



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS URUÇUÍ
CURSO: BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRONÔMICA

RYAN HENRIQUE DE CARVALHO CAVALCANTE

**RESPOSTA E EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO EM CULTIVARES DE SOJA EM
SOLOS DO CERRADO**

URUÇUÍ-PI
2025

RYAN HENRIQUE DE CARVALHO CAVALCATE

RESPOSTA E EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO EM CULTIVARES DE SOJA EM
SOLOS DO CERRADO

Trabalho de Conclusão de Curso (artigo científico) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Uruçuí.

Orientador(a): Prof. Dr. Wallace de Sousa Leite.

URUÇUÍ-PI

2025

RESPOSTA E EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO EM CULTIVARES DE SOJA EM SOLOS DO CERRADO

Ryan Henrique de Carvalho Cavalcante¹
Wallace de Sousa Leite²

RESUMO

Diante da importância do fósforo para a produtividade da soja e de sua limitação como recurso, torna-se essencial identificar genótipos mais eficientes na absorção desse nutriente; assim, este estudo objetiva avaliar a resposta e a eficiência de uso do fósforo em cultivares de soja submetidas a diferentes níveis de adubação fosfatada em solo de Cerrado, utilizando parâmetros biométricos obtidos na fase vegetativa. O experimento foi conduzido na fazenda experimental do IFPI - campus Uruçuí em viveiro no delineamento inteiramente casualizado, em esquema de parcelas subdivididas 3 x 8, sendo os 3 tratamentos com diferentes condições de fósforo (0 kg ha⁻¹, 100 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹) e as parcelas correspondendo as oito cultivares com cinco repetições de cada tratamento com cada cultivar. As cultivares avaliadas foram: Neo 790 IPRO, Neo 802 I2X, Neo 820 IPRO, DM 78IX80 I2X, DM 8085 IPRO, DM 82I78 IPRO, TMG 22X83 I2X e ÍMPETO I2X. Os parâmetros avaliados foram: altura de plantas (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR), massa fresca total (MFT), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST). Entre as cultivares avaliadas, destacaram-se Neo 820 IPRO e Neo 802 I2X, que apresentaram maior eficiência de absorção e uso do fósforo nos diferentes níveis de disponibilidade. Os resultados evidenciam ampla variabilidade genética entre os materiais e reforçam o potencial do uso de genótipos mais eficientes como estratégia para otimizar o aproveitamento do fósforo em sistemas agrícolas do Cerrado.

Palavras-chave: fósforo; cultivares; soja; biomassa; eficiência de absorção.

ABSTRACT

Given the importance of phosphorus for soybean productivity and its limited availability as a resource, it is essential to identify genotypes that are more efficient in absorbing this nutrient. Therefore, this study aimed to evaluate the response and efficiency of phosphorus use in soybean cultivars subjected to different levels of phosphate fertilization in Cerrado soil, using biometric parameters obtained during the vegetative phase. The experiment was conducted at the IFPI experimental farm - Uruçuí campus, in a greenhouse, using a completely randomized design in a 3 x 8 split-plot arrangement. The three treatments provided different phosphorus conditions (0 kg ha⁻¹, 100 kg ha⁻¹, and 200 kg ha⁻¹), and the plots corresponded to the eight cultivars, with five replications of each treatment for each cultivar. The cultivars evaluated were: Neo 790 IPRO, Neo 802 I2X, Neo 820 IPRO, DM 78IX80 I2X, DM 8085 IPRO, DM 82I78 IPRO, TMG 22X83 I2X, and ÍMPETO I2X. The parameters evaluated were: plant height (PH), shoot fresh weight (SFW), root fresh weight (RFW), total fresh weight (TFW), shoot dry weight (SWW), root dry weight (RDW), and total dry weight (TDM). Among the cultivars evaluated, Neo 820 IPRO and Neo 802 I2X stood out, showing greater efficiency in

¹Graduando em Eng. agrônoma. Instituto Federal do Piauí - campus Uruçuí. E-mail: ryan.hc.cavalcante@gmail.com

²Professor Doutor em Agronomia. Instituto Federal do Piauí - campus Uruçuí. E-mail: wallace.leite@ifpi.edu.br

phosphorus absorption and use at different availability levels. The results highlight wide genetic variability among the materials and reinforce the potential of using more efficient genotypes as a strategy to optimize phosphorus utilization in Cerrado agricultural systems.

Keywords: phosphorus; cultivars; soybean; biomass; absorption efficiency.

Data de aprovação: 11/12/2025

1. INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) possui grande relevância agrícola mundial, sendo uma das principais culturas voltadas para a produção de óleo e proteína vegetal. Segundo dados da Fao (2023), sua área cultivada ultrapassa 139 milhões de hectares no mundo, com uma colheita estimada em mais de 398 milhões de toneladas.

Atualmente, o ranking dos maiores produtores de soja do mundo é liderado pelo Brasil, seguido pelos Estados Unidos e Argentina (Agrosustentar, 2024). Na safra 2022/2023, a área plantada no Brasil foi de 44.062,6 milhões de hectares, resultando em uma produção total de 154.566,3 milhões de toneladas, destacando a contribuição da soja no PIB brasileiro e sua influência no mercado externo (Conab, 2024).

A soja se consolidou como uma das culturas mais relevantes para a alimentação e a indústria, devido à sua ampla aplicação e alto valor nutricional. Além de servir como base para a produção de óleo e farelo, também é amplamente utilizada em segmentos como cosméticos, fármacos, nutrição animal, entre outros. (Aprosoja, 2021).

O fósforo (P) desempenha importante papel em diversos processos na planta, participando na síntese de ATP (adenosina tri-fosfato), sendo responsável pela transferência de energia, desde o estágio vegetativo até o reprodutivo e participando da fotossíntese, síntese de proteínas, transporte de solutos, e também, para o desenvolvimento radicular, florescimento e frutificação. Portanto, o manejo adequado do fornecimento deste nutriente no solo é indispensável para que se consiga produtividades agrícolas satisfatórias. (Adorian et al., 2023).

Contudo, a dependência da agricultura moderna em relação ao fósforo apresenta uma problemática complexa e multifacetada, que ameaça a sustentabilidade da produção de alimentos em escala global. O fósforo é um recurso finito, derivado primariamente da mineração de rochas fosfáticas, cujas reservas são limitadas e geograficamente concentradas (Illakwahhi et al., 2024).

Além da escassez do recurso mineral, existe um paradoxo no ciclo do fósforo nos agroecossistemas. Estima-se que cerca de 40% dos solos cultivados no mundo sejam deficientes em fósforo disponível para as plantas, não por falta do elemento no solo, mas devido à sua baixa mobilidade e forte interação com os componentes do solo, que o imobilizam em formas insolúveis (Solangi et al., 2023).

Em contrapartida, o uso contínuo e, por vezes, excessivo de fertilizantes levou a um acúmulo de fósforo em 27% das terras agrícolas globais, que excedem os níveis agronomicamente ótimos, resultando em perdas para os sistemas aquáticos e causando graves problemas ambientais, como a eutrofização. Globalmente, a maior parte das terras agrícolas (73%) ainda se encontra abaixo dos níveis ideais de fósforo para um rendimento ótimo das culturas, evidenciando uma profunda ineficiência no manejo deste nutriente (Mcdowell et al., 2024).

Estudos demonstram que diferenças genéticas entre cultivares de soja podem resultar em variações superiores a 40% na capacidade de absorção e utilização de P, mesmo sob a mesma dose de fertilizante. Dessa forma, a seleção de genótipos mais eficientes pode reduzir significativamente a dependência por altas doses de adubação, contribuindo para sistemas produtivos mais resilientes, rentáveis e ambientalmente equilibrados (Xu et al., 2024).

