

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME DE LIMA SOUZA

**EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO POR CULTIVARES MODERNAS
DE SOJA**

SANTA HELENA - PARANÁ

2026

GUILHERME DE LIMA SOUZA

**EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO POR CULTIVARES MODERNAS
DE SOJA**

Phosphorus Use Efficiency by Modern Soybean Cultivars

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Lincon Oliveira Stefanello da Silva

Coorientador(a): Prof.^a Dr.^a Raíssa Schwalbert

SANTA HELENA - PARANÁ

2026



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GUILHERME DE LIMA SOUZA

**EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO POR CULTIVARES MODERNAS
DE SOJA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 31/Março/2026

Lincon Oliveira Stefanello da Silva
Doutor em Ciência do Solo
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Edicleia Aparecida Bonini e Silva
Doutora em Agronomia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Nadia Graciele Krohn
Doutorado em Ciências
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

SANTA HELENA - PARANÁ

2026

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso à minha família, em especial aos meus pais, Joaquim e Célia, e à minha irmã, Ana Carolina, que são minha base, meu alicerce e minha maior fonte de inspiração. Cada conquista alcançada ao longo desta trajetória carrega um pouco do amor, do apoio e do incentivo que sempre me ofereceram, assim como dos valores que me ensinaram e que levo comigo. A presença de vocês em minha vida é o que tornou possível cada passo dado até aqui e continuará sendo essencial para a construção do futuro que escolhi trilhar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pela saúde e por me conceder força e perseverança ao longo de toda esta trajetória.

À minha família, expresso minha profunda gratidão, em especial ao meu pai, Joaquim, à minha mãe, Célia, e à minha irmã, Ana Carolina, pelo amor, apoio constante e incentivo em todos os momentos. A presença e a compreensão de vocês foram essenciais para que este caminho pudesse ser percorrido e para que cada etapa fosse superada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lincon Stefanello, e à minha coorientadora, Profa. Dra. Raíssa Schwalbert, agradeço pelas orientações, disponibilidade e dedicação, as quais possibilitaram conduzir esta pesquisa de forma responsável e contribuíram de maneira significativa para minha formação acadêmica e científica.

À banca examinadora, Profa. Dra. Edicleia Aparecida Bonini e Silva e Profa. Dra. Nadia Graciele Krohn por compartilharem seu tempo para avaliação deste trabalho e por proporem sugestões que visam à melhoria do trabalho.

Aos meus amigos, deixo meu agradecimento pelo companheirismo, apoio e incentivo ao longo dessa caminhada, tornando os desafios mais leves e os momentos mais motivadores.

Por fim, agradeço à Instituição, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Santa Helena (UTFPR-SH), aos docentes, técnicos administrativos e aos colaboradores, que possibilitam um ambiente de ensino e pesquisa de qualidade e contribuem para a formação de profissionais comprometidos com a construção do conhecimento.

"Resultado exige trabalho." (Mario Sergio Cortella, 2015).

RESUMO

O Brasil atualmente é o maior produtor mundial de soja (*Glycine max* (L.) Merrill), cultura cuja produtividade depende majoritariamente da adubação fosfatada. O fósforo (P) é um elemento essencial ao metabolismo vegetal, porém finito e não renovável, o que impõe desafios econômicos e ambientais para a agricultura, especialmente em solos tropicais e subtropicais naturalmente pobres quimicamente. Diante desse cenário, a identificação de cultivares modernas de soja com maior eficiência na utilização de P representa uma estratégia relevante para reduzir custos de produção e a dependência de fertilizantes fosfatados. O presente trabalho tem como objetivo classificar 16 cultivares modernas de soja quanto à sua eficiência na utilização de fósforo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em sistema hidropônico. Foram utilizados dois níveis contrastantes de P, sendo baixo ($10 \mu\text{mol L}^{-1}$ de P) e alto ($100 \mu\text{mol L}^{-1}$ de P). As cultivares utilizadas foram BMX 50i52 IPRO, DM68i68 IPRO, BMX55i57, M5838 IPRO, BMX 59i60 IPRO, SYN 1561 IPRO, NS6209RR, BRS 1003 IPRO, TEC 7849 IPRO, NS5445 IPRO, NA 5909 RG, M6410 IPRO, BMX 68i68 IPRO, BRS 1074 IPRO, VTOP RR e TEC IRGA 6070RR. As plantas foram avaliadas no estágio vegetativo V2-V3. As variáveis analisadas foram massa seca de parte aérea (MSPA) e de raízes (MSR), concentração (g kg^{-1}) e acúmulo (mg) de P nos tecidos. Foram calculados os índices de eficiência de translocação (ETP) e de uso (EUP) do nutriente. Os resultados foram submetidos à análise estatística e quando foi verificado efeito significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Além disso, foi realizada análise de agrupamento hierárquico por distância euclidiana a fim de verificar os principais grupos de cultivares. Os resultados revelaram variabilidade genotípica expressiva entre as cultivares, com maior disponibilidade de P promovendo maior acúmulo de massa seca e maior concentração do nutriente nos tecidos. A EUP mostrou-se significativamente superior em condições de baixa disponibilidade de P, evidenciando a provável ativação de mecanismos adaptativos. As cultivares BMX 55i57 IPRO, M 5838 IPRO, SYN 1561 IPRO, NS 6209 RR, BRS 1003 IPRO, DM 66i68 IPRO e BMX 68i70 IPRO destacaram-se pela maior eficiência em condições limitantes, enquanto M 5838 IPRO, SYN 1561 IPRO, TEC IRGA 6070 RR e BMX 68i70 IPRO apresentam responsividade à alta disponibilidade de P. A análise de agrupamento separou as cultivares em quatro grupos distintos: Grupo A (BMX 50i52 IPRO e DM68i68 IPRO), Grupo B (BMX55i57, M5838 IPRO, BMX 59i60 IPRO, SYN 1561 IPRO, NS6209RR, BRS 1003 IPRO e TEC 7849 IPRO), Grupo C (NS5445 IPRO, NA 5909 RG, M6410 IPRO, BMX 68i68 IPRO e BRS 1074 IPRO) e Grupo D (VTOP RR e TEC IRGA 6070RR). De maneira geral, os resultados obtidos contribuirão para um melhor manejo da adubação fosfatada na soja, oferecendo critérios acessíveis aos programas de melhoramento genético para a seleção de cultivares mais eficientes no uso do P.

Palavras-chave: *Glycine max* L. Merrill; fósforo; genótipos; eficiência nutricional.

ABSTRACT

Brazil is currently the world's largest soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) producer, a crop whose productivity depends heavily on phosphate fertilization. Phosphorus (P) is an essential element for plant metabolism, yet finite and non-renewable, posing economic and environmental challenges to agriculture, especially in tropical and subtropical soils that are naturally low in chemical fertility. In this context, identifying modern soybean cultivars with greater P-use efficiency represents a relevant strategy to reduce production costs and dependence on phosphate fertilizers. The present study aimed to classify 16 modern soybean cultivars according to their phosphorus-use efficiency. The experiment was conducted in a greenhouse under hydroponic conditions. Two contrasting P levels were used: low (10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P) and high (100 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P). The cultivars used were BMX 50i52 IPRO, DM68i68 IPRO, BMX55i57, M5838 IPRO, BMX 59i60 IPRO, SYN 1561 IPRO, NS6209RR, BRS 1003 IPRO, TEC 7849 IPRO, NS5445 IPRO, NA 5909 RG, M6410 IPRO, BMX 68i68 IPRO, BRS 1074 IPRO, VTOP RR and TEC IRGA 6070RR. Plants were evaluated at the V2-V3 vegetative stage. The variables analyzed were shoot dry mass (SDM) and root dry mass (RDM), P concentration (g kg^{-1}) and accumulation (mg) in plant tissues. The phosphorus translocation efficiency (PTE) and phosphorus use efficiency (PUE) indices were calculated. Results were subjected to statistical analysis and, when a significant effect was detected, means were compared using the Scott-Knott test at 5% probability of error. In addition, hierarchical cluster analysis based on Euclidean distance was performed to identify the main cultivar groups. Results revealed expressive genotypic variability among cultivars, with higher P availability promoting greater dry mass accumulation and higher nutrient concentration in tissues. PUE was significantly higher under low P availability, evidencing the probable activation of adaptive mechanisms. Cultivars BMX 55i57 IPRO, M 5838 IPRO, SYN 1561 IPRO, NS 6209 RR, BRS 1003 IPRO, DM 66i68 IPRO, and BMX 68i70 IPRO stood out for their higher efficiency under limiting conditions, while M 5838 IPRO, SYN 1561 IPRO, TEC IRGA 6070 RR, and BMX 68i70 IPRO showed greater responsiveness to high P availability. Cluster analysis separated the cultivars into four distinct groups: Group A (BMX 50i52 IPRO, and DM 66i68 IPRO), Group B (BMX 55i57 IPRO, M 5838 IPRO, BMX 59i60 IPRO, SYN 1561 IPRO, NS 6209 RR, BRS 1003 IPRO, and TEC 7849 IPRO), Group C (NS 5445 IPRO, NA 5909 RG, M 6410 IPRO, BMX 68i68 IPRO, and BRS 1074 IPRO), and Group D (VTOP RR and TEC IRGA 6070 RR). Overall, the results will contribute to better phosphate fertilization management in soybean, offering accessible criteria for plant breeding programs aimed at selecting cultivars with greater P-use efficiency.

Keywords: *Glycine max* L.; phosphate; genotypes; nutritional efficiency.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição de características comerciais das cultivares de soja utilizadas no estudo.....	23
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo da origem, domesticação e expansão da soja (<i>Glycine max</i> (L.) Merrill).....	14
Figura 2 – Estádios fenológicos da cultura da soja (<i>Glycine max</i> (L.) segundo a escala de Fehr e Caviness.....	15
Figura 3 – Transportadores de absorção, transporte e remobilização de Pi em plantas.....	18
Figura 4 – Localização geográfica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).....	22
Figura 5 – Massa seca de parte aérea (a) e de raízes (b) de cultivares de soja sob baixo e alto nível de disponibilidade de P.....	26
Figura 6 – Concentração de P na parte aérea (a) e nas raízes (b) de cultivares de soja sob baixo e alto nível de disponibilidade de P.....	28
Figura 7 – P acumulado na parte aérea (a) e nas raízes (b) de cultivares de soja sob baixo e alto nível de disponibilidade de P.....	30
Figura 8 – Eficiência de translocação de P em cultivares de soja sob baixo e alto nível de disponibilidade de P.....	31
Figura 9 – Eficiência de uso de P em cultivares de soja sob baixo e alto nível de disponibilidade de P.....	33
Figura 10 – Dendrograma representando o agrupamento de 16 cultivares de soja, com base na distância euclidiana em baixo nível de disponibilidade de P em solução nutritiva.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 Cultura da Soja	15
3.2 Importância da Cultura da Soja	16
3.3 Nutrição na Cultura da Soja	16
3.4 Aspectos fisiológicos e bioquímicos das plantas sob níveis de disponibilidade de P	17
3.4.1 Sintomas de Deficiência e Toxicidade de Fósforo	19
3.4.2 Fases Críticas de Demanda de Fósforo	19
3.4.3 Índices de Eficiência de Translocação e de Uso	19
3.5 Fontes de Fósforo para as Plantas	20
3.5.1 Reservas de Fosfato Mundiais	20
3.5.2 Fertilizantes Fosfatados Solúveis	20
3.5.3 Fertilizantes Fosfatados Naturais	21
3.6 Baixa Eficiência de Uso do Fósforo	21
4 METODOLOGIA	22
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1 Massa seca de parte aérea e raízes de cultivares de soja	25
5.2 Concentração de P nos tecidos de parte aérea e raízes de cultivares de soja	27
5.3 P acumulado nos tecidos de parte aérea e raízes de cultivares de soja	29
5.4 Eficiência de translocação de P em cultivares de soja	30
5.5 Eficiência de uso de P em cultivares de soja	32
5.6 Análise de cluster	34
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se como o maior produtor mundial de soja (*Glycine max* (L.) Merrill), com recorde de produção do grão na safra 2024/25, na qual se obtiveram 169,49 milhões de toneladas, o que representou cerca de 13,3% de incremento em relação à safra anterior (CONAB, 2025). Desde sua introdução no país, a leguminosa tornou-se de grande importância para a economia agrícola mundial, em função de ser a base para a cadeia de produção de proteína, através de sua utilização na ração de animais (EMBRAPA, 2023). Neste sentido, maximizar a utilização dos recursos durante a produção desta *commodity* é de extrema relevância, com destaque para a otimização da eficiência nutricional das plantas (Fageria, 1998).

