de otimizar a nutrição vegetal, este trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia da aplicação foliar de produtos indutores de resistência na cultura da soja. Pretende-se verificar seus impactos sobre produtividade e componentes morfológicos, contribuindo para práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Fazenda Invernadinha, zona rural do município de Mineiros, Goiás, Brasil. Geograficamente está a 17°23'07.3"S de latitude e 52°16'54.3"W de longitude e com aproximadamente 800 m de altitude. A área experimental é classificada como clima do tipo Aw (quente a seco) (Köppen e Geiger, 1936). Durante o período de execução do experimento foram registradas as temperaturas (máxima: 32.68°C, mínima: 23.33°C e média: 27.19°C), além da precipitação total de 472.90 mm (Figura 1).

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



Fonte: Autores

Os resultados das análises químicas das amostras de solo na camada 0-20 cm coletadas na área do experimento são: potencial de hidrogênio 5.7; cálcio 5.62, magnésio 1.77, alumínio 0.0, hidrogênio + alumínio 2.4, capacidade de troca catiônica 9.9, em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; potássio 105, fósforo 5.5, cobre 1, ferro 54, manganês 17.9, zinco 2, sódio 2.4, em mg dm^{-3} ; argila 46.5, silte 10, areia 43.5, matéria orgânica 4.07 e carbono orgânico 2.36, em %. Os dados foram tomados de acordo com metodologia da (Embrapa, 2009).

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso com 4 tratamentos, correspondentes aos seguintes manejos de indutores de resistência na cultura da soja (Tabela 1). Esses manejos consistem na utilização dos produtos (Safe - 0.13% N + 0.52% Cu, Elision - 2.82% k_2O e Icon Copper - 10.74% Cu) em substituição aos multissítios convencionalmente

utilizados como é o Clorotalonil Nortox (725% clorotalonil) e Unizeb Gold (75% mangozebe + 15% Mn + 2% Zn).

As parcelas experimentais foram compostas de 8 linhas de 5 metros de comprimento, com espaçamento de 0.45 m nas entrelinhas, a área útil da parcela foi de 18 m². O semeio ocorreu em 23 de outubro de 2023 e a colheita em 15 de fevereiro de 2024.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos, na cultura da soja sob manejos de indução de resistência.

Tratamento	Produtos comerciais	Dose/ha	Operação	Fenologia	Data de aplicação
Ind.Res1	Score Flex	Bula	Pós Emergente	Vegetativo	31 de nov/23
	Orkestra + Clorotalonil Nortox	Bula + 1 L	1ª de fungicida	R1	18 de dez/23
	Vessaria + Unizeb Gold	600 ml + 1,5 kg	2ª de fungicida	R3	03 de jan/24
	Ativum + Clorotalonil Nortox	800 ml + 1 L	3ª de fungicida	R5	18 de jan/24
Ind.Res2	Score Flex + Elision	150 ml + 500 ml	Pós Emergente	Vegetativo	31 de nov/23
	Orkestra + Safe	300 ml + 500 ml	1ª de fungicida	R1	18 de dez/23
	Vessaria + Safe	600 ml + 500 ml	2ª de fungicida	R3	03 de jan/24
	Ativum + Clorotalonil Nortox	800 ml + 1 L	3ª de fungicida	R5	18 de jan/24
Ind.Res3	Score Flex	150 ml	Pós Emergente	Vegetativo	31 de nov/23
	Orkestra + Safe	300 ml + 800 ml	1ª de fungicida	R1	18 de dez/23
	Vessaria + Safe	600 ml + 800 ml	2ª de fungicida	R3	03 de jan/24
	Ativum + Clorotalonil Nortox	800 ml + 1 L	3ª de fungicida	R5	18 de jan/24
Ind.Res4	Score Flex	150 ml	Pós Emergente	Vegetativo	31 de nov/23
	Orkestra + Safe + Icon Copper	300 ml + 500 ml + 50 ml	1ª de fungicida	R1	18 de dez/23
	Vessaria + Safe + Icon Copper	600 ml + 500 ml + 50 ml	2ª de fungicida	R3	03 de jan/24
	Ativum + Clorotalonil Nortox	800 ml + 1 L	3ª de fungicida	R5	18 de jan/24

Fonte: Autores

Antes do plantio foi realizada a dessecação em pré-plantio (Cobucci et al., 1999). A adubação foi utilizada com 173 kg ha⁻¹ do fertilizante MAP (09-52-00) aplicada no sulco e em cobertura 150 kg ha⁻¹ de KCL, aplicado 50% antes do plantio e 50% 20 dias após o semeio. A semeadura foi realizada em 23 de outubro de 2023 (Ferreira et al., 2019). Durante a condução do experimento o controle de pragas, doenças e plantas daninhas foram realizados à medida que se fizer necessário, respeitando as boas práticas e o manejo integrado (Quintela, 2001). Ao término do trabalho foram coletadas 30 plantas ao acaso na área útil da parcela experimental, para avaliação dos atributos agrônômicos.