Diante deste cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de estratégias que aumentem a eficiência do uso do fósforo na agricultura. Portanto, este estudo teve por objetivo avaliar a resposta e a eficiência de uso do fósforo em cultivares de soja submetidas a diferentes níveis de adubação fosfatada em solo de Cerrado, utilizando parâmetros biométricos obtidos na fase vegetativa.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e caracterização da área experimental

A pesquisa foi conduzida na Fazenda Experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI, no município de Uruçuí – PI, localizado às coordenadas 7°16'32,7"S, 44°30'21,2"O com altitude de 378 m. A classificação climática presente na área se enquadra no tipo Aw, característico de clima tropical e inverno seco (Köppen, 1936), com temperatura anual variando de 22°C a 37°C, e uma pluviosidade média anual de 1.069 mm.

2.2. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC), em esquema de parcelas subdivididas 3×8 , com cinco repetições. Os níveis de fósforo (NF), intitulados como baixo (0 kg ha^{-1}), médio (100 kg ha^{-1}) e alto (200 kg ha^{-1}), foram alocados nas subparcelas e as cultivares de soja (CS) nas parcelas. As oito cultivares avaliadas foram: Neo 790 IPRO, Neo 802 I2X, Neo 820 IPRO, DM 78IX80 I2X, DM 8085 IPRO, DM 82I78 IPRO, TMG 22X83 I2X e ÍMPETO I2X.

Tabela 1. Características agronômicas das cultivares de soja que serão utilizadas no experimento.

Cultivar	Grupo de Maturação	Biotecnologia
DM 78IX80 I2X	7.8	Intacta 2 Xtend® (I2X)
Neo 790 IPRO	7.9	IPRO
DM 8085 IPRO	8.0	IPRO
Neo 802 I2X	8.0	Intacta 2 Xtend® (I2X)
DM 82I78 IPRO	8.2	IPRO
Neo 820 IPRO	8.2	IPRO
TMG 22X83 I2X	8.3	Intacta 2 Xtend® (I2X)
ÍMPETO I2X	9.0	Intacta 2 Xtend® (I2X)

Fonte: obtido pelos detentores das sementes.

2.3. Implantação da cultura e condução do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação (viveiro), utilizando vasos com capacidade de 3 dm^3 preenchidos com solo coletado na na camada de 0-20 cm da Fazenda Experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), campus Uruçuí. Foi realizada amostragem e análise do solo para subsidiar as recomendações de calagem e adubação. O material coletado corresponde a um Latossolo Amarelo Distrófico, cujos atributos químicos encontram-se apresentados na Tabela 2, conforme resultados da análise realizada na mesma profundidade de coleta.

Tabela 2. Análise química de solo da área experimental

pH	M.O CaCl	p mg/dm³	Complexo Sortivo							Saturação do Complexo Sortivo				
			K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Ca	Mg	K
			cmol/dm³.....							%.....				
Nro:														
272384		Gleba:	0-20 cm											
4,0	18,0	2,6	0,10	0,38	0,29	0,69	4,77	0,77	5,54	13,9	47,2	6,9	5,2	1,8

Conforme a necessidade de correção da acidez do solo, realizou-se a calagem utilizando o método de elevação dos teores de cálcio e magnésio. Para isso, aplicaram-se 3,1 t ha⁻¹ de calcário dolomítico com PRNT de 100%. Considerando o volume dos vasos, a dose correspondente foi de 4,65 g de calcário por vaso de 3 dm³.

As sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium* sp., visando ao suprimento de nitrogênio (N) da cultura fornecido via fixação biológica.

A adubação potássica foi realizada com cloreto de potássio (KCl), na dose de 50 kg ha⁻¹ de K₂O, correspondente a 25 mg dm⁻³ após conversão para o volume de solo dos vasos. A aplicação foi fracionada em três momentos: uma dose em pré-plantio; a primeira cobertura aos 15 dias após a emergência (DAE); e a segunda cobertura aos 30 DAE. Além disso, foram realizadas aplicações foliares: aos 15 DAE utilizou-se a formulação Co–Mo, na dosagem de 4,16 mL L⁻¹; e aos 25 DAE aplicou-se o fertilizante foliar Starter Mn, na dosagem de 15 mL L⁻¹.

A adubação fosfatada foi realizada integralmente em pré-plantio, utilizando-se o fertilizante superfosfato simples (SSP), com estabelecimento de três níveis de P₂O₅: 0, 100 e 200 kg ha⁻¹, correspondentes a 0, 50 e 100 mg dm⁻³, respectivamente, após as conversões para o volume de solo dos vasos. Esses níveis constituíram os tratamentos avaliados, denominados como baixo, médio e alto.

A semeadura foi conduzida manualmente, depositando-se três sementes por vaso em covas com 3,0 cm de profundidade, seguida do desbaste das plântulas excedentes após a emergência (10 dias após o plantio).

2.4. Variáveis analisadas

Na fase vegetativa da cultura, foram avaliados os seguintes parâmetros biométricos: altura de planta (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR), massa fresca total (MFT), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST).

Ao final do estágio vegetativo, marcado pelo aparecimento do primeiro botão floral, as plantas foram coletadas e transportadas ao laboratório. Em seguida, foram separadas em raiz e parte aérea para pesagem e determinação da massa fresca. Posteriormente, o material vegetal foi acondicionado em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas, para secagem. Após esse período, procederam-se às pesagens para obtenção da massa seca da parte aérea e raiz. Para a obtenção da altura de plantas utilizou-se uma fita métrica.

2.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados experimentais foram analisados no programa computacional SISVAR e submetidos à análise de variância, com as médias agrupadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (Ferreira, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As cultivares apresentaram caráter responsivo aos tratamentos nos diferentes níveis de aplicação da adubação fosfatada, resultando em diferença estatística significativa entre os parâmetros avaliados. A eficiência de absorção de P é definida como a capacidade da planta em adquirir P do solo e utilizá-lo na produção de biomassa (Rubio, 2015). Na Tabela 3, é possível observar os dados da análise de variância dos parâmetros: massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR), massa fresca total (MFT), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST) e altura da planta (AP). Pelos resultados analisados verificou-se diferença significativa à 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$) para todas as variáveis na interação fósforo x cultivar.