Inúmeros fatores podem limitar a produtividade da soja, como a falta de água, a acidez do solo, o fotoperíodo e o déficit nutricional. Porém, a deficiência de macronutrientes, como o fósforo (P), pode afetar negativamente a fotossíntese e, conseqüentemente, o crescimento e desenvolvimento das plantas (Schwalbert et al., 2026). Os solos das regiões tropicais e subtropicais brasileiras são geralmente pobres em P, resultando em baixas concentrações de P disponível para as plantas (Schwalbert et al., 2023). Desse modo, para suprir adequadamente as demandas nutricionais da soja por P, é necessário realizar a correção da acidez do solo, seguida da adubação fosfatada até atingir-se o nível crítico do elemento no solo (CQFS-RS/SC, 2016).

A adubação fosfatada é majoritariamente oriunda da mineração de rochas que contenham fosfato, como as apatitas. Portanto, o P é um recurso natural finito e não renovável (Brownlie et al., 2018). Deste modo, há uma preocupação mundial quanto à sua possível escassez, especialmente em momentos de alta dos preços dos fertilizantes e desvalorização da soja no mercado, como vivemos nos últimos anos (Scholz et al., 2025). Diante da necessidade de utilizar grandes quantidades de fertilizantes para obter elevadas produtividades, emerge a preocupação em desenvolver alternativas mais sustentáveis e de menor custo para a produção agrícola (Lemaire et al., 2025). Nesse contexto, destaca-se a possibilidade de selecionar genótipos de soja mais eficientes na utilização de P.

Uma cultivar eficiente no uso de P é aquela capaz de crescer e se desenvolver, gerando produtividades satisfatórias mesmo sob condições de baixa disponibilidade do nutriente no solo (Parentoni et al., 2008). Assim, essa eficiência pode se manifestar através de uma maior capacidade de absorção, associada a características do sistema radicular, como maior comprimento, menor diâmetro, maiores números de pelos finos, o que leva a uma maior

área de superfície de contato (Lynch, 2011), e por consequência, com um sistema radicular mais desenvolvido, ocorre uma maior produção de exsudatos que solubilizam o P do solo, contribuindo para maior eficiência (Lynch, 2011; Vance et al., 2003).

Diante disso, é fundamental conhecer os aspectos morfológicos e fisiológicos relacionados ao uso de P pelas plantas, buscando compreender as potencialidades e limitações que as variações genóticas atuais oferecem (Veneklaas et al., 2012). Assim, a identificação de genótipos modernos de soja eficientes no uso de P pode ser uma alternativa promissora para reduzir a dependência de fertilizantes fosfatados na agricultura brasileira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo classificar cultivares modernas de soja quanto à sua eficiência na utilização de fósforo.

2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar respostas morfológicas associadas ao crescimento (massa seca da parte aérea e de raízes) em função da disponibilidade de P;
- b) Quantificar a concentração e o acúmulo de P em diferentes compartimentos da planta (parte aérea e sistema radicular) nas cultivares estudadas;
- c) Determinar a eficiência de translocação de P e a eficiência de uso de P nas cultivares avaliadas;
- d) Comparar o desempenho relativo das cultivares sob contraste de suprimento de P para identificar materiais eficientes e responsivos;
- e) Agrupar e classificar as cultivares quanto à eficiência de utilização de P, com base na integração das variáveis morfológicas e nutricionais.

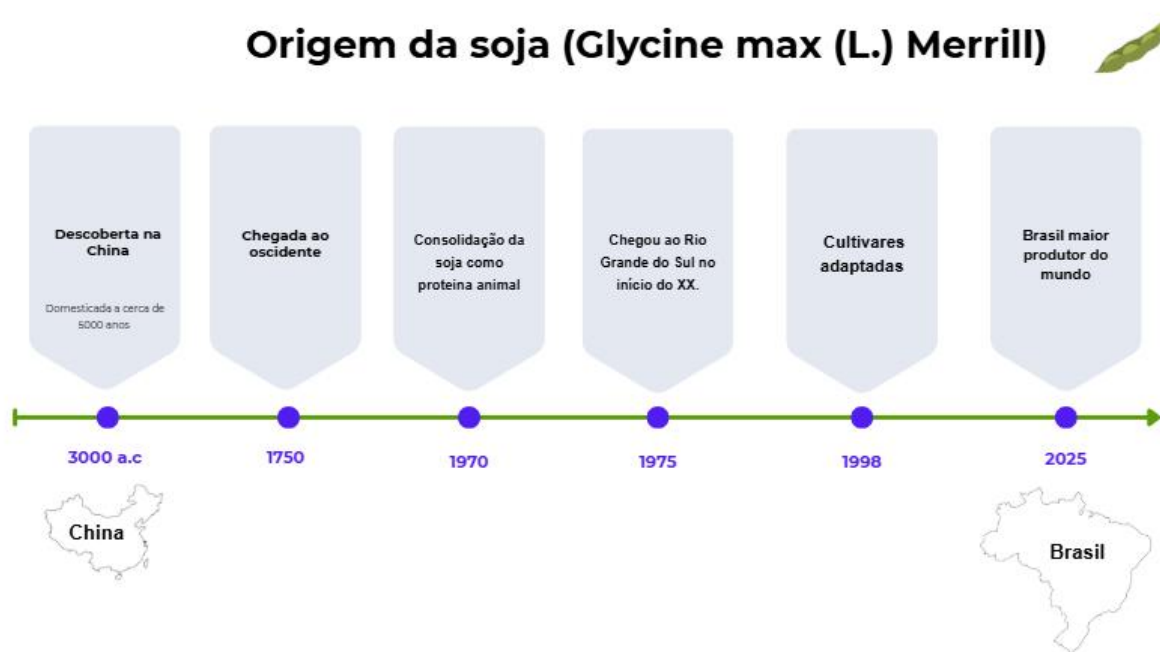
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Cultura da Soja

A soja é uma leguminosa e oleaginosa, amplamente cultivada para a produção de alimentos (óleo, proteína, leite, tofu), ração animal e biocombustíveis e diversos outros produtos de importância comercial. É uma planta pertencente à família Fabaceae, classificada como anual, herbácea e autógama (Sedyama, 2016).

A origem da soja está associada ao continente asiático, mais especificamente à região nordeste da China, onde foi domesticada há aproximadamente 5.000 anos. A partir desse centro de origem, a cultura foi difundida para outros países asiáticos e, posteriormente, para a América do Norte e a América do Sul, consolidando-se como uma das principais commodities agrícolas globais (Hymowitz; Singh, 1987). No Brasil, a introdução da soja ocorreu no final do século XIX, porém, sua expansão significativa teve início a partir da década de 1970, impulsionada por programas de melhoramento genético e adaptação às condições tropicais (EMBRAPA, 2013).

Figura 1 – Linha do tempo da origem, domesticação e expansão da soja (*Glycine max* (L.) Merrill).



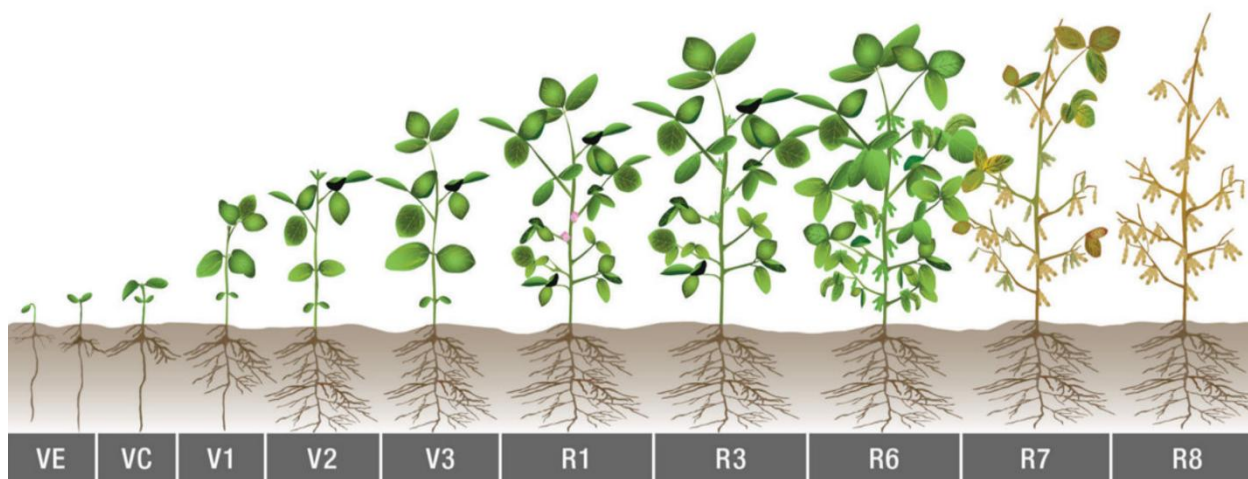
Fonte: Autor (2026).

A fenologia da soja é caracterizada por uma sequência bem definida de estádios vegetativos e reprodutivos, descritos originalmente por Fehr e Caviness (1977). Os estádios

vegetativos são identificados pela letra V (VE – emergência; V1, V2, V3... até o último nó trifoliolado), enquanto os estádios reprodutivos são identificados pela letra R (R1 – início do florescimento; R2 – florescimento pleno; R3 – início da formação de vagens; R4 – vagens completamente formadas; R5 – início do enchimento de grãos; R6 – grãos completamente formados; R7 – início da maturação; R8 – maturação plena). O esquema está bem descrito na Figura 2.

Esse sistema de classificação ainda é contemporaneamente usado para o manejo da cultura, especialmente quanto à adubação, ao controle de pragas e doenças, até o momento ideal para realizar a colheita (Fehr; Caviness, 1977).

Figura 2 – Estádios fenológicos da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) segundo a escala de Fehr e Caviness.



Fonte: University of Illinois, 1999.

Compreende-se a importância da classificação das cultivares em grupos de maturação, que se baseiam na resposta da planta ao fotoperíodo. Esses grupos variam desde cultivares superprecoces até cultivares tardios, sendo adaptados a diferentes latitudes e épocas de semeadura. Nos estádios vegetativos iniciais (VE a V3), o P é essencial para o desenvolvimento do sistema radicular e o estabelecimento das plântulas, sendo que sua deficiência nessa fase compromete irreversivelmente o potencial produtivo da cultura. Nos estádios reprodutivos, especialmente durante o florescimento (R1-R2) e o enchimento de grãos (R5-R6), a demanda por P atinge seu pico, uma vez que o nutriente é intensamente remobilizado das partes vegetativas para os grãos em formação. Dessa forma, garantir adequada disponibilidade de P desde os estádios iniciais é determinante para maximizar a eficiência de absorção, translocação e utilização do nutriente ao longo de todo o ciclo da

cultura (Grant et al., 2001; Pinto; Duarte, 2019; Moseley, 2025). Em regiões de menor latitude, como grande parte do território brasileiro, predominam cultivares de ciclos mais longos, enquanto em regiões de maior latitude são utilizados cultivares mais precoces (Sediyama et al., 2015).