As variáveis coletadas foram: NRL: número de ramos laterais, NNH: número de nós na haste, NV1G: número de vagens com 1 grão, NV2G: número de vagens com 2 grãos, NV3G: número de vagens com 3 grãos, NV4G: número de vagens com 4 grãos, NTV: número total de

vagens, NGP: número de grãos por planta, GPV: grãos por vagens, DC: diâmetro do caule, AP: altura da planta e REN: rendimento.

Os dados obtidos foram inicialmente submetidos à verificação das pressuposições do modelo estatístico, incluindo a normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk) e a homogeneidade das variâncias (teste de Levene). Atendidas essas condições, procedeu-se à análise de variância multivariada (MANOVA), estruturada no seguinte modelo geral:

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

em que Y é a matriz de respostas ($n \times p$) contendo as variáveis dependentes, X é a matriz do delineamento experimental, β representa o vetor de parâmetros dos efeitos fixos (tratamentos) e ε é a matriz de erros aleatórios, assumidos com distribuição normal multivariada $\varepsilon \sim N(0, \Sigma)$. A hipótese nula testada foi:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

contra a hipótese alternativa de que pelo menos um vetor de médias difere entre os tratamentos.

Para explorar a estrutura multivariada e visualizar as relações entre tratamentos e variáveis dependentes, foi utilizada a Análise de Variáveis Canônicas (CVA). Nessa abordagem, as combinações lineares das variáveis originais foram obtidas a partir da maximização da razão entre a matriz de variância entre grupos (B) e a matriz de variância dentro dos grupos (W), resolvendo-se o problema de autovalores:

$$|B - \lambda W| = 0$$

As funções canônicas resultantes permitiram a construção de biplots, nos quais os tratamentos foram posicionados em função de suas médias canônicas e as variáveis originais representadas como vetores, facilitando a interpretação das associações. As análises estatísticas foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pelo Teste de Roy na MANOVA evidenciam significância estatística elevada ($p < 0,001$), demonstrando que os tratamentos exerceram influência consistente sobre as características agrônômicas da soja. Tal evidência sustenta a hipótese de que diferentes produtos indutores de resistência produzem efeitos distintos sobre as variáveis analisadas. Esse achado possui relevância prática para o manejo da cultura, pois indica que a escolha do produto pode variar conforme o objetivo do agricultor, seja para favorecer

características como número de ramos laterais (NRL), número de nós na haste (NNH), número de vagens com grãos (NV1G, NV2G, NV3G, NV4G), número total de vagens (NTV), número de grãos por planta (NGP), grãos por vagem (GPV), diâmetro do caule (DC), altura da planta (AP) ou rendimento de grãos (REN) (Tabela 2).

Esses resultados estão em consonância com Macedo et al. (2021), que verificaram a eficácia da aplicação de indutores de resistência no controle de *Sclerotinia sclerotiorum* em soja, ressaltando que diferentes métodos de aplicação ocasionaram respostas diferenciadas nas plantas. De forma semelhante, Camochena et al. (2020) relataram que, em distintos estádios fenológicos da cultura, os indutores desencadearam defesas eficazes contra o mofo branco, evidenciando sua capacidade de alterar o perfil de resistência das plantas de maneira significativa.

Tabela 2. Teste de Roy, na cultura da soja sob manejos de indução de resistência.