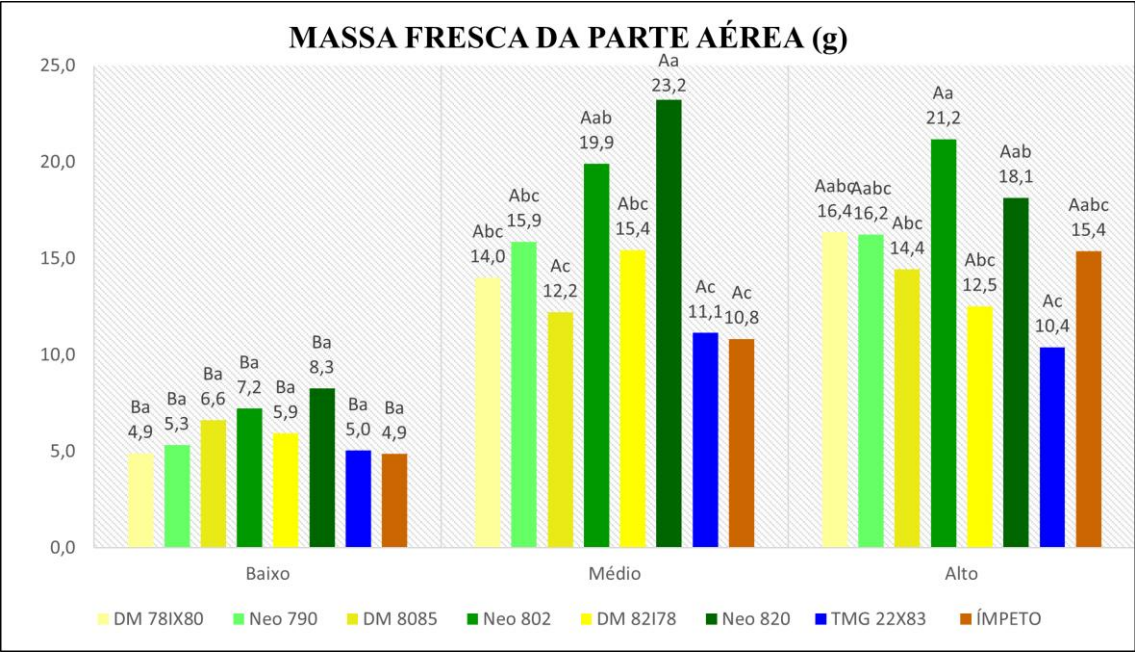
Tabela 3. Resumo da análise de variância para massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR), massa fresca total (MFT), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST) e altura de plantas (AP) de cultivares de soja sob diferentes níveis de fósforo. Uruçuí, PI, 2025.

FV	GL	QUADRADO MÉDIO						
		MFPA	MFR	MFT	MSPA	MSR	MST	AP
Fósforo (F)	2	1.187,45*	85,02*	1.907,53*	65,65*	1,08*	83,21*	21.716,00*
Cultivar (C)	7	108,94*	59,02*	228,17*	9,59*	1,16*	15,04*	10.257,34*
F x C	14	24,14*	28,36*	80,81*	1,51*	0,26*	2,34*	498,71*
Bloco	4	12,01	1,73	17,95	0,83	0,14	1,50	334,45
Erro	92	11,72	4,19	16,97	0,72	0,11	1,04	127,39
CV (%)		27,80	37,65	23,21	30,10	29,16	25,77	13,82
Média geral:		12,31	5,44	17,75	2,82	1,14	3,95	81,65

FV: fonte de variação; GL: grau de liberdade; CV: coeficiente de variação (%);*: significativo a 5% pelo teste F. Cavalcante, (2025)

A massa fresca da parte aérea (MFPA) das plantas apresentou diferenciação significativa entre as cultivares avaliadas em função dos níveis de adubação fosfatada empregados nos tratamentos baixo, médio e alto (Figura 1).

Figura 1. Massa fresca da parte aérea de cultivares de soja sob diferentes níveis de fósforo: baixo (0 kg ha^{-1} de P_2O_5); médio (100 kg ha^{-1} de P_2O_5) e alto (200 kg ha^{-1} de P_2O_5). Letras maiúsculas mostram diferenças entre os níveis de fósforo dentro da mesma cultivar; letras minúsculas mostram diferenças entre cultivares dentro do mesmo nível de fósforo, por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras representam a média ($n = 5$).



Fonte: Cavalcante, (2025).

No tratamento com baixo fósforo, as cultivares não diferiram estatisticamente entre si para o parâmetro MFPA, com variação de aproximadamente 4,9 g no genótipo DM 78IX80 a 8,3 g em Neo 820, indicando crescimento limitado devido à menor disponibilidade de fósforo (P). A limitação de P reduz a taxa fotossintética e a área foliar, comprometendo o acúmulo de massa e resultando em plantas de menor porte (Grant et al., 2001).

No tratamento com média adubação fosfatada, houve um incremento na MFPA na maioria dos genótipos, destacando-se o genótipo Neo 820, que apresentou o maior acúmulo (23,2 g). Esse aumento sugere que a disponibilidade intermediária de fósforo favoreceu o estabelecimento de uma arquitetura de planta mais eficiente energeticamente, com maior área foliar e maior taxa de assimilação. O incremento na biomassa das plantas tem interação significativa entre cultivar e taxa de P. O fornecimento de fósforo aumenta significativamente a biomassa acima do solo por planta (Xu et al., 2024).

No tratamento com alta adubação fosfatada, os valores de MFPA variaram entre aproximadamente 10,4 g na TMG 22X83 e 21,2 g da Neo 802, novamente com

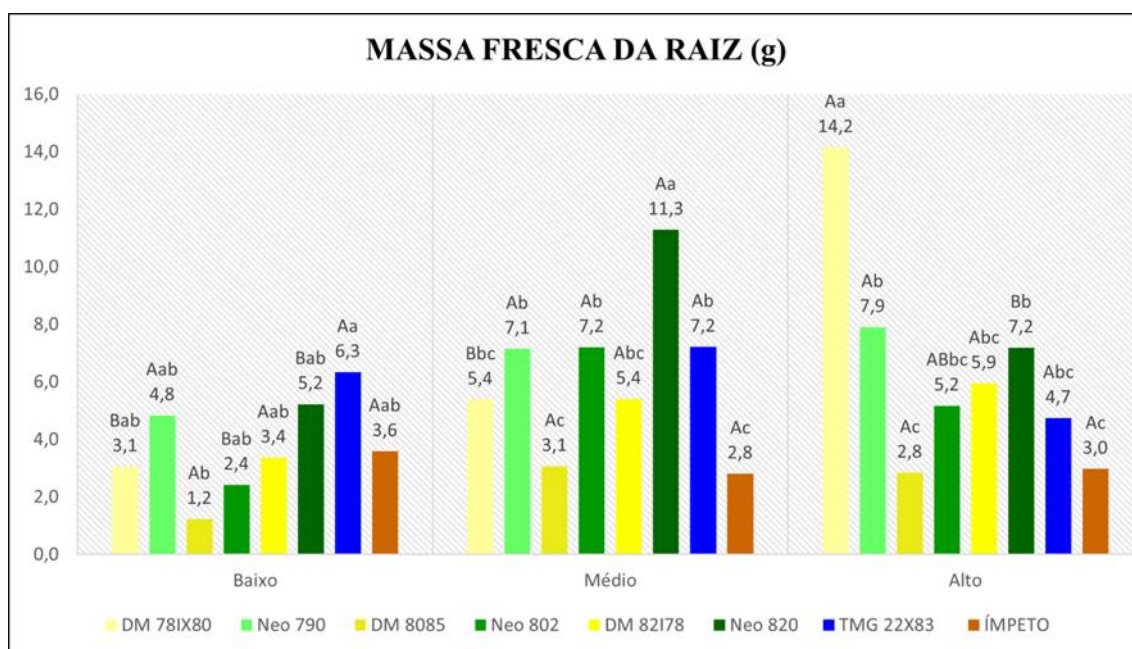
superioridade do genótipo Neo 802 e Neo 820. Embora alguns genótipos tenham mantido ou aumentado o acúmulo de massa, outros apresentaram redução relativa quando comparados ao nível médio. Esse comportamento reforça a existência de um ponto ótimo de utilização de P, acima do qual a planta pode não converter o nutriente adicional em crescimento proporcional, relação já descrita por Fageria (2009), que destaca que a eficiência de uso de fósforo pode diminuir em níveis elevados de adubação devido à saturação dos sítios metabólicos.

A comparação entre genótipos evidencia claramente a variabilidade genética na capacidade de resposta ao fósforo. O destaque dos genótipos Neo 802 e Neo 820, que apresentaram valores significativos de MFPA tanto nos níveis médio e alto, sugerindo maior eficiência na absorção, translocação e utilização de P, características agronomicamente desejáveis para condições de solos de baixa fertilidade.