Atualmente, utiliza-se a classificação numérica por Grupo de Maturação Relativa (GMR), variando aproximadamente de GMR 5,0 a GMR 9,5 no Brasil, sendo os menores valores associados a cultivares mais precoces e os maiores a cultivares mais tardios (EMBRAPA, 2018). No município de Santa Maria, RS, onde foi realizado o experimento, o GMR recomendado varia de 6,2 a 7,2, embora não tenha tido relevância tão grande já que foi efetuado em casa de vegetação.

No Brasil, a soja é cultivada principalmente em safra, com semeadura entre os meses de setembro e dezembro, com a colheita realizada de janeiro a abril, variando conforme a região. Em algumas áreas, especialmente no Centro-Oeste e Sudeste, é possível a implantação da soja em sistema de safrinha, ou segunda safra, após a colheita de culturas como milho ou trigo (EMBRAPA, 2018).

3.2 Importância da Cultura da Soja

A soja é uma das principais culturas agrícolas produzidas no mundo, destacando-se pela produção de cerca de 420,78 milhões de toneladas, em cerca de 146,71 milhões de hectares plantados na safra 2024/25, segundo dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA/PSD, 2025).

A cultura desempenha um papel fundamental na segurança alimentar global, sendo considerada uma fonte essencial de proteína vegetal para a alimentação humana. Além disso, a soja é crucial para a alimentação animal, contribuindo para a produção sustentável de carne, produtos lácteos e até mesmo na produção de biocombustíveis, especialmente em iniciativas de produção de energia renovável (Freitas, 2011).

O Brasil é considerado o maior produtor e exportador de soja na atualidade, assim, a cultura tem grande relevância na balança comercial interna, visto que proporciona receitas significativas. O país produziu cerca de 169,49 milhões de toneladas em um total de 47,61 milhões de hectares durante a safra 2024/25, segundo dados levantados pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023).

Na Região Sul do Brasil, especialmente no Paraná (PR) e no Rio Grande do Sul (RS), a soja é vista como grande potência nacional. Na safra 2024/25, a região foi responsável por

cerca de 40 milhões de toneladas de grãos, com destaque para o Paraná e o Rio Grande do Sul como principais produtores regionais, somando aproximadamente 14 milhões de hectares.

O Paraná mantém-se historicamente entre os três maiores produtores nacionais, enquanto o Rio Grande do Sul apresenta elevada área cultivada e forte dependência climática. Santa Catarina, embora com menor participação relativa, cerca de 0,7 milhão de hectares, contribui de forma consistente para a produção regional.

A expressiva produção da Região Sul reforça sua importância no abastecimento interno, na geração de renda e na consolidação do Brasil como líder mundial na produção e exportação de soja (CONAB, 2024; IBGE, 2024).

3.3 Nutrição na Cultura da Soja

A adubação das culturas é uma ferramenta essencial durante o cultivo da soja, pois fornece os elementos essenciais para o adequado crescimento das plantas desde seu estágio inicial (Grant et al., 2001). Especialmente as cultivares modernas que sofreram processos de melhoramento genético para atingirem altas produtividades, necessitam de grandes quantidades de nutrientes para crescerem e se desenvolverem adequadamente.

A soja apresenta elevada exigência nutricional, sendo os macronutrientes os elementos demandados em maiores quantidades, destacando-se o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), os quais participam de processos fisiológicos essenciais como fotossíntese, respiração, síntese de proteínas e metabolismo energético (Malavolta, 2006).

Dentre esses nutrientes, destaca-se o P, o qual está entre os três macronutrientes mais demandados pelas plantas de soja (Pinto; Duarte, 2019). Isso porque o P é de extrema relevância para o metabolismo das plantas, estando presente na moeda energética – ATP (adenosina trifosfato), na fotossíntese, respiração, compondo ácidos nucleicos, fosfolípidos, fosfoproteínas, coenzimas, entre outros (Melo; Mendonça, 2019).

O P pode ser classificado em muitas formas no solo, com destaque para as formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi) (Nahas, 2002). Dentre essas formas, destacam-se o P solúvel em água, P ligado a óxidos de Fe e Al, P ligado à MOS e P precipitado (Kucey, 1983). Cada uma destas formas resulta em um nível diferente de disponibilidade para as plantas, impactando diretamente na absorção e utilização do P pela soja.

Quando o P está em uma forma solúvel em água, sua disponibilidade para as plantas é imediata, portanto, a sua concentração será muito baixa no solo, em função dos rápidos processos de absorção pelas plantas, imobilização pelos microrganismos, ou adsorção pelos

coloides minerais do solo (Fageria; Stone, 2006). Conforme destacado por Rosa, Camponi e Zanão Júnior (2016) e corroborado por Gitti, Roscoe e Rizzato (2019), a disponibilidade de P será diretamente influenciada pelo pH do solo, sendo maximizada na faixa de pH em água entre 5,5 e 6,5.

Esse mecanismo de interação química é altamente energético, ou seja, à medida que o tempo passa, o arranjo espacial do fosfato com o colóide fica cada vez mais estável, diminuindo a probabilidade do P retornar à solução do solo e ser absorvido pelas plantas (Alcarde et al., 1991). Essa dinâmica é potencializada em solos bem intemperizados e ácidos, como os que predominam no Sul do Brasil.

A proposição de critérios claros e concisos para recomendação da adubação dos cultivos é crucial para maximizar a eficiência de uso dos nutrientes e reduzir os impactos ambientais. Neste cenário, foram propostas classes de interpretação, as quais têm a denominação de “MUITO BAIXO, BAIXO, MÉDIO, ALTO, MUITO ALTO e CONDIÇÃO A EVITAR”, segundo o Manual de Adubação e Calagem do Estado do Paraná (Pauletti; Motta, 2019).

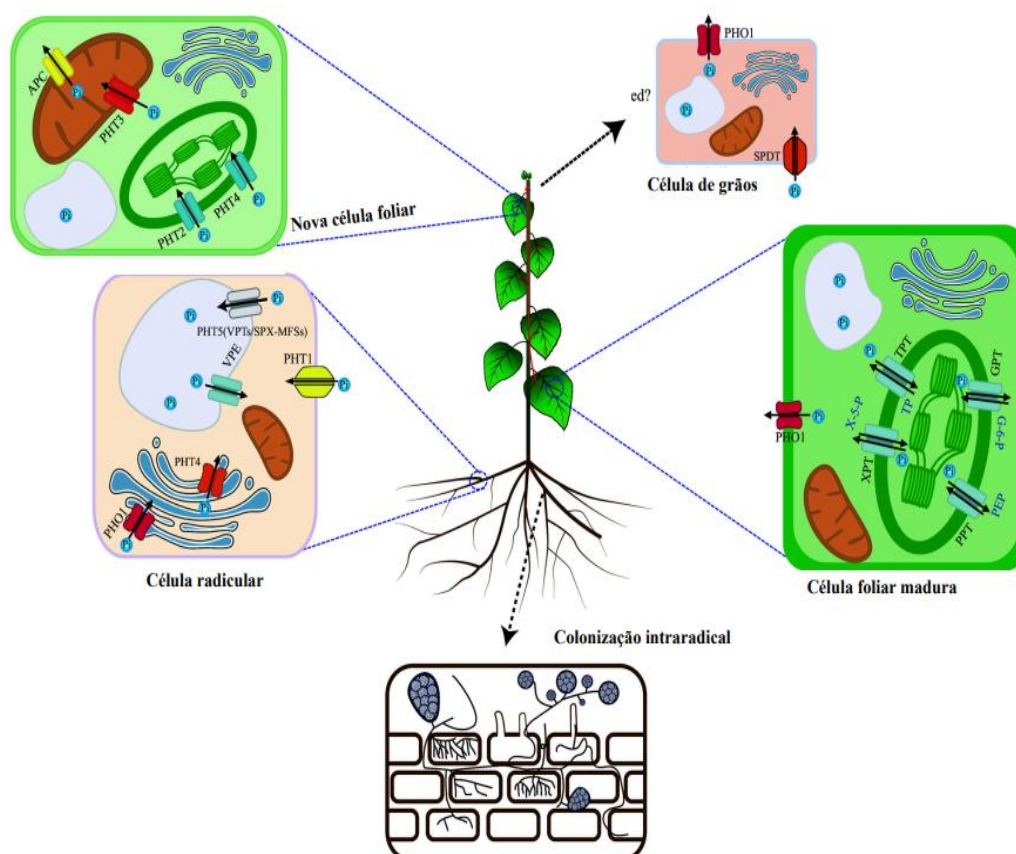
3.4 Aspectos fisiológicos e bioquímicos das plantas sob disponibilidade de P

No metabolismo vegetal da planta, o P está diretamente envolvido em processos fisiológicos e bioquímicos essenciais ao crescimento e à produtividade da soja. A absorção do P ocorre predominantemente na forma de íons fosfato, principalmente como H_2PO_4^- e, em menor proporção, HPO_4^{2-} , sendo essa absorção influenciada pela concentração do nutriente no solo, pelo pH, pela atividade radicular e pela presença de microrganismos associados à rizosfera (Marschner, 2012).

Após a absorção pelas raízes, o P é translocado para os tecidos aéreos (via xilema), onde participa ativamente do metabolismo energético, da síntese de ácidos nucleicos, fosfolipídios e coenzimas, além de integrar compostos fundamentais para a fotossíntese e respiração celular. Ao longo do ciclo da cultura, ocorre intensa redistribuição interna do P, principalmente durante o enchimento de grãos, quando grande parte do fósforo acumulado nas folhas e caules é remobilizada para os órgãos reprodutivos (Taiz et al., 2017).

Nas plantas, diversos tipos de transportadores estão envolvidos na complexa absorção, transporte e remobilização de fosfato inorgânico (Pi), a principal forma de P absorvida pelas raízes (Figura 3).

Figura 3 – Transportadores de absorção, transporte e remobilização de Pi em plantas.



Fonte: Adaptado de Wang et al. (2024).

3.4.1 Sintomas de Deficiência e Toxicidade por Fósforo

O P desempenha funções estruturais e metabólicas essenciais nas células vegetais, sendo componente fundamental dos fosfolipídios que formam as membranas celulares, dos ácidos nucleicos e do ATP. Sua deficiência compromete diretamente a integridade das membranas, prejudica a divisão celular e reduz a disponibilidade de energia para os processos metabólicos, o que se reflete nos sintomas observados externamente (Taiz et al., 2017).

Dessa forma, a deficiência de P na soja manifesta-se por meio de sintomas evidentes, como redução do crescimento vegetativo, hastes mais finas e folhas menores, em decorrência do comprometimento da divisão e expansão celular. Nas folhas mais velhas, observa-se o desenvolvimento de coloração verde-escura a púrpura, resultado do acúmulo de antocianinas, pigmentos sintetizados em resposta ao estresse nutricional (Malavolta, 2006). O sistema radicular torna-se pouco desenvolvido, comprometendo a capacidade de absorção de água e nutrientes. Adicionalmente, a deficiência de P afeta negativamente a nodulação e a fixação biológica de nitrogênio, reduzindo a produtividade da cultura (Malavolta, 2006; Taiz et al., 2017).