	Df	Roy approx	F num	Df den	Df	Pr(>F)
Repetição	3	548890	182963	9	3	1.908e-08
Tratamentos	3	420902	140301	9	3	2.842e-08
Resíduo	9					

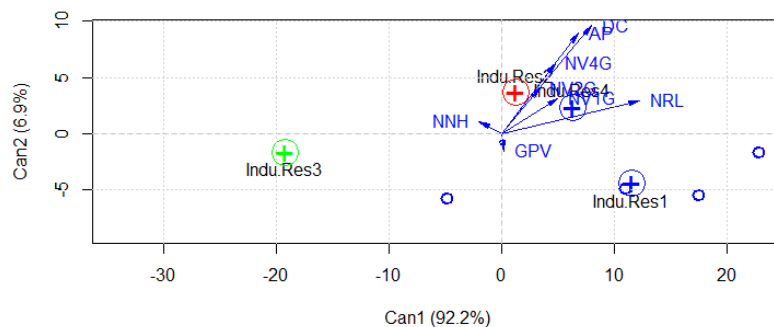
Fonte: Autores

A Análise de Variáveis Canônicas (CVA) apresentou elevada capacidade de discriminação, sendo que a primeira função canônica (Can1) explicou 92,2% da variação total e a segunda (Can2) contribuiu com 6,9%, alcançando 99,1% da variância acumulada entre os grupos. Esses resultados evidenciam que as duas primeiras funções foram suficientes para representar quase toda a estrutura multivariada dos dados, permitindo visualizar de forma clara a separação entre os tratamentos e as variáveis dependentes analisadas (Figura 2). As médias canônicas reforçam essa distinção: Indu.Res1 e Indu.Res3 mostraram maiores contrastes ao longo de Can1, enquanto Indu.Res2 e Indu.Res4 se diferenciaram mais intensamente em Can2, revelando diferenças agrônomicas e funcionais relevantes.

O tratamento Indu.Res3 foi posicionado no extremo negativo de Can1, em associação a NV2G, NV1G e GPV, indicando desempenho fisiológico inferior e possível maior vulnerabilidade. Por outro lado, Indu.Res1 destacou-se no polo positivo de Can1, correlacionando-se a NRL, AP e DC, sugerindo melhor desenvolvimento vegetativo e maior acúmulo de biomassa (Figura 2). Já Indu.Res2, considerado o tratamento de melhor desempenho geral, manteve-se próximo ao centro do gráfico, mas com leve deslocamento em Can2, refletindo equilíbrio entre crescimento e sanidade, influenciado por variáveis como NNH,

NV4G e DC. O tratamento Indu.Res4 apresentou comportamento semelhante a Indu.Res2, porém com influência mais evidente de variáveis secundárias (Figura 2).

Figura 2. Análise de variáveis canônicas obtida através do algoritmo de Mahalanobis dos caracteres, na cultura da soja sob manejos de indução de resistência.



Fonte: Autores

O Teste de Roy na MANOVA revelou efeito altamente significativo dos tratamentos ($p < 0,001$), confirmando que os diferentes indutores de resistência exerceram influência consistente sobre as variáveis agronômicas da soja. Esse resultado valida a hipótese de que a escolha do produto pode direcionar ganhos em características específicas, como número de ramos laterais (NRL), número de nós na haste (NNH), diâmetro do caule (DC), altura de planta (AP), componentes de vagens (NV1G, NV2G, NV3G, NV4G, NTV) e rendimento (REN). A análise de variáveis canônicas (CVA) demonstrou elevada capacidade discriminatória, com a primeira função canônica explicando 92,2% da variação e a segunda 6,9%, totalizando 99,1% da variância entre os tratamentos. A separação gráfica evidenciou contrastes nítidos: Indu.Res1 destacou-se por maior vigor vegetativo, Indu.Res2 apresentou melhor equilíbrio entre crescimento e produtividade, Indu.Res4 mostrou desempenho intermediário, enquanto Indu.Res3 esteve associado a menor desempenho fisiológico e produtivo.

CONCLUSÃO

Os resultados confirmam a eficiência dos indutores de resistência na diferenciação das respostas agronômicas da soja. O tratamento Indu.Res2 demonstrou-se o mais eficaz, equilibrando crescimento e rendimento, seguido por Indu.Res1 e Indu.Res4, enquanto Indu.Res3 mostrou limitações e não se apresentou como alternativa viável para maximização da produtividade. Dessa forma, a aplicação de análises multivariadas e canônicas mostrou-se essencial para identificar padrões integrados de resposta, reforçando o potencial do manejo biológico como estratégia sustentável para incrementar a performance da cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bhat, J. A., Adeboye, K. A., Ganie, S. A., Barmukh, R., Hu, D., Varshney, R. K., & Yu, D. (2022). Genome-wide association study, haplotype analysis, and genomic prediction reveal the genetic basis of yield-related traits in soybean (*Glycine max* L.). **Frontiers in Genetics**, 13, 953833.

Borges, N. O., da Silva Solino, A. J., Francischini, R., Campos, H. D., Oliveira, J. S. B., & Schwan-Estrada, K. R. F. (2022). Induction of soybean resistance mechanisms to anthracnose by biocontrol agents. **Revista Caatinga**, 35, 265-275.