Assim, os resultados deste experimento demonstram que possivelmente o nível médio de adubação fosfatada proporcionou o melhor equilíbrio entre disponibilidade de nutrientes e eficiência fisiológica, resultando em maior massa fresca da parte aérea para a maioria dos genótipos.

A massa fresca da raiz (MFR) apresentou variação significativa em resposta aos níveis de adubação fosfatada, demonstrando diferenças importantes tanto entre os tratamentos quanto entre os genótipos avaliados (Figura 2).

Figura 2. Massa fresca da raiz de cultivares de soja sob diferentes níveis de fósforo: baixo (0 kg ha^{-1} de P_2O_5); médio (100 kg ha^{-1} de P_2O_5) e alto (200 kg ha^{-1} de P_2O_5). Letras maiúsculas mostram diferenças entre os níveis de fósforo dentro da mesma cultivar; letras minúsculas mostram diferenças entre cultivares dentro do mesmo nível de fósforo, por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras representam a média ($n = 5$).



Fonte: Cavalcante, (2025)

No tratamento com baixa adubação fosfatada, os valores de MFR oscilaram de 1,2 g (DM 8085) a 6,3 g (TMG 22X83), sugerindo que a menor disponibilidade de fósforo limitou o desenvolvimento radicular, embora alguns genótipos tenham exibido maior tolerância à deficiência. Esse comportamento é consistente com a fisiologia do fósforo, nutriente essencial para o crescimento radicular inicial, respiração e alongamento celular. Resultados semelhantes foram observados por Grant et al. (2001), que destacaram que a baixa disponibilidade de fósforo reduz drasticamente a massa radicular em diversas culturas, gerando plantas menos eficientes na exploração do solo.

No tratamento com média adubação fosfatada, observou-se aumento expressivo da MFR em praticamente todos os genótipos, com variação de aproximadamente 3,1 g (DM 8085) a 11,3 g (Neo 820). O incremento radicular observado indica que doses intermediárias de fósforo favoreceram o crescimento de raízes primárias e secundárias, aumentando a capacidade de absorção e promovendo maior vigor estrutural. Os efeitos positivos da adubação fosfatada sobre o crescimento radicular observados no presente estudo são coerentes com evidências recentes na literatura. Dong et al. (2024) verificaram que a elevação dos níveis de fósforo, promovem alterações favoráveis na arquitetura radicular, resultando em maior comprimento de raízes, maior área superficial e incremento na atividade radicular.

A resposta ao tratamento com alta adubação fosfatada variou entre os genótipos, com valores de MFR que foram de aproximadamente 2,8 g (DM 8085) a 14,2 g (DM 78IX80), sendo este último o maior valor obtido entre todos os tratamentos. Embora

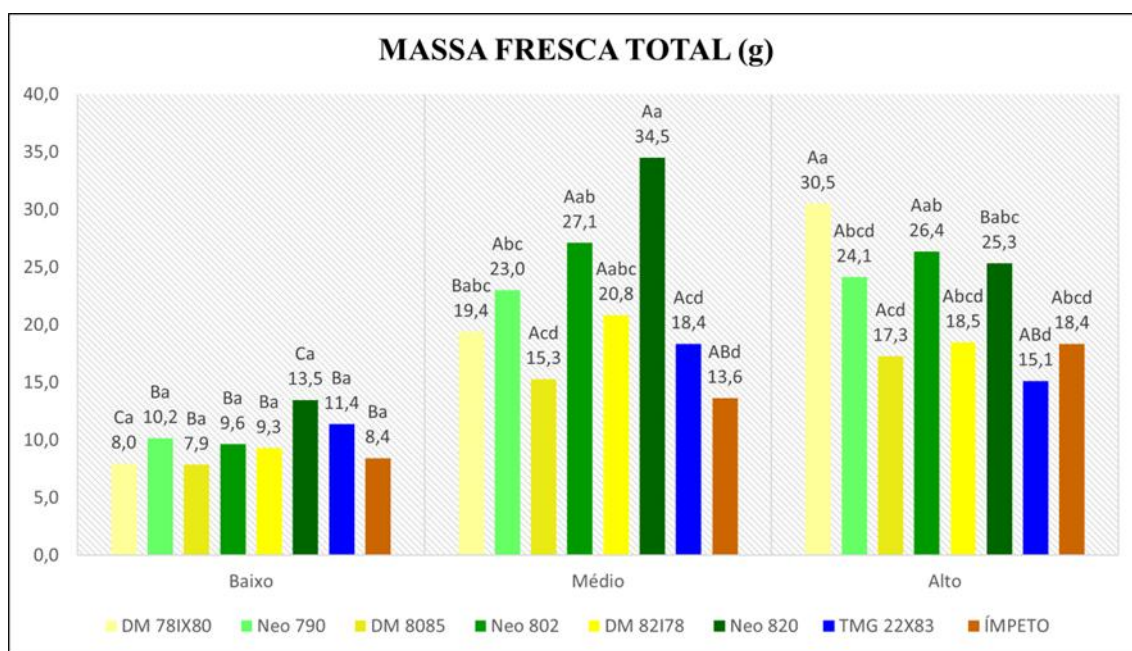
vários genótipos tenham apresentado aumento adicional em relação ao nível Médio, outros mostraram desempenho igual ou inferior, sugerindo que doses muito elevadas de P podem não resultar em ganhos proporcionais no desenvolvimento radicular. Esse comportamento reforça o conceito de ponto ótimo de absorção, no qual a planta atinge eficiência máxima em doses intermediárias e passa a responder menos intensamente ou até negativamente a doses excessivas (Fageria, 2009).

A análise comparativa entre os genótipos mostra que, enquanto alguns materiais como Neo 802, Neo 820 e DM 78IX80 apresentaram ganhos expressivos de MFR com o aumento da adubação fosfatada, outros apresentaram comportamento menos responsivo, indicando variação genética na eficiência de uso de fósforo. A superioridade de Neo 820 no nível médio e de DM 78IX80 no nível alto sugere que esses genótipos possuem mecanismos favoráveis de absorção e uso de P, como maior densidade de raízes finas, maior exsudação de fosfatases ou maior capacidade de mobilizar formas pouco disponíveis de fósforo no solo.

Contudo, os resultados demonstram que a adubação fosfatada influenciou fortemente o desenvolvimento radicular, com maior resposta média no nível médio, indicando que provavelmente essa faixa de disponibilidade proporcionou o melhor equilíbrio entre oferta nutricional e capacidade de utilização pelas plantas.

A massa fresca total (MFT) apresentou variação significativa entre os níveis de adubação fosfatada, evidenciando o papel determinante do fósforo no crescimento vegetal (Figura 3).

Figura 3. Massa fresca total de cultivares de soja sob diferentes níveis de fósforo: baixo (0 kg ha^{-1} de P_2O_5); médio (100 kg ha^{-1} de P_2O_5) e alto (200 kg ha^{-1} de P_2O_5). Letras maiúsculas mostram diferenças entre os níveis de fósforo dentro da mesma cultivar; letras minúsculas mostram diferenças entre cultivares dentro do mesmo nível de fósforo, por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras representam a média ($n = 5$).



Fonte: Cavalcante, (2025).