Já a toxicidade direta por P é menos evidente em condições de campo, uma vez que as plantas possuem mecanismos eficientes de regulação da absorção. No entanto, níveis excessivos de P no solo podem induzir deficiência de outros nutrientes, como zinco (Zn) e ferro (Fe), devido a interações antagônicas que eles possuem. Além disso, o excesso de P pode causar desequilíbrios nutricionais e contribuir para problemas ambientais, como a eutrofização de corpos d'água (Novais; Smyth, 1999).

3.4.2 Fases Críticas de Demanda de Fósforo

A demanda por P varia de acordo com os estágios fenológicos, sendo as fases iniciais de desenvolvimento, vegetativo, e as fases reprodutivas. Durante a germinação e emergência, o P é fundamental para o desenvolvimento radicular vigoroso e para o estabelecimento adequado das plântulas. Nas fases reprodutivas, o nutriente é essencial para a formação de flores, vagens e sementes, sendo intensamente remobilizado das partes vegetativas para os grãos em formação (Pinto; Duarte, 2019).

Estresses nutricionais durante os estádios reprodutivos podem resultar em aborto de flores, redução do número de vagens e diminuição do peso de grãos (Moseley, 2025). Por isso, estratégias de adubação que garantam adequada disponibilidade de P desde o plantio até o enchimento de grãos são fundamentais para maximizar o potencial produtivo da cultura (Grant et al., 2001).

3.4.3 Índices de Eficiência de Translocação e de Eficiência de Uso

A eficiência de translocação (ETP) e de uso (EUP) do P são parâmetros usados para avaliar a capacidade das plantas de mobilizar e utilizar o nutriente. Sendo assim, a translocação refere-se à capacidade da planta de redistribuir o P absorvido das raízes para a parte aérea e, posteriormente, dos tecidos vegetativos para os grãos, já que o importante economicamente é seu enchimento (Malavolta, 2006).

Já a eficiência de uso do P pode ser definida como a produção de massa ou de grãos por unidade de P absorvido. Cultivares mais eficientes são capazes de ter uma maior produtividade com menor quantidade de P.

3.5 Fontes de Fósforo para as Plantas

O P é um elemento essencial ao desenvolvimento vegetal, desempenhando papel fundamental em processos fisiológicos como transferência de energia, fotossíntese, respiração e síntese de ácidos nucleicos e fosfolipídios (Vance et al., 2003; Taiz et al., 2017). No solo,

esse elemento encontra-se em diferentes formas químicas, podendo ser classificado em fósforo orgânico e fósforo inorgânico.

3.5.1 Reservas de Fosfato Mundiais

As principais fontes de P provêm principalmente de rochas fosfáticas, que representam a única fonte viável deste nutriente em escala comercial. As reservas mundiais de rocha fosfática estão concentradas em poucos países, sendo Marrocos (incluindo o território do Saara Ocidental) o detentor da maior parte, com cerca de 50 bilhões de toneladas, o que representa aproximadamente 70% das reservas globais. China, Argélia, Síria, Brasil e Estados Unidos também possuem reservas significativas, porém em menor escala (IFA; ARGUS, 2023).

O Brasil possui reservas estimadas em cerca de 319 milhões de toneladas de rocha fosfática, representando apenas 0,4% das reservas mundiais. Essas reservas estão concentradas principalmente em Minas Gerais (67%), Goiás (14%) e São Paulo (6%). Devido à menor qualidade dessas reservas e aos custos mais elevados de produção, o Brasil importa aproximadamente metade do P que utiliza, sendo os principais fornecedores Marrocos, Rússia e Estados Unidos (EMBRAPA, 2019; DNPM, 2024).

Quanto à durabilidade das reservas, estimativas recentes indicam que, com as tecnologias atuais de extração e taxas de consumo projetadas, os depósitos de rocha fosfática seriam suficientes para suprir a demanda global por aproximadamente 300 a 350 anos. No entanto, é importante ressaltar que o fósforo é um recurso natural não renovável, e sua exploração sustentável, aliada ao desenvolvimento de tecnologias de reciclagem e uso mais eficiente, é fundamental para garantir a segurança alimentar das gerações futuras (IFA; ARGUS, 2023).

3.5.2 Fertilizantes Fosfatados Solúveis

Os fertilizantes fosfatados solúveis são obtidos por meio do processamento industrial de rochas fosfáticas com ácidos, resultando em produtos com maior disponibilidade imediata para as plantas. Os principais fertilizantes que se destacam nesse grupo são: Superfosfato Simples (SFS), produzido pela reação da rocha fosfática com ácido sulfúrico, apresenta teor de 20% de P_2O_5 solúvel em água. Além do P, fornece 12% de S e 20% de Ca, sendo adequado para solos deficientes nesses nutrientes. Diamônio Fosfato (DAP), com teor de 18% N e 46% P_2O_5 , que, devido ao pH alcalino, pode causar volatilização de amônia quando aplicado superficialmente, sendo recomendada a incorporação ao solo (Malavolta, 2006). Superfosfato

Triplo (SFT), obtido pela reação da rocha fosfática com ácido fosfórico, possui 46% P_2O_5 e não fornece enxofre (Novais; Smyth, 1999). Por fim, o Monoamônio Fosfato (MAP), fertilizante resultante da reação do ácido fosfórico com amônia, contém cerca de 11% N e 55% P_2O_5 (Pinto; Duarte, 2019).

3.5.3 Fertilizantes Fosfatados Naturais

Os fosfatos naturais são fertilizantes obtidos diretamente da moagem de rochas fosfáticas, sem processamento químico. Apresentam maior solubilidade em ácidos fracos e são mais eficientes em solos ácidos e para culturas de ciclo longo (Novais; Smyth, 1999).

No Brasil, destacam-se os fosfatos naturais de Araxá (MG), Patos de Minas (MG), Catalão (GO) e Anitápolis (SC). Esses materiais apresentam baixa a média reatividade e são utilizados principalmente em adubação de manutenção ou correção gradual da fertilidade do solo (EMBRAPA, 2019).

3.6 Baixa Eficiência de Uso do Fósforo

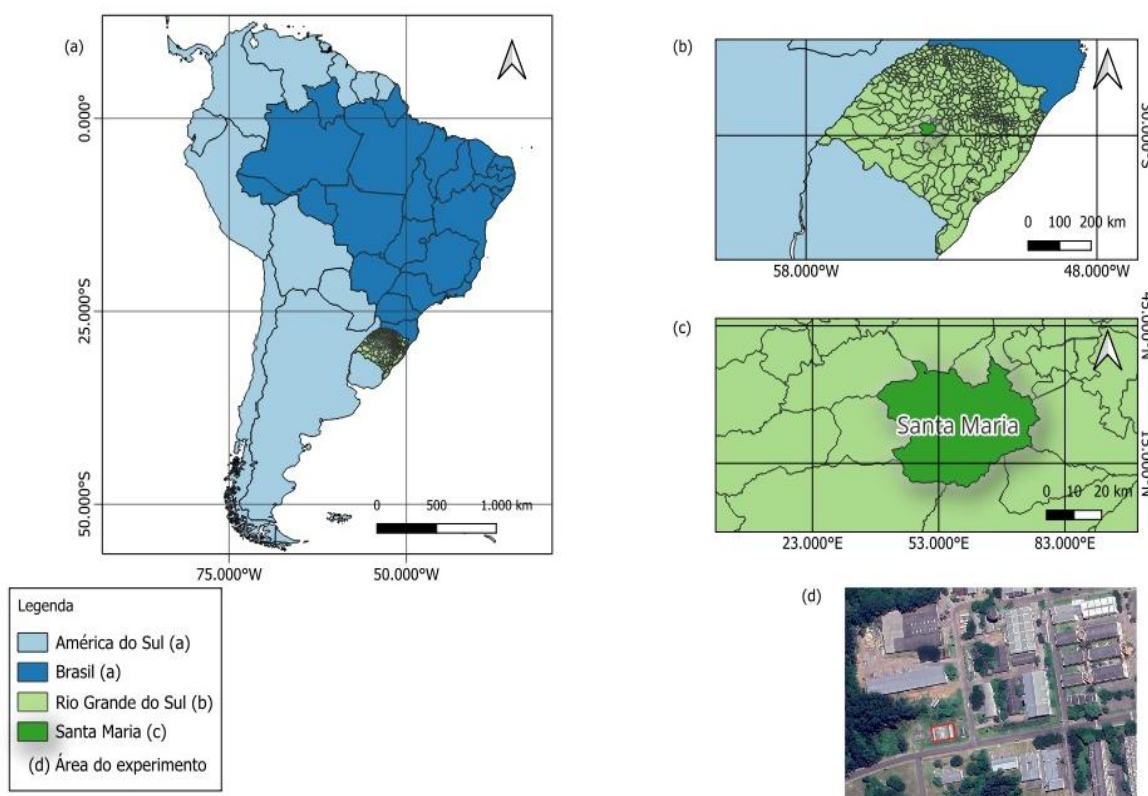
Um dos principais desafios associados à adubação fosfatada é a baixa eficiência de uso deste nutriente pelas plantas. É observado que de 10 a 25% do P aplicado via fertilizantes é absorvido pelas culturas no primeiro ano de cultivo. Os 75 a 90% restantes ficam retidos no solo por meio de processos de adsorção, precipitação ou absorção pelos microrganismos do solo, tornando-se indisponíveis para as plantas no curto prazo (Novais; Smyth, 1999; Grant et al., 2001).

Essa baixa eficiência é ainda mais evidente em solos tropicais e subtropicais altamente intemperizados, ricos em óxidos de Fe e alumínio (Al), que apresentam elevada capacidade de fixação de P. Nesses solos, a formação de fosfatos de Fe e Al de baixa solubilidade reduz drasticamente a disponibilidade do nutriente para plantas (Fageria; Stone, 2006).

4 METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado na casa de vegetação do Departamento de Biologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), município de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul (RS), sul do Brasil, com localização geográfica -29.7158° de latitude sul, -53.7202° de longitude oeste, com altitude média de 153 metros acima do nível do mar (Figura 4).

Figura 4 – Localização geográfica da casa de vegetação onde o estudo foi realizado.



Fonte: Autor (2026).

O estudo piloto foi conduzido em casa de vegetação, em condições controladas de temperatura, umidade e luminosidade, visando reduzir a interferência de fatores ambientais externos. O experimento conduzido testou 16 cultivares de soja, abrangendo representantes de grupos de maturidade relativa (GMR) entre 5,0 e 7,8, provenientes de diferentes obtentores e com distintas exigências de fertilidade do solo. Essa estratégia foi adotada para maximizar a variabilidade genética presente no mercado brasileiro atual (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição de características comerciais das cultivares de soja utilizadas no estudo.

Nº	Cultivar	Obtendor	GMR	EFS	HC
----	----------	----------	-----	-----	----

1	BMX 50i52 IPRO (Raio)	GDM (BrasMax)	5.0	Alta	Indeterminado
2	BMX 55i57 IPRO (Zeus)	GDM (BrasMax)	5.5	Alta	Indeterminado
3	NS 5445 IPRO	Nidera	5.6	NI	Indeterminado
4	M 5838 IPRO	Monsoy	5.8	NI	Indeterminado
5	BMX 59i60 IPRO (Delta)	GDM (BrasMax)	5.9	Média	Indeterminado
6	VTOP RR	Syngenta	5.9	NI	Indeterminado
7	SYN 1561 IPRO	Syngenta	6.1	Responsiva	Indeterminado
8	NS 6209 RR	Nidera	6.2	Alta	Determinado
9	NA 5909 RG	Nidera	6.2	Média	Indeterminado
10	TEC IRGA 6070 RR	CCGL-TEC	6.3	Média	Indeterminado
11	BRS 1003 IPRO	EMBRAPA	6.3	Alta	Indeterminado
12	M 6410 IPRO	Monsoy	6.4	Média	Indeterminado
13	DM 66i68 IPRO	GDM (DonMario)	6.6	Média	Indeterminado
14	BMX 68i70 IPRO (Ícone)	GDM (BrasMax)	6.8	Média	Indeterminado
15	BRS 1074 IPRO	EMBRAPA	7.4	Baixa	Indeterminado
16	TEC 7849 IPRO	CCGL-TEC	7.8	Alta	Indeterminado

GMR = Grau de maturidade relativa; EFS = Exigência em Fertilidade do Solo; HC = Hábito de crescimento; NI = Não informado.