Camocheda, R. C., Steilman, P., Santos, I. D., Dallemole-Giaretta, R., & Oliveira, M. D. C. (2020). Ação de fosfitos de potássio no manejo de mofo branco em soja. **Summa Phytopathologica**, 46, 260-266.

Castaldo, J. H., & Sassani, L. (2023). Ácido salicílico como indutor de resistência na soja contra a ferrugem asiática. **Revista Eletrônica Interdisciplinar**, 15(2).

Chi, J., Song, S., Zhang, H., Liu, Y., Zhao, H., & Dong, L. (2021). Research on the mechanism of soybean resistance to phytophthora infection using machine learning methods. **Frontiers in Genetics**, 12, 634635.

Cruz, C. D. (2016). Genes Software – extended and integrated with the R, Matlab and Selegen. **Acta Scientiarum**, 38(4), 547-552.

Embrapa. (2009). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília: Informação Tecnológica, 628p.

Fan, S., Dong, L., Han, D., Zhang, F., Wu, J., Jiang, L., ... & Xu, P. (2017). GmWRKY31 and GmHDL56 enhances resistance to *Phytophthora sojae* by regulating defense-related gene expression in soybean. **Frontiers in Plant Science**, 8, 781.

Ferreira, L. L., Amaral, U., Silva, C. S., Curvelo, C. R. S., & Pereira, A. I. A. (2019). Components of maize crop as a function of doses of polymerized urea. **Journal of Agricultural Science**, 11, 185-192.

Ferreira, T. C., & Bettiol, W. (2019). Biocontrole de patógenos de solo e promoção de crescimento vegetal promovidos por *Bacillus* spp. em milho. **BIOFARM-Journal of Biology & Pharmacy and Agricultural Management**, 15(4), 337-356.

Gabardo, G., Dalla Pria, M., da Silva, H. L., & Harms, M. G. (2020). Método da folha destacada para avaliação da indução de resistência de produtos alternativos a *Phakopsora pachyrhizi*, *Sclerotinia sclerotiorum* e *Rhizoctonia solani* em soja. **Brazilian Journal of Development**, 6(7), 43847-43862.

Hou, X., He, Z., Che, Z., Li, H., Tan, X., & Wang, Q. (2023). Molecular mechanisms of *Phytophthora sojae* avirulence effectors escaping host recognition. **Frontiers in Microbiology**, 13, 1111774.

Köppen, W., & Geiger, R. (1936). *Handbuch der klimatologie*. Berlin: Gebrüder Borntraeger.
Liu, T., Wang, H., Liu, Z., Pang, Z., Zhang, C., Zhao, M., ... & Zhang, S. (2021). The 26S proteasome regulatory subunit GmPSMD promotes resistance to *Phytophthora sojae* in soybean. **Frontiers in Plant Science**, 12, 513388.

Lorenzetti, E., Carvalho, J. C., Kuhn, O. J., & Stangarlin, J. R. (2021). Indução de fitoalexinas gliceolinas e proteínas relacionadas à defesa em cotilédones de soja tratado com *Ascochyta blight*. **Acta Iguazu**, 10(2), 48-57.

Macedo, R. L. S., Martins, W. S., & de Miranda, F. F. R. (2021). Ação do fosfito na indução de resistência da soja no manejo de mofo branco na região do cerrado. **Revista Sítio Novo**, 5(3), 45-52.

Quintela, E. D. (2001). Manejo integrado de pragas do feijoeiro. **Embrapa Arroz e Feijão. Circular técnica**.

R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

Yoosefzadeh-Najafabadi, M., Torabi, S., Tulpan, D., Rajcan, I., & Eskandari, M. (2021). Genome-wide association studies of soybean yield-related hyperspectral reflectance bands using machine learning-mediated data integration methods. **Frontiers in Plant Science**, 12, 777028.

Yao, S., Wu, F., Hao, Q., & Ji, K. (2020). Transcriptome-wide identification of WRKY transcription factors and their expression profiles under different types of biological and abiotic stress in *Pinus massoniana* Lamb. **Genes**, 11(11), 1386.

Zheng, Q., Chen, W., Luo, M., Xu, L., Zhang, Q., & Luo, Z. (2021). Comparative transcriptome analysis reveals regulatory network and regulators associated with proanthocyanidin accumulation in persimmon. **BMC Plant Biology**, 21, 1-16.