No nível baixo de fósforo, a produção de biomassa foi limitada, variando aproximadamente entre 7,9 g (DM 8085) e 13,5 g (Neo 820) entre as cultivares avaliadas. Essa redução está alinhada ao comportamento fisiológico esperado sob restrição de fósforo, condição em que há comprometimento de processos energéticos, redução na expansão foliar e menor desenvolvimento radicular. De acordo com Liu et al. (2023), a deficiência de P diminui a coordenação funcional entre folhas e raízes, reduzindo significativamente a produção de biomassa total em ambientes naturais altamente limitados em fósforo. Tal evidência reforça que, em cultivares avaliadas neste experimento, o crescimento limitado é consequência direta da baixa disponibilidade do nutriente.

Com a aplicação da adubação fosfatada no nível médio, observou-se incremento expressivo da MFT, com valores entre aproximadamente 13,6 g (Ímpeto) e 34,5 g (Neo 820). O desempenho elevado desse tratamento demonstra que a dose intermediária atendeu adequadamente à demanda metabólica das cultivares, favorecendo maior taxa fotossintética, acúmulo de fotoassimilados e maior capacidade de desenvolvimento de tecidos estruturais. Há uma elevação da biomassa das plantas, devido a interação significativa entre taxa de P aplicado e cultivares. O fornecimento de fósforo aumentou significativamente a biomassa total (Xu et al., 2024).

No tratamento alto fósforo, embora as cultivares também tenham apresentado elevada massa fresca total, variando de 15,1 g (TMG 22X83) e 30,5 g (DM 78IX80), os

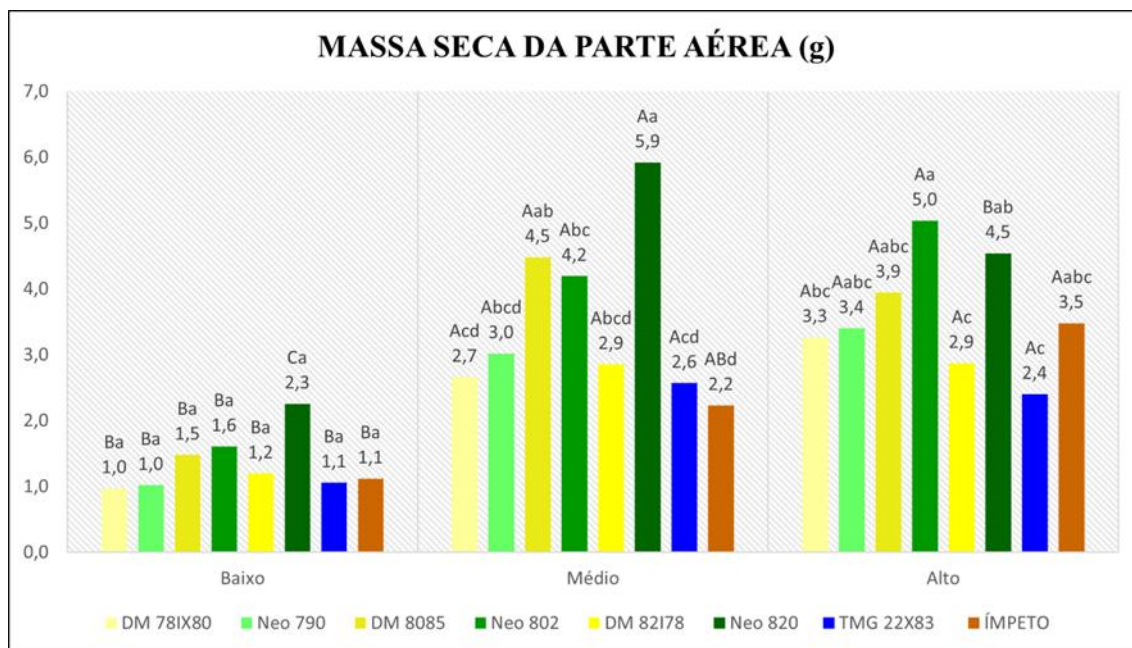
valores não superaram de forma consistente aqueles do nível médio, sugerindo proximidade de saturação fisiológica para o P. Situações semelhantes já foram reportadas em estudos recentes demonstram que existe uma dose ótima de fósforo para maximizar o crescimento vegetal, e que aplicações acima desse nível não aumentam proporcionalmente a biomassa, definindo a chamada “dose de máxima eficiência técnica” (Berghetti et al., 2024).

A forte variação entre cultivares, especialmente nos tratamentos médio e alto, demonstra divergências genéticas significativas quanto à eficiência de absorção e uso de P. Cultivares como Neo 802 e Neo 820 se destacaram com os maiores valores de biomassa total, indicando maior habilidade em explorar o solo e converter fósforo em crescimento.

Em síntese, os resultados demonstram que a adubação fosfatada exerce influência determinante no acúmulo de biomassa total, com clara superioridade do nível médio em relação à condição de baixa disponibilidade e desempenho equivalente ou superior ao nível alto.

A massa seca da parte aérea (MSPA) demonstrou resposta significativa às diferentes doses de adubação fosfatada, acompanhando o padrão fisiológico esperado em condições de variação na disponibilidade de fósforo (Figura 4).

Figura 4. Massa seca da parte aérea de cultivares de soja sob diferentes níveis de fósforo: baixo (0 kg ha^{-1} de P_2O_5); médio (100 kg ha^{-1} de P_2O_5) e alto (200 kg ha^{-1} de P_2O_5). Letras maiúsculas mostram diferenças entre os níveis de fósforo dentro da mesma cultivar; letras minúsculas mostram diferenças entre cultivares dentro do mesmo nível de fósforo, por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras representam a média ($n = 5$).



Fonte: Cavalcante, (2025).

No tratamento com baixo fósforo, observa-se produção reduzida de massa seca, com valores que variaram entre aproximadamente 1,0 g (DM 78IX80) e 2,3 g (Neo 820), indicando limitação clara ao crescimento vegetativo. A baixa formação de tecidos foi acompanhada da ausência de diferenças estatísticas marcantes entre as cultivares, conforme sugerem as letras iguais presentes nas barras, reforçando que o déficit de fósforo foi suficientemente severo para restringir o desenvolvimento independentemente do potencial genético de cada material. De acordo com Liu et al. (2023), a limitação de P compromete processos bioquímicos centrais, reduz expansões foliares e processos fotossintéticos, prejudicando a deposição de massa seca, fenômeno inteiramente compatível com o observado neste estudo.