As sementes germinaram em recipientes plásticos contendo vermiculita como substrato. Após a emergência, plântulas uniformes foram lavadas em água destilada e transferidas para o sistema hidropônico com espaçamento de 10 cm entre cada recipiente, no qual permaneceram por quatro dias em aclimatização e, após este período, foram adicionados os tratamentos. Durante o período de aclimatização, as plantas receberam a solução nutritiva distribuída por tubulação de 50 mm, contendo uma concentração intermediária de P ($55 \mu\text{mol P L}^{-1}$), em relação aos tratamentos com nível alto ($100 \mu\text{mol P L}^{-1}$) e baixo ($10 \mu\text{mol P L}^{-1}$) de P. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), ideal para experimentos em ambientes homogêneos, com três repetições.

Os demais nutrientes foram fornecidos na solução nutritiva nas seguintes concentrações (mg L^{-1}): 85,31 N; 11,54 S; 97,64 Ca; 23,68 Mg; 104,75 K; 176,76 Cl; 0,27 B; 0,05 Mo; 0,01 Ni; 0,13 Zn; 0,03 Cu; 0,11 Mn e 2,68 Fe. Essas concentrações de nutrientes já foram testadas para a cultura da soja em estudos hidropônicos (Schwalbert et al., 2019). A concentração desejada de P na solução foi obtida variando-se a quantidade de KH_2PO_4 , sendo o K balanceado com solução de KCl. Durante o período experimental, a solução nutritiva foi substituída a cada cinco dias a fim de manter as concentrações de nutrientes, e pH mantido em 5,9 e para evitar desequilíbrios iônicos decorrentes da absorção seletiva pelas plantas.

Aproximadamente 15 dias após a emergência, quando as plantas atingiram o estágio vegetativo de V2-V3 (Fehr and Caviness, 1977), as plantas foram separadas em parte aérea e raiz. A seguir, foram secas em estufa de ventilação forçada a 65 °C até atingirem massa constante para obtenção da massa seca. Os tecidos foram finamente moídos em moinho do tipo Willey, passados em peneira com malha de um milímetro e submetidos à digestão sulfúrica (Tedesco, 1995). A determinação da concentração total de P no extrato foi realizada pelo método colorimétrico utilizando espectrofotômetro de UV-visível a 882 nm (Murphy and Rilley, 1962).

O acúmulo de P nos tecidos foi obtido pelo produto entre a massa seca de cada órgão e a concentração de P. Uma vez obtidos estes dados, foram calculadas a eficiência de uso de P (EUP): $(\text{massa seca total da planta})^2 / \text{acúmulo de P na planta}$ (Siddiqi and Glass, 1981) e a eficiência de translocação de P (ETP): $\text{acúmulo de P na parte aérea} / \text{acúmulo de P total}$ (Li et al., 1991).

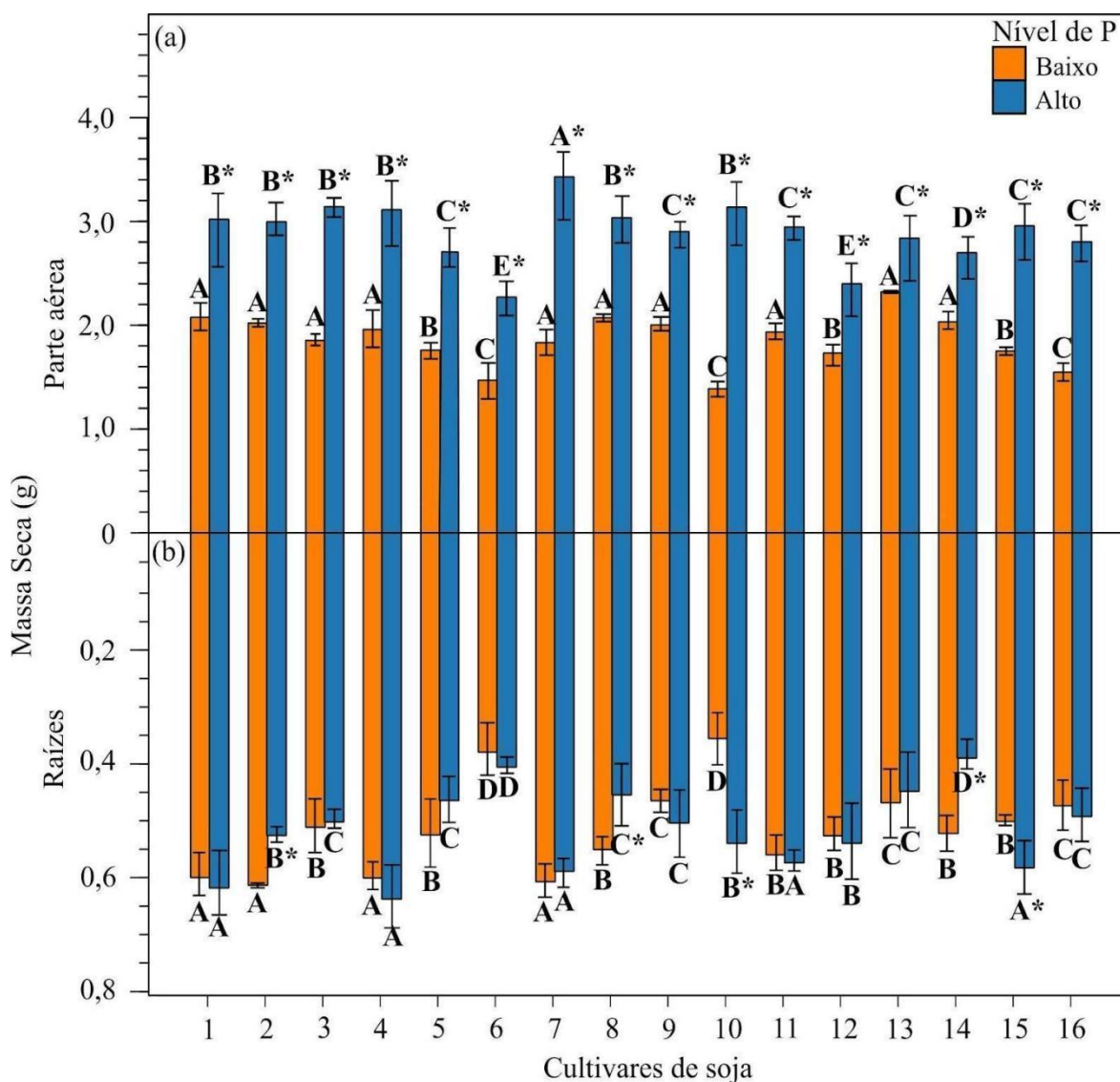
Inicialmente, os dados foram avaliados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e, posteriormente, submetidos à análise de variância. Nos casos em que houve significância estatística, a comparação entre médias foi realizada pelo teste de Scott-Knott, adotando-se o nível de 5% de probabilidade. Ao final, foi realizada uma análise de agrupamento considerando as variáveis resposta testadas. A similaridade entre as cultivares foi determinada pela distância euclidiana, calculada a partir da soma dos quadrados das distâncias entre os elementos. Optou-se pelo método hierárquico aglomerativo simples, sem transformação prévia dos dados. As análises estatísticas foram realizadas no ambiente estatístico R (R Core Team, 2026).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Massa seca de parte aérea e raízes de cultivares de soja

Os resultados mostram que as cultivares 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 11, 13 e 14, quando em baixo nível de disponibilidade de P, apresentaram os maiores valores de massa seca de parte aérea (Figura 5a), os quais foram em torno de 2,0 g. Por outro lado, quando o nível de disponibilidade de P foi alto, os maiores valores de massa seca de parte aérea foram obtidos pela cultivar 7 (Figura 5a), ultrapassando 3,0 g. Além disso, de maneira geral, todas as cultivares apresentaram maiores valores de massa seca de parte aérea quando cultivadas em alto nível de disponibilidade de P, em relação à quando cultivadas em baixo nível de P (Figura 5a). Em relação à massa seca das raízes, pode-se observar que, quando em baixo nível de disponibilidade de P, as cultivares de soja que obtiveram os melhores desempenhos foram 1, 2, 4 e 7 (Figura 5b). Já em alto nível de disponibilidade de P, as cultivares 1, 4, 7, 11 e 15 apresentaram os maiores valores de massa seca de raízes (Figura 5b). Ao contrário do comportamento geral observado na massa seca de parte aérea, a massa seca de raízes foi significativamente maior apenas nas cultivares 2, 8 e 14 (nível baixo), e cultivares 10 e 15 (nível alto) (Figura 5b).

Figura 5 – Massa seca de parte aérea (a) e de raízes (b) de cultivares de soja sob baixo e alto nível de disponibilidade de P. Barras laranjas indicam baixo nível de P. Barras azuis indicam alto nível de P. Letras comparam cultivares de soja para um mesmo nível de P. Asterisco indica diferença estatística entre os níveis de disponibilidade de P para uma mesma cultivar de soja. A comparação de médias foi realizada a partir do teste de Scott-Knott (p -valor < 0,05). Barras verticais indicam desvio padrão ($n = 3$).



1 = BMX 50i52 IPRO; 2 = BMX 55i57 IPRO; 3 = NS 5445 IPRO; 4 = M 5838 IPRO; 5 = BMX 59i60 IPRO; 6 = VTOP RR; 7 = SYN 1561 IPRO; 8 = NS 6209 RR; 9 = NA 5909 RG; 10 = TEC IRGA 6070 RR; 11 = BRS 1003 IPRO; 12 = M 6410 IPRO; 13 = DM 66i68 IPRO; 14 = BMX 68i70 IPRO; 15 = BRS 1074 IPRO; 16 = TEC 7849 IPRO.

Fonte: Autor (2026).

O aumento da massa seca da parte aérea sob alta disponibilidade de P ocorreu porque o P é essencial para a fotossíntese, atuando como componente do ATP e do NADPH, moléculas fundamentais para a fixação de CO₂ e produção de fotoassimilados (Taiz et al., 2017). Com maior disponibilidade de P, as plantas possivelmente mantiveram taxas fotossintéticas elevadas, resultando em maior produção de massa.

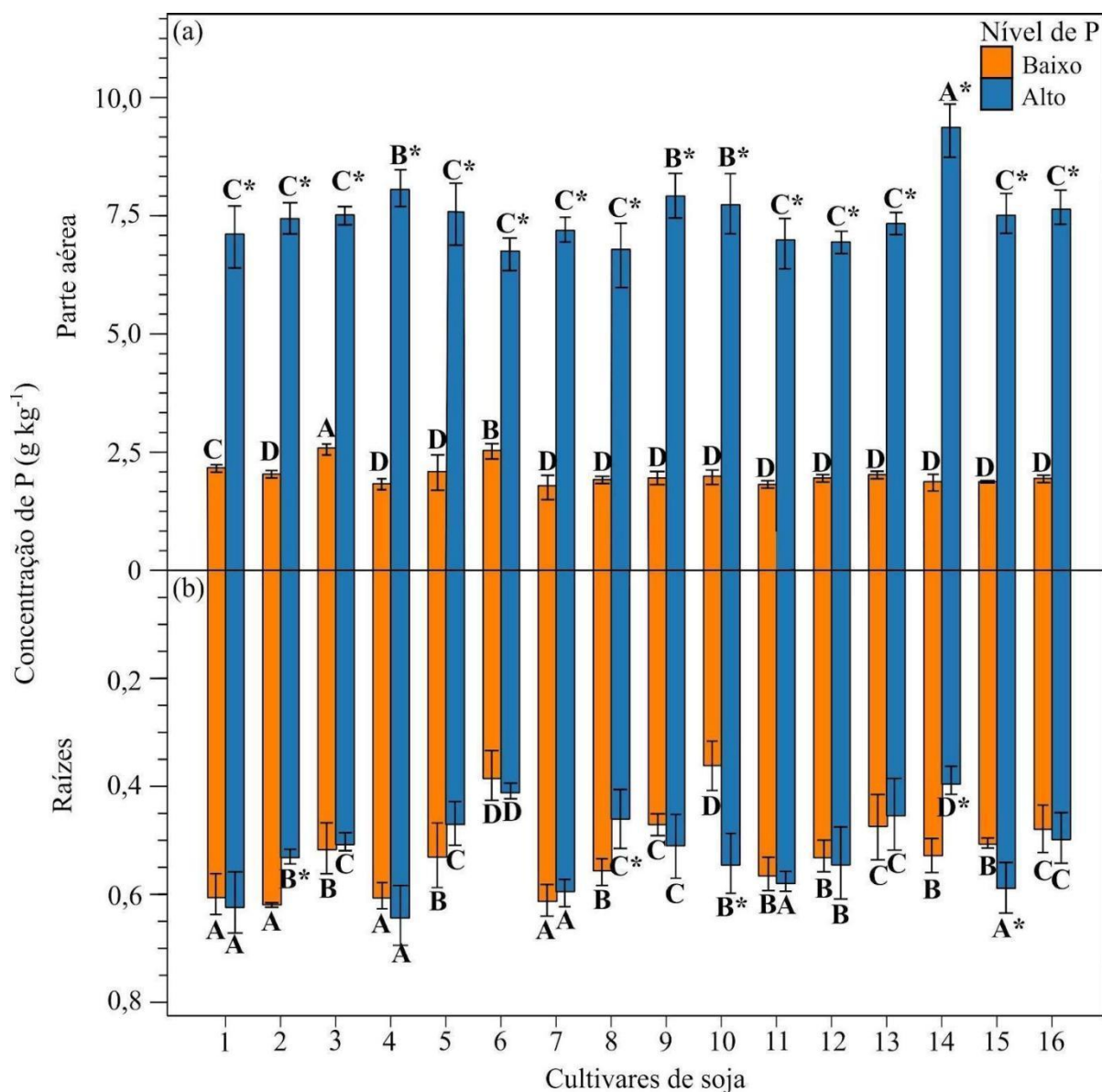
Já a menor resposta em massa seca de raízes em relação ao aumento de P, comparada à parte aérea, aconteceu porque, sob deficiência de P as plantas direcionam mais recursos no sistema radicular para buscar o nutriente limitante, enquanto sob adequado suprimento direcionam mais fotoassimilados para a parte aérea, maximizando a captação de luz (Lynch,

2011; Poorter et al., 2012). As diferenças entre cultivares evidenciam variabilidade genotípica para tolerância à deficiência de P, com alguns materiais apresentando potenciais mecanismos adaptativos a ambientes mais pobres em P, indicando maior eficiência.

5.2 Concentração de P nos tecidos de parte aérea e raízes de cultivares de soja

Os resultados demonstram que, em baixo nível de disponibilidade de P, as cultivares 3 e 6 apresentam maiores valores de concentração de P na parte aérea, sendo em torno de 2,5 g (Figura 6a). Já quando submetidas a alto nível de disponibilidade de P, apenas a cultivar 14 apresentou maiores valores, ultrapassando 9,0 g, enquanto as demais cultivares mantiveram valores entre 7,0 e 8,0 g (Figura 6a). De forma geral, todas as cultivares apresentaram incremento expressivo na concentração de P da parte aérea quando submetidas a alto nível de disponibilidade de P em comparação ao baixo nível de P. Com relação à concentração de P nas raízes, observa-se que, em baixo nível de P, as cultivares 1, 2, 4 e 7 se destacaram, apresentando os maiores valores (Figura 6b). Por outro lado, em alto nível de P, os maiores valores foram observados para as cultivares 1, 4, 7, 11 e 15 (Figura 6b).

Figura 6 – Concentração de P na parte aérea (a) e nas raízes (b) de cultivares de soja sob baixo e alto nível de disponibilidade de P. Barras laranjas indicam baixo nível de P. Barras azuis indicam alto nível de P. Letras comparam cultivares de soja para um mesmo nível de P. Asterisco indica diferença estatística entre os níveis de disponibilidade de P para uma mesma cultivar de soja. A comparação de médias foi realizada a partir do teste de Scott-Knott (p -valor < 0,05). Barras verticais indicam desvio padrão ($n = 3$).



1 = BMX 50i52 IPRO; 2 = BMX 55i57 IPRO; 3 = NS 5445 IPRO; 4 = M 5838 IPRO; 5 = BMX 59i60 IPRO; 6 = VTOP RR; 7 = SYN 1561 IPRO; 8 = NS 6209 RR; 9 = NA 5909 RG; 10 = TEC IRGA 6070 RR; 11 = BRS 1003 IPRO; 12 = M 6410 IPRO; 13 = DM 66i68 IPRO; 14 = BMX 68i70 IPRO; 15 = BRS 1074 IPRO; 16 = TEC 7849 IPRO.

Fonte: Autor (2026).

O aumento da concentração de P nos tecidos, quando há alta disponibilidade no ambiente, ocorre devido à maior absorção pelas raízes por meio de transportadores de fosfato presentes nas membranas celulares (Raghothama; Karthikeyan, 2005). Entretanto, parte do P absorvido é armazenado em organelas específicas, como nos vacúolos, na forma de fosfato inorgânico, fenômeno fisiologicamente denominado de "consumo de luxo" (Marschner, 2012).

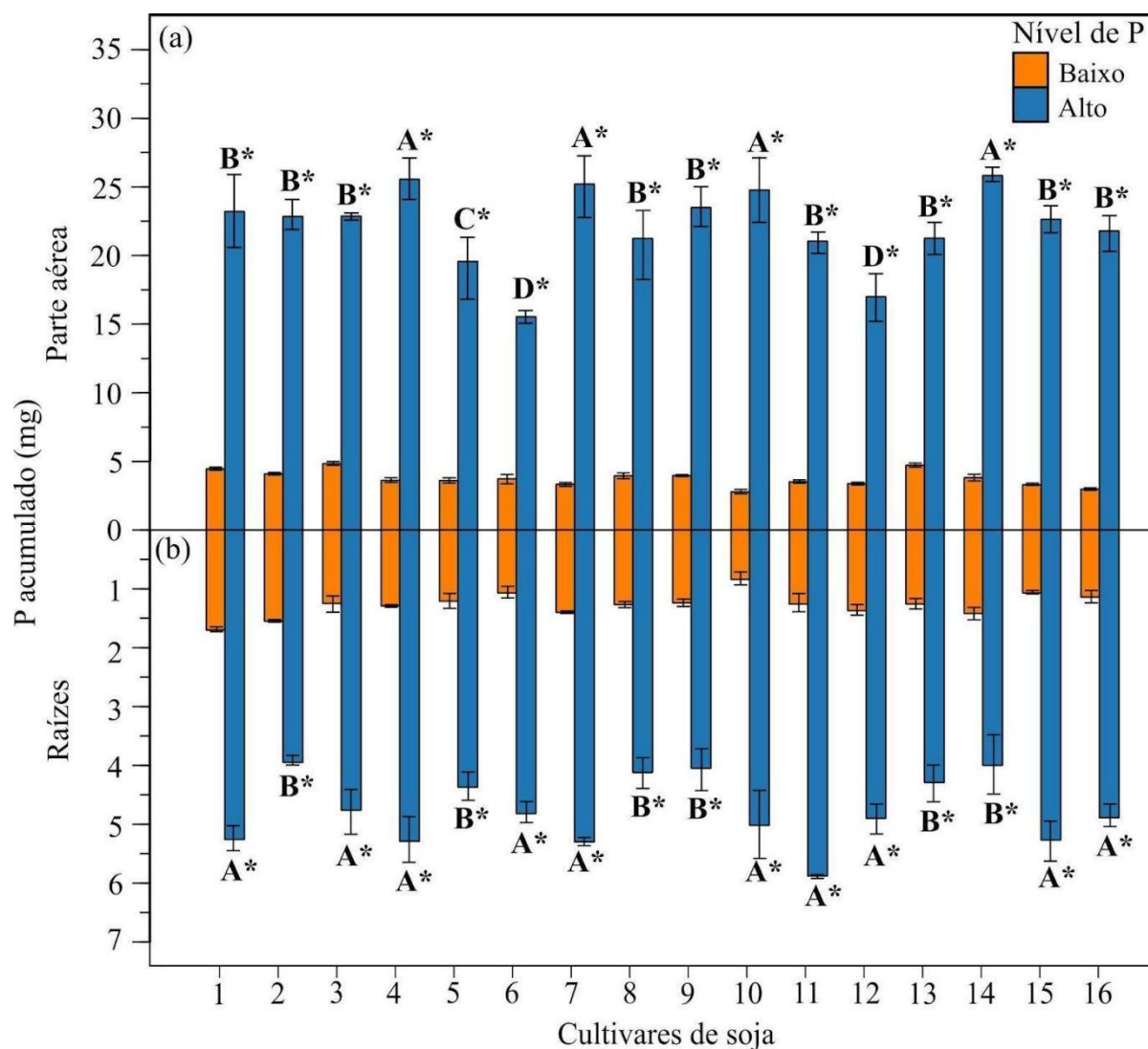
As cultivares que apresentaram maiores concentrações de P nos tecidos mesmo em baixa disponibilidade de P no ambiente provavelmente possuem maior atividade de transportadores de alta afinidade (família PHT1), que são ativados em condições de

deficiência e conseguem absorver P mesmo quando o elemento está presente em pequenas concentrações (Nussaume et al., 2011).

5.3 P acumulado nos tecidos de parte aérea e raízes de cultivares de soja

Os resultados indicam que, sob baixo nível de disponibilidade de P, todas as cultivares apresentaram valores de P acumulado na parte aérea próximos de 5 mg (Figura 7a). Quando submetidas ao alto nível de disponibilidade de P, destacaram-se principalmente as cultivares 4, 7, 10 e 14 com resultados em torno de 25 mg de P acumulado na parte aérea (Figura 7a). De modo geral, todas as cultivares apresentaram maior acúmulo de P na parte aérea sob alto nível de P em comparação ao baixo nível de disponibilidade de P. Em relação ao P acumulado nas raízes, sob baixo nível de disponibilidade, todas as cultivares apresentaram valores próximos de 1,5 mg (Figura 7b). Por outro lado, em alto nível de P, observaram-se maiores valores acumulados nas cultivares 1, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 15 e 16, com acúmulo próximo ou superior a 5 mg (Figura 7b).