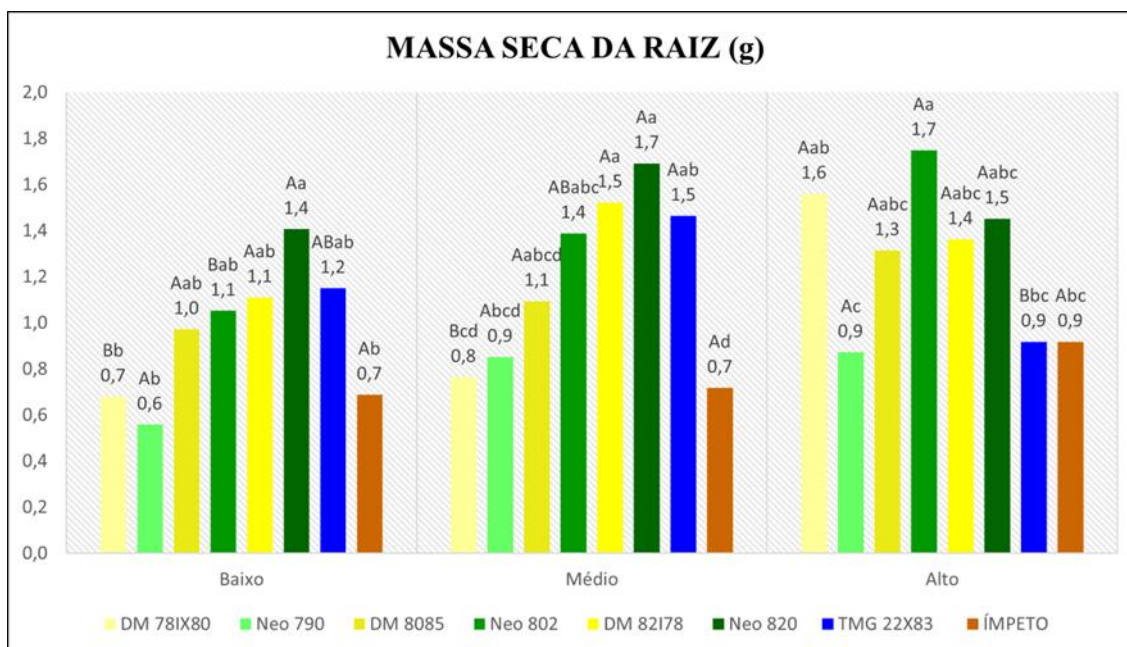
Com a adubação fosfatada no nível médio, houve incremento substancial da MSPA, com variação de aproximadamente 2,2 g (Ímpeto) a 5,9 g (Neo 820). A cultivar Neo 820 destacou-se com o maior acúmulo de matéria seca, diferindo estatisticamente das demais cultivares, sinalizando maior eficiência fisiológica na assimilação de fósforo e na conversão de foto-assimilados em biomassa estrutural. Esse aumento significativo, associado a diferenças estatísticas claras entre genótipos, revela heterogeneidade genética importante, comum em estudos de eficiência nutricional. Resultado semelhante ao encontrado por Vieira (2021), em que as médias das respostas de MSPA foi se elevando com o aumento das doses em todas as fontes de P.

No nível alto de adubação, houve continuidade no aumento da massa seca da parte aérea, porém com incrementos moderados quando comparados ao tratamento médio. As cultivares apresentaram valores que variaram de aproximadamente 2,4 g (TMG 22X83) a 5,0 g (Neo 802), novamente com variações estatísticas entre os genótipos. Embora a produção tenha sido elevada, os ganhos não foram proporcionais ao aumento da dose de fósforo, comportamento que reflete um limite fisiológico já atingido no tratamento médio.

A análise conjunta dos resultados evidencia que o tratamento médio de adubação fosfatada foi o que possivelmente favoreceu maior eficiência no acúmulo de massa seca da parte aérea, equilibrando disponibilidade de P e resposta fisiológica. Xu et al. (2024), destaca a importância da biomassa, bem como sua eficiência de conversão para alcançar uma resposta de alto rendimento ao fertilizante P. A identificação de materiais como Neo 820 e Neo 802, que exibiram desempenho superior, é especialmente relevante para programas de melhoramento e recomendações de manejo, visto que solos brasileiros frequentemente apresentam baixa disponibilidade natural de fósforo e alta capacidade de adsorção.

A massa seca da raiz (MSR) demonstrou resposta significativa às diferentes doses de adubação fosfatada, demonstrando o efeito da adubação fosfatada aplicada em tratamentos de baixa, média e alta dosagem do fósforo (Figura 5).

Figura 5. Massa seca da raiz de cultivares de soja sob diferentes níveis de fósforo: baixo (0 kg ha⁻¹ de P₂O₅); médio (100 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e alto (200 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Letras maiúsculas mostram diferenças entre os níveis de fósforo dentro da mesma cultivar; letras minúsculas mostram diferenças entre cultivares dentro do mesmo nível de fósforo, por meio do teste de Tukey (p < 0,05). As barras representam a média (n = 5).



Fonte: Cavalcante, (2025).

No nível baixo de fósforo, observa-se que as cultivares apresentaram respostas moderadas, com valores variando de aproximadamente 0,6 (Neo 790) a 1,4 g (Neo 820). A cultivar que mais se destacou foi Neo 820, com cerca de 1,4 g, indicando desempenho estatisticamente superior às outras. O baixo valor obtido das cultivares com deficiência de fósforo reduz o vigor radicular e limita a expressão do potencial genético dos cultivares, levando à aproximação estatística entre eles (Grant et al. 2001).

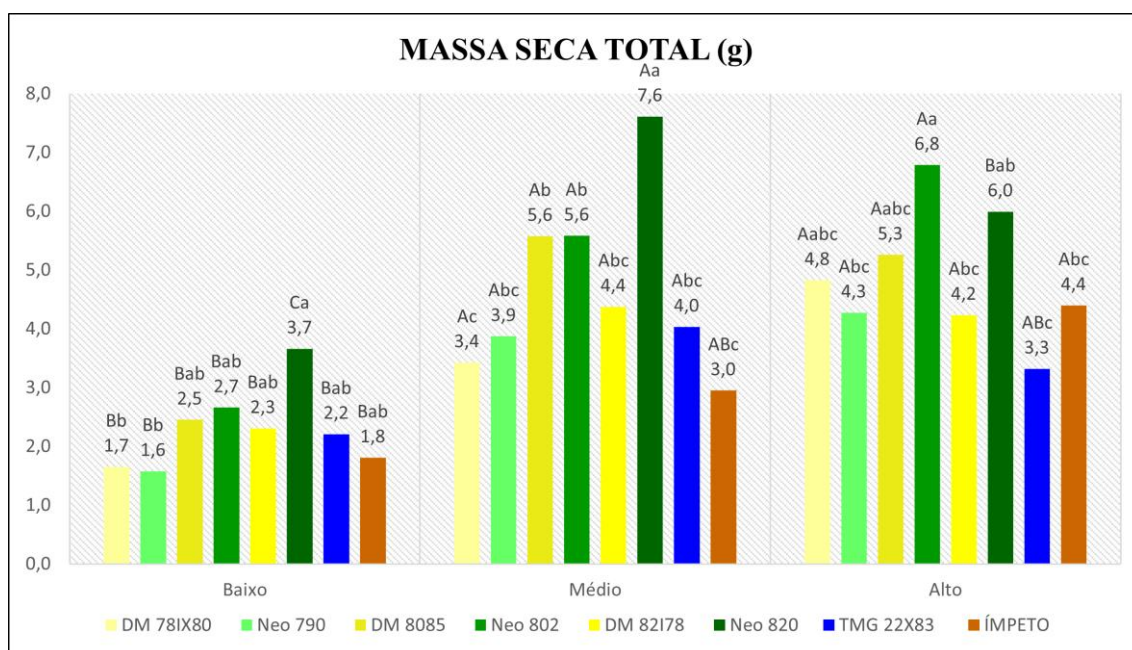
No nível médio de fósforo, as diferenças entre cultivares tornam-se mais nítidas. A cultivar Neo 820 apresenta o maior valor (1,7 g), diferenciando-se significativamente de todas as demais. A significância encontrada corrobora com o estudo de Chen et al. (2020), onde demonstram que o suprimento adequado de fósforo eleva significativamente a massa seca de raízes, além de aumentar o comprimento total e a área radicular. Em conjunto, esses achados reforçam que doses intermediárias de fósforo tendem a estimular a formação de raízes primárias e secundárias, elevando a massa da matéria radicular, além de fortalecer a estrutura e eficiência do sistema radicular.

No nível alto de fósforo, há um aumento expressivo da massa seca da raiz nas cultivares mais responsivas. O destaque é a cultivar Neo 802 com 1,7 g, superando significativamente as cultivares do tratamento. A literatura mostra que aumentos de fósforo podem intensificar a produção de raízes até determinado limite, favorecendo maior absorção de água e nutrientes (Grant et al., 2001).

Ao comparar os três níveis de fósforo de maneira integrada, fica evidente que Neo 820 e Neo 802 apresentam caráter mais responsivo, exibindo os maiores valores nos níveis médio e alto. Já cultivares como Ímpeto e Neo 790 mantêm desempenho inferior e relativamente estável, sugerindo menor eficiência no uso do fósforo e reduzida capacidade de modificar o sistema radicular diante de maior disponibilidade do nutriente. Esse comportamento é coerente com o estudo de Xu et al. (2024) que demonstra a existência de diferenças genéticas na eficiência de absorção e destaca a importância da biomassa, bem como sua eficiência de conversão para alcançar uma resposta de alto rendimento ao fertilizante P.

O gráfico de massa seca total (MST) evidencia com clareza como a disponibilidade de fósforo (P) influencia o crescimento das diferentes cultivares avaliadas, com respostas distintas nos níveis de P baixo, médio e alto (Figura 6).

Figura 6. Massa seca total de cultivares de soja sob diferentes níveis de fósforo: baixo (0 kg ha^{-1} de P_2O_5); médio (100 kg ha^{-1} de P_2O_5) e alto (200 kg ha^{-1} de P_2O_5). Letras maiúsculas mostram diferenças entre os níveis de fósforo dentro da mesma cultivar; letras minúsculas mostram diferenças entre cultivares dentro do mesmo nível de fósforo, por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras representam a média ($n = 5$).



Fonte: Cavalcante, (2025).

No nível baixo de fósforo, os valores variam de aproximadamente 1,6 g (Neo 790) a 3,7 g (Neo 820), revelando que algumas cultivares apresentam maior eficiência em condições limitantes. Neo 820, destaca-se como a mais produtiva nesse ambiente restritivo, superando significativamente as demais cultivares. Em experimentos controlados com grande número de genótipos, a presença de variação significativa para traços ligados ao uso de P (peso seco/biomassa, arquitetura radicular, relação raiz e parte aérea) foi demonstrada, indicando que certos materiais são claramente mais eficientes em ambiente de baixo P (Reddy et al., 2020).

Com o aumento para o nível médio de fósforo, nota-se ampliação expressiva da massa seca total, com valores entre 3,0 g (Ímpeto) e 7,6 g (Neo 820). A cultivar Neo 820 destaca-se como superior a todas as demais, confirmando elevada responsividade ao fósforo. Em ensaios sob condições tropicais. Rosolem et al. (2022) demonstraram que a

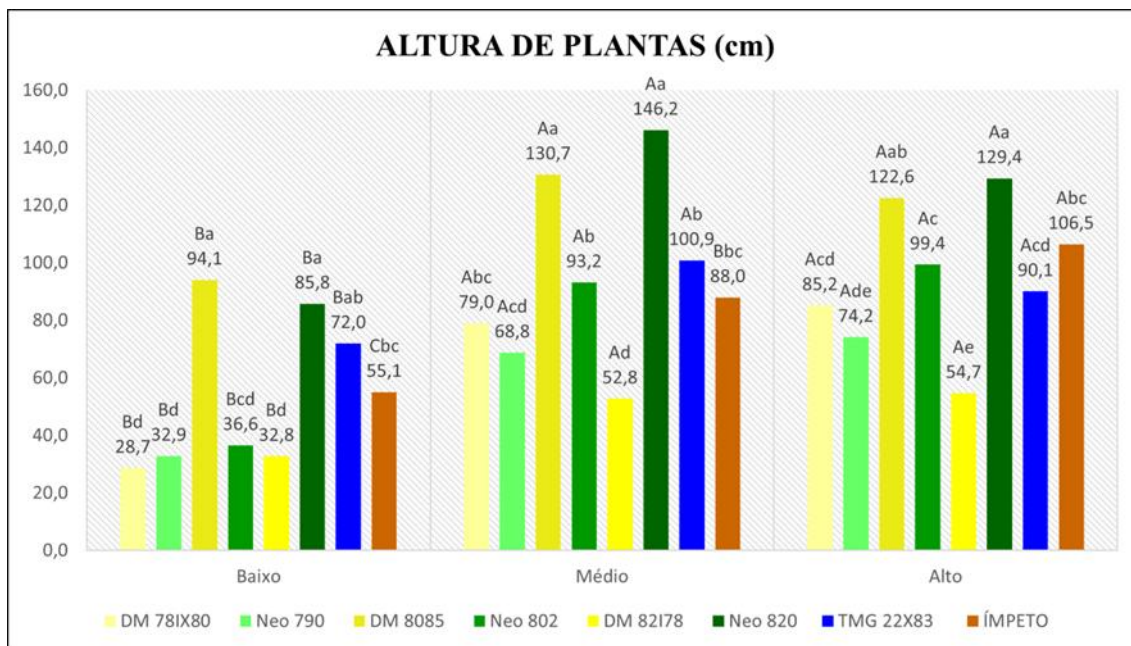
aplicação localizada de fosfato eleva o crescimento radicular e o acúmulo de matéria seca em soja, de modo que genótipos com maior responsividade à disponibilidade localizada de fósforo apresentam ganhos significativos de biomassa quando submetidos a níveis médios de P.

No nível alto de fósforo, ocorre, novamente, aumento geral dos valores, variando de aproximadamente 3,3 g (TMG 22X83) a 6,8 g (Neo 802), mas com menor amplitude comparada ao nível médio, o que sugere possível proximidade com o ponto de saturação de resposta para algumas cultivares. A maior massa seca total é observada em Neo 802, demonstrando a responsividade deste genótipo.

A comparação integrada dos três níveis revela padrões consistentes em que Neo 820 e Neo 802 figuram entre as cultivares mais eficientes e responsivas ao aumento de fósforo, enquanto cultivares como TMG 22X83, DM 78IX80 e Ímpeto apresentam desempenho inferior de modo geral. De forma complementar, Li et al. (2022) mostraram que diferentes níveis de fornecimento de fósforo modulam a fixação simbiótica de nitrogênio, refletindo na produção de massa seca, isso explica por que doses intermediárias de P frequentemente resultam em maior acúmulo de matéria seca total, especialmente em genótipos capazes de alocar eficientemente os nutrientes para crescimento vegetativo, enquanto doses muito elevadas nem sempre promovem incrementos proporcionais.

A altura de plantas (cm) demonstra com clareza como os níveis baixo, médio e alto de fósforo no solo influenciam o crescimento das diferentes cultivares avaliadas (Figura 7).

Figura 7. Altura de plantas de cultivares de soja sob diferentes níveis de fósforo: baixo (0 kg ha^{-1} de P_2O_5); médio (100 kg ha^{-1} de P_2O_5) e alto (200 kg ha^{-1} de P_2O_5). Letras maiúsculas mostram diferenças entre os níveis de fósforo dentro da mesma cultivar; letras minúsculas mostram diferenças entre cultivares dentro do mesmo nível de fósforo, por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras representam a média ($n = 5$).



Fonte: Cavalcante, (2025).

Sob baixo fósforo, as alturas variam entre aproximadamente 28,7 cm (DM 78IX80) e 94,1 cm (DM 8085). A cultivar DM 8085, com 94,1 cm, demonstra desempenho estatisticamente superior às demais. Em estudos de campo, a disponibilidade reduzida de fósforo costuma diminuir a altura média das plantas, mas genótipos tolerantes ou mais eficientes em aquisição de P mantêm maior crescimento e altura relativa em condições restritivas (He et al., 2017).