Figura 7 – P acumulado na parte aérea (a) e nas raízes (b) de cultivares de soja sob baixo e alto nível de disponibilidade de P. Barras laranjas indicam baixo nível de P. Barras azuis indicam alto nível de P. Letras comparam cultivares de soja para um mesmo nível de P. Asterisco indica diferença estatística entre os níveis de disponibilidade de P para uma mesma cultivar de soja. A comparação de médias foi realizada a partir do teste de Scott-Knott (p -valor $< 0,05$). Barras verticais indicam desvio padrão ($n = 3$).



1 = BMX 50i52 IPRO; 2 = BMX 55i57 IPRO; 3 = NS 5445 IPRO; 4 = M 5838 IPRO; 5 = BMX 59i60 IPRO; 6 = VTOP RR; 7 = SYN 1561 IPRO; 8 = NS 6209 RR; 9 = NA 5909 RG; 10 = TEC IRGA 6070 RR; 11 = BRS 1003 IPRO; 12 = M 6410 IPRO; 13 = DM 66i68 IPRO; 14 = BMX 68i70 IPRO; 15 = BRS 1074 IPRO; 16 = TEC 7849 IPRO.

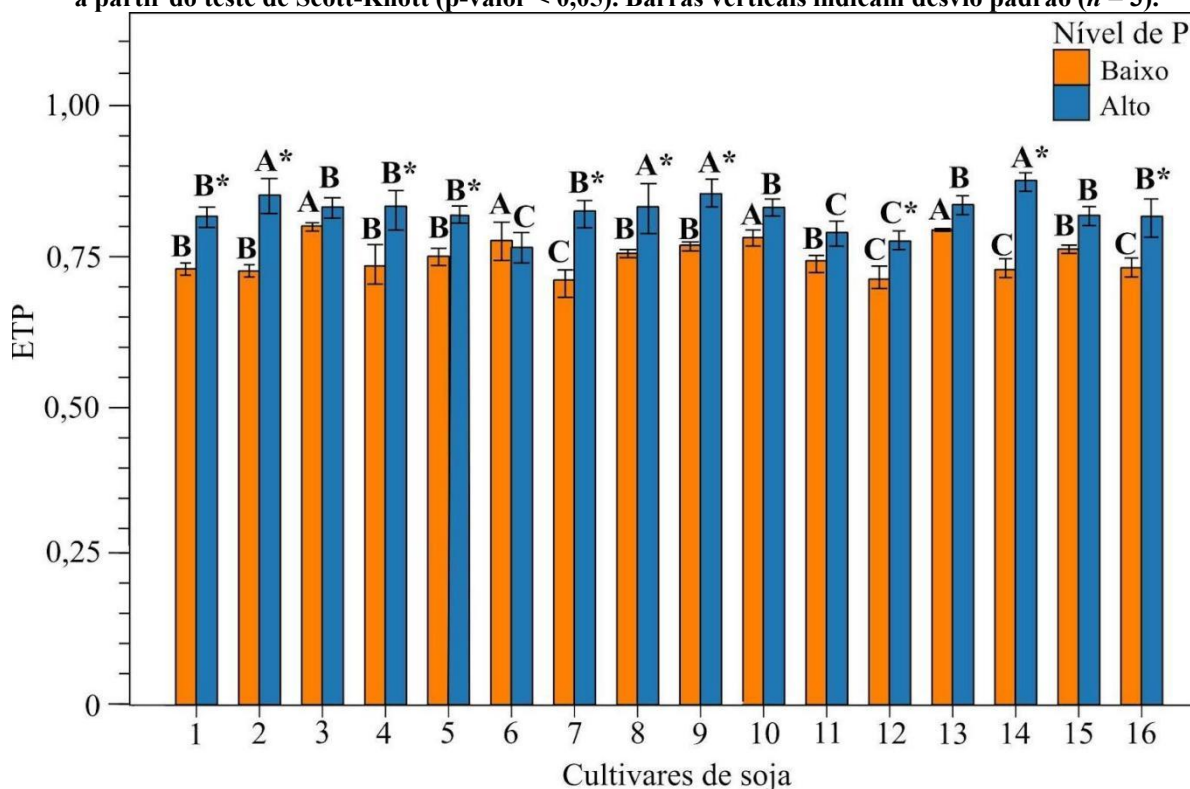
Fonte: Autor (2026).

O maior acúmulo de P sob alta disponibilidade ocorreu porque este parâmetro resulta do produto entre massa seca e concentração de P, ambos superiores nessa condição. As cultivares M 5838 IPRO, SYN 1561 IPRO, TEC IRGA 6070 RR e BMX 68i70 IPRO (Ícone) destacaram-se por combinar elevada capacidade de absorção com eficiente produção de massa, caracterizando-se como materiais responsivos à adubação fosfatada (Fageria, 1998). O maior acúmulo na parte aérea comparado às raízes deve-se à maior demanda metabólica dos tecidos fotossinteticamente ativos (Veneklaas et al., 2012).

5.4 Eficiência de translocação de P em cultivares de soja

Os resultados mostram que, sob baixo nível de disponibilidade de P, as cultivares 3, 6, 10 e 13 apresentaram valores mais elevados de ETP, os quais foram próximos de 0,75 (Figura 8). Já quando as cultivares foram submetidas ao alto nível de disponibilidade de P, observaram-se os maiores valores de ETP nas cultivares 2, 8, 9 e 14, com médias próximas ou superiores a 0,85 (Figura 8). De modo geral, a maioria das cultivares apresentou aumento da eficiência de translocação de P quando submetida ao alto nível de disponibilidade de P, evidenciando melhor redistribuição interna do nutriente nessas condições.

Figura 8 – Eficiência de translocação de P (ETP) em cultivares de soja sob baixo e alto nível de disponibilidade de P. Barras laranjas indicam baixo nível de P. Barras azuis indicam alto nível de P. Letras comparam cultivares de soja para um mesmo nível de P. Asterisco indica diferença estatística entre os níveis de disponibilidade de P para uma mesma cultivar de soja. A comparação de médias foi realizada a partir do teste de Scott-Knott (p -valor < 0,05). Barras verticais indicam desvio padrão ($n = 3$).



1 = BMX 50i52 IPRO; 2 = BMX 55i57 IPRO; 3 = NS 5445 IPRO; 4 = M 5838 IPRO; 5 = BMX 59i60 IPRO; 6 = VTOP RR; 7 = SYN 1561 IPRO; 8 = NS 6209 RR; 9 = NA 5909 RG; 10 = TEC IRGA 6070 RR; 11 = BRS 1003 IPRO; 12 = M 6410 IPRO; 13 = DM 66i68 IPRO; 14 = BMX 68i70 IPRO; 15 = BRS 1074 IPRO; 16 = TEC 7849 IPRO.

Fonte: Autor (2026).

O aumento da ETP em condições de alta disponibilidade de P ocorre porque as plantas não precisam armazenar grandes quantidades do nutriente nas raízes, permitindo que a maior parte do P seja transportada para a parte aérea (Marschner, 2012). Esse transporte pelo

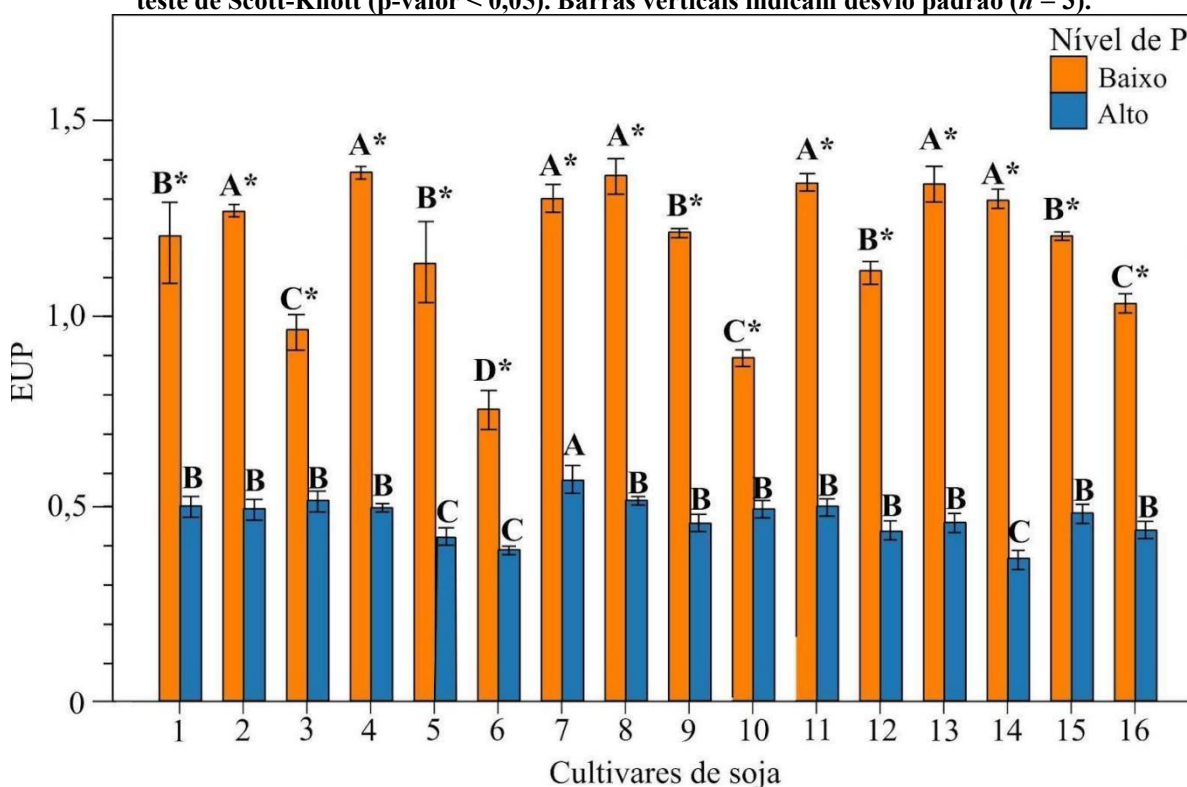
xilema é favorecido pelo maior fluxo de transpiração e pela maior quantidade de P disponível para ser conduzida pelos vasos da planta.

As cultivares que mantiveram alta eficiência de ETP mesmo em baixa disponibilidade de P provavelmente priorizaram o transporte do nutriente para os tecidos fotossinteticamente ativos, como a parte aérea. Essa é uma estratégia importante para manter a produção de fotoassimilados em condições de deficiência (Hammond et al., 2009; Schwalbert et al., 2026).

5.5 Eficiência de uso de P em cultivares de soja

Os resultados mostram que, sob baixo nível de disponibilidade de P, as cultivares 2, 4, 7, 8, 11, 13 e 14 apresentaram os maiores valores de eficiência de uso de P (EUP), com médias próximas a 1,5 (Figura 9). Quando cultivadas sob alto nível de disponibilidade de P, apenas a cultivar 7 se destacou, sendo que os valores de EUP foram mais baixos para todas as cultivares, em torno de 0,5 (Figura 9). De maneira geral, a eficiência de uso de P foi significativamente maior sob baixo nível de disponibilidade de P, evidenciando que as cultivares apresentaram melhor aproveitamento do nutriente em condições limitantes.

Figura 9 – Eficiência de uso de P (EUP) em cultivares de soja sob baixo e alto nível de disponibilidade de P. Barras laranjas indicam baixo nível de P. Barras azuis indicam alto nível de P. Letras comparam cultivares de soja para um mesmo nível de P. Asterisco indica diferença estatística entre os níveis de disponibilidade de P para uma mesma cultivar de soja. A comparação de médias foi realizada a partir do teste de Scott-Knott (p -valor $< 0,05$). Barras verticais indicam desvio padrão ($n = 3$).