Quando o suprimento de fósforo aumenta para o nível médio, observa-se um crescimento expressivo das plantas, com alturas variando entre cerca de 52,8 cm (DM 82I78) e 146,2 cm (Neo 820). A cultivar Neo 820, apresenta o maior valor e se diferencia estatisticamente de praticamente todas as demais. Esse comportamento reflete o forte impacto do fósforo sobre o metabolismo energético e a produção de biomassa aérea, possibilitando maior alongamento de entrenós quando o nutriente está disponível em quantidade adequada (Grant et al., 2001).

No nível alto de fósforo, verifica-se novamente um incremento geral das alturas, embora com menor amplitude de ganho em comparação ao nível médio, sugerindo possível aproximação do ponto de saturação para algumas cultivares. A maior altura é observada na cultivar Neo 820, com 129,4 cm, comprovando sua elevada responsividade ao fósforo.

A análise integrada dos três níveis mostra um padrão claro: Neo 820 e DM 8085 mantêm desempenho superior e são altamente responsivas à elevação do fósforo, enquanto DM 82I78, DM 78IX80 e Neo 790 figuram consistentemente entre os menores

valores, sugerindo baixa eficiência no uso e na absorção do nutriente. A cultivar Neo 802 também se destaca com boa adaptação tanto em baixa quanto em alta disponibilidade, evidenciando plasticidade fisiológica. Esses resultados corroboram pesquisas em que destacam incremento linear em função das doses de fósforo aplicadas, evidenciando que o aumento da disponibilidade do nutriente favoreceu o crescimento vegetativo, altura de plantas e produção final (Guera et al., 2020).

4. CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que o fósforo influencia diretamente o crescimento vegetativo das cultivares de soja, afetando todos os parâmetros avaliados. As cultivares Neo 820 IPRO e Neo 802 I2X mostram maior eficiência e resposta ao fósforo, evidenciando variabilidade genética relevante. O uso de cultivares mais eficientes surge como estratégia promissora para aumentar a sustentabilidade produtiva, reduzir custos e otimizar o uso de recursos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADORIAN, Gentil Cavalheiro; WEIGAND, Marcos; WEIGAND, Bruno (in memoriam); CARVALHO, Jéssica de Souza Cavalcante; LEÃO, Evelynne Urzêdo; GONÇALVES, Rogério Cavalcante. Doses e modos de aplicação de fósforo na soja em área de primeiro cultivo no Cerrado. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas-TO, v. 9, e023006, 2023.

AGROSUSTENTAR. **Maiores produtores de soja do mundo**. 2024. Disponível em: <https://agrosustentar.com.br/agronegocio/maiores-produtores-soja/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

APROSOJA - **Associação Brasileira de Produtores de Soja**, 2021. Disponível em: <https://aprosojabrasil.com.br/a-soja/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

BERGHETTI, Álvaro Luiz Pereira; BATISTA, Aldo José de Oliveira; KLEIN, Claus; SCALON, Silvana de Paula Quintão; MORAIS, Milene; ROSA, Leandro dos Santos. **Critical levels and doses of maximum technical efficiency of phosphorus in *Handroanthus heptaphyllus* subjected to phosphorus fertilization**. *Floresta*, Curitiba, v. 54, e91069, 2024.

CHEN, X.; GAO, Y.; HONG, L.; TANG, H. Effects of phosphorus supply on root morphology and phosphorus uptake in maize seedlings under different water regimes. **American Journal of Agriculture and Forestry**, v. 8, n. 1, p. 22–29, 2020.

CONAB. **Safra Brasileira de Grãos**, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/graos>. Acesso em: 16 abr. 2025.

DONG, Siqui; BISMARCK, Asante-Badu; LI, Songsong; GAO, Qiang; ZHOU, Xue; LI, Cuilan. **Ammonium polyphosphate promotes maize growth and phosphorus uptake by altering root properties**. *Plants*, v. 13, n. 23, p. 3407, 2024.

FAGERIA, N. K. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

FAOSTAT. **Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura**. Roma: Nações Unidas, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 16 abr. 2025.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, [S.l.], 37, 529-535, 2019.

GRANT, C. A. et al. The importance of phosphorus in crop production. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 81, n. 2, p. 211–224, 2001.

GUERA, Keli Cristina Silva; FONSECA, Adriel Ferreira da; HARKATIN, Silvano. Phosphorus use in soybean in integrated production system under anticipation of phosphate fertilization. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 51, n. 3, e20196881, 2020.

HE, Jin; JIN, Yi; DU, Yan-Lei; WANG, Tao; TURNER, Neil C.; YANG, Ru-Ping; SIDDIQUE, Kadambot H. M.; LI, Feng-Min. Genotypic variation in yield, yield components, root morphology and architecture, in soybean in relation to water and phosphorus supply. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, art. 1499, 29 ago. 2017.

ILLAKWAHHI, D.T., VEGI, M.R. & SRIVASTAVA, B.B.L. Phosphorus' future insecurity, the horror of depletion, and sustainability measures. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 21, 9265–9280 (2024).

KOPPEN, W. Das geographische System de Klimate. **Handbuch der klimatologie**, 1936.

LI, Hongyu; WANG, Lihong; ZHANG, Zuowei; YANG, Aizheng; LIU, Deping. Effect of phosphorus supply levels on nodule nitrogen fixation and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max* L.). **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 11, art. 2802, 2022.

LIU, X. et al. Does phosphorus addition change the coordination of leaf, wood, and root traits in a tropical montane cloud forest? **Forest Ecology and Management**, v. 568, p. 121620, 2023.

MCDOWELL, R. W.; PLETNYAKOV, P.; HAYGARTH, P. M. Phosphorus applications adjusted to optimal crop yields can help sustain global phosphorus reserves. **Nature Food**, London, v. 5, p. 332–339. 2024.

REDDY, Venkata Ravi Prakash; DAS, Shouvik; DIKSHIT, Harsh Kumar; MISHRA, Gyan Prakash; ASKI, Muraleedhar; MEENA, Surendra Kumar; SINGH, Madan Pal; et al. Genome-Wide Association Analysis for Phosphorus Use Efficiency Traits in Mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) Using Genotyping by Sequencing Approach. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 29 out. 2020.

ROSOLEM, Ciro Antonio; BATISTA, Thiago Barbosa; DIAS, Patrícia Pereira; MOTTA NETO, Laudelino Vieira da; CALONEGO, Juliano Carlos. The joint application of phosphorus and ammonium enhances soybean root growth and P uptake. **Agriculture**, Basel, v. 12, n. 6, art. 880, 18 jun. 2022.

RUBIO, G., 2015. Características morfológicas da raiz relacionadas à absorção de fósforo eficiência de soja, girassol e milho. **J. Plant Nutr. Soil Sci.** 178 (5), 807–815.

SOLANGI, F.; ZHU, X.; KHAN, S.; RAIS, N.; MAJEED, A.; SABIR, M. A.; IQBAL, R.; ALI, S.; HAFEEZ, A.; ALI, B.; ERCISLI, S.; KAYABASI, E. T. The global dilemma of soil legacy phosphorus and its improvement strategies under recent changes in agro-ecosystem sustainability. **ACS Omega**, Washington, v. 8, n. 26, p. 23271–23282. 2023.

VIEIRA, Nilson Darlan. **Resposta da soja a fontes e doses de fósforo em solos com diferentes teores de argila**. 2021. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

XU, Lin-Wei et al. Genotypic differences in soybean (*Glycine max* L.) in yield response to phosphorus fertilizer are associated with difference in biomass and phosphorus content. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101267, 2024.