1 = BMX 50i52 IPRO; 2 = BMX 55i57 IPRO; 3 = NS 5445 IPRO; 4 = M 5838 IPRO; 5 = BMX 59i60 IPRO; 6 = VTOP RR; 7 = SYN 1561 IPRO; 8 = NS 6209 RR; 9 = NA 5909 RG; 10 = TEC IRGA 6070 RR; 11 = BRS 1003 IPRO; 12 = M 6410 IPRO; 13 = DM 66i68 IPRO; 14 = BMX 68i70 IPRO; 15 = BRS 1074 IPRO; 16 = TEC 7849 IPRO.

Fonte: Autor (2026).

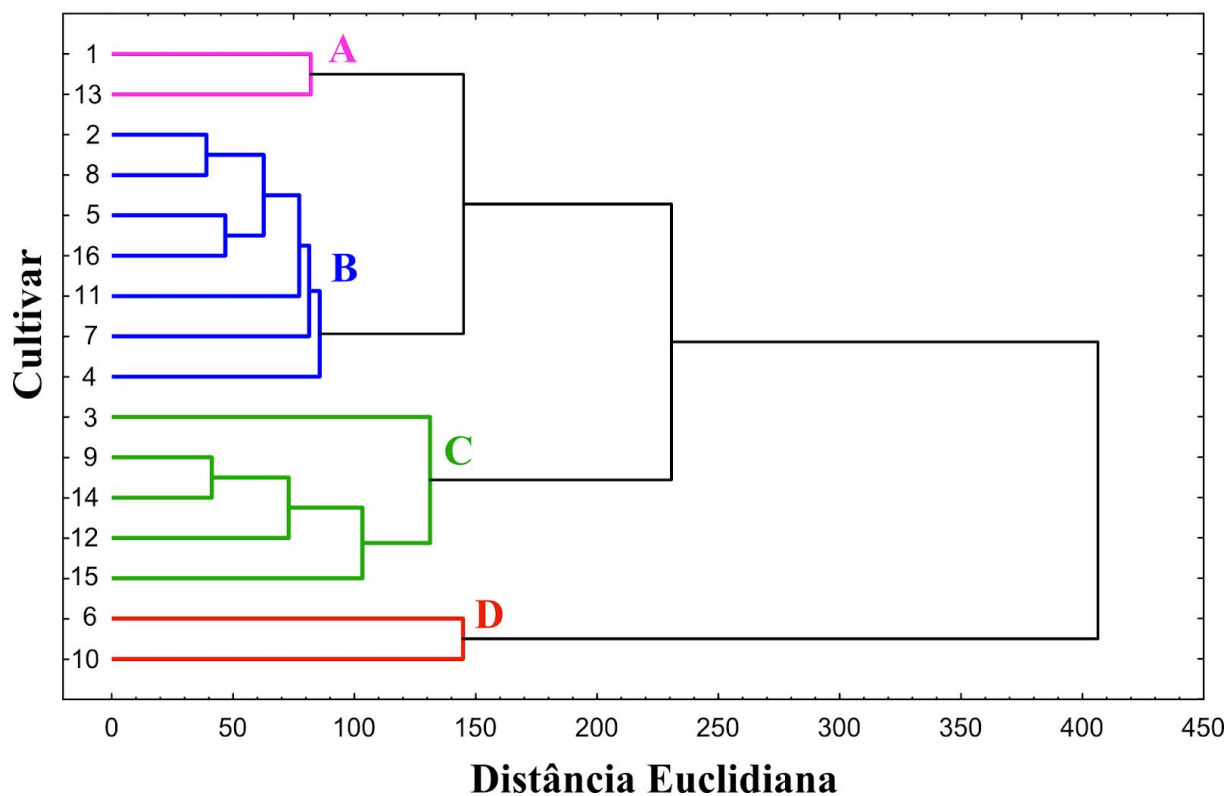
A maior EUP sob baixa disponibilidade de P aconteceu porque as plantas ativam mecanismos adaptativos para otimizar a utilização do P escasso. Os principais mecanismos a serem observados são: substituição de fosfolipídios de membrana por glicolipídios que não contêm P (Härtel et al., 2000), ativação de vias metabólicas alternativas, aumento da atividade de fosfatases intracelulares que reciclam P de compostos orgânicos (Plaxton; Tran, 2011; Vance et al., 2003); e a maior remobilização interna de P de tecidos velhos para tecidos jovens (Veneklaas et al., 2012).

A redução da EUP sob alta disponibilidade de P ocorreu devido ao consumo excessivo, no qual as plantas absorvem P além das necessidades metabólicas imediatas e armazenam o excesso como fosfato inorgânico. Esse P não contribuiu diretamente para a produção de massa no período avaliado, reduzindo a relação massa por P absorvido (Marschner, 2012). As cultivares BMX 55i57 IPRO (Zeus), M 5838 IPRO, SYN 1561 IPRO, NS 6209 RR, BRS 1003 IPRO, DM 66i68 IPRO e BMX 68i70 IPRO (Ícone), que apresentaram elevada EUP sob baixa disponibilidade, possuem mecanismos adaptativos mais eficientes, sendo assim são mais viáveis para investimentos menores de adubação de P.

5.6 Análise de cluster

A análise de cluster demonstrou a separação das cultivares em quatro grupos, levando em consideração todas as variáveis-resposta obtidas em baixo nível de P (Figura 10). As cultivares 6 e 10 estão presentes no grupo D e são as cultivares que mais se diferenciam das demais, segundo essa análise. Em seguida, observa-se a separação do grupo C, no qual se encontram as cultivares 3, 9, 12, 14 e 15, no qual a cultivar 3 se distinguiu das demais. O grupo B foi formado pelas cultivares 2, 4, 5, 7, 8, 11 e 16, e o grupo A, formado pelas cultivares 1 e 13 (Figura 10). Sob baixa oferta de P, as cultivares 6 e 10 apresentaram os mais baixos valores de EUP (Figura 9) e de massa seca (Figura 5a, b), o que contribuiu para sua separação em um grupo distinto das demais cultivares pela análise de cluster (Figura 10).

Figura 10 – Dendrograma representando o agrupamento de 16 cultivares de soja (1 a 16), com base na distância euclidiana em baixo nível de disponibilidade de P em solução nutritiva. Foram identificados quatro grupos distintos: A (rosa), B (azul), C (verde) e D (vermelho).



1 = BMX 50i52 IPRO; 2 = BMX 55i57 IPRO; 3 = NS 5445 IPRO; 4 = M 5838 IPRO; 5 = BMX 59i60 IPRO; 6 = VTOP RR; 7 = SYN 1561 IPRO; 8 = NS 6209 RR; 9 = NA 5909 RG; 10 = TEC IRGA 6070 RR; 11 = BRS 1003 IPRO; 12 = M 6410 IPRO; 13 = DM 66i68 IPRO; 14 = BMX 68i70 IPRO; 15 = BRS 1074 IPRO; 16 = TEC 7849 IPRO.

Fonte: Autor (2026).

As cultivares VTOP RR (Syngenta) e TEC IRGA 6070 RR (CCGL-TEC) no Grupo D, possivelmente se distinguiram dos demais materiais por priorizarem outras características agronômicas, como resistência a herbicidas e adaptação regional, não sendo submetidas a grandes pressões de seleção para eficiência em condições limitantes de P.

É importante ressaltar que o baixo desempenho sob condições limitantes de P não significa que essas cultivares sejam inferiores em termos absolutos. Em sistemas de produção com adequada disponibilidade de P no solo, essas cultivares podem expressar seu potencial produtivo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstraram que as diferentes cultivares de soja apresentam distintas respostas quanto à eficiência nutricional do fósforo. A caracterização fisiológica revelou que o aumento da disponibilidade de P promoveu resultados expressivos na massa seca de parte aérea e raízes, bem como na concentração e no acúmulo de P nos tecidos vegetais. Esse comportamento evidencia que, mesmo em cultivares modernas, a resposta à adubação fosfatada permanece como fator determinante para a maximização da produtividade.

A eficiência de translocação de P foi superior sob alta disponibilidade do nutriente, indicando que condições adequadas favorecem a redistribuição interna do fósforo, especialmente para órgãos reprodutivos. Por outro lado, a eficiência de uso de P mostrou-se significativamente maior em condições de baixa disponibilidade, revelando que as plantas desenvolvem mecanismos adaptativos para otimizar a utilização do nutriente em ambientes limitantes.

As cultivares BMX 55i57 IPRO (Zeus), M 5838 IPRO, SYN 1561 IPRO, NS 6209 RR, BRS 1003 IPRO, DM 66i68 IPRO e BMX 68i70 IPRO destacaram-se sob baixa disponibilidade de P, apresentando maior eficiência de uso do nutriente, enquanto as cultivares M 5838 IPRO, SYN 1561 IPRO, TEC IRGA 6070 RR e BMX 68i70 IPRO (Ícone) demonstraram melhor desempenho sob alta disponibilidade, caracterizando-se como materiais responsivos à adubação fosfatada. Essa diversidade de comportamentos reforça a importância da seleção criteriosa de cultivares de acordo com as condições edafoclimáticas e o nível de investimento em fertilização de cada sistema produtivo.

Os resultados deste trabalho fornecem avaliações relevantes que contribuem para o manejo da adubação fosfatada na cultura da soja, auxiliando na tomada de decisão quanto à escolha de cultivares mais adequadas aos diferentes cenários de disponibilidade de P. Nesse contexto, o estudo contribui para o desenvolvimento de sistemas de produção mais eficientes, econômicos e sustentáveis, especialmente diante da necessidade de reduzir a dependência de insumos externos e minimizar impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. **Os adubos e a eficiência das adubações**. 3. ed. São Paulo: ANDA, 1991.
- BARROW, N. J. The four laws of soil chemistry: the Leeper lecture 1998. **Australian Journal of Soil Research**, v. 37, n. 5, p. 787-829, 1999.
- BROWNLIE, W. J.; S et al.. Global actions for a sustainable phosphorus future. **Nature Food**, v. 2, p. 71–74, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00232-w>
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/25 - décimo segundo levantamento**. Brasília, DF: CONAB, setembro 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- CORTELLA, M. S. **Por que fazemos o que fazemos?:** aflições vitais sobre trabalho, carreira e realização. São Paulo: Planeta, 2015. 176 p.
- CQFS-RS/SC - Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.
- DICK, W. A. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 3, p. 569-574, 1994.
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral Brasileiro 2024**. Brasília, DF: Agência Nacional de Mineração, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br>. Acesso em: 20 jan. 2026.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja - Região Central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. (Sistemas de Produção, 16).
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Fosfatos naturais reativos no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998.
- FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. **Qualidade do solo e meio ambiente**. Série Documentos. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 36 p.
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11 p. (Special Report, 80).

FREITAS, M. C. M. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, p. 1-12, 2011.

GITTI, D. C.; ROSCOE, R.; RIZZATO, C. S. Adubação fosfatada em soja no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, n. 170, p. 23-29, 2019.

GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W. J. (Ed.). **Solo do Cerrado: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel; Brasília, DF: EMBRAPA-CPAC, 1986. p. 129-166.

GRANT, C. A. et al. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 95, p. 1-5, set. 2001.

HAMMOND, J. P.; BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J. Genetic responses to phosphorus deficiency. **Annals of Botany**, v. 94, n. 3, p. 323-332, 2009.

HÄRTEL, H.; DÖRMANN, P.; BENNING, C. DGD1-independent biosynthesis of extraplastidic galactolipids after phosphate deprivation in Arabidopsis. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 97, n. 19, p. 10649-10654, 2000.

HAYNES, R. J. Lime and phosphate in the soil-plant system. **Advances in Agronomy**, v. 37, p. 249-315, 1984.

HYMOWITZ, T.; SINGH, R. J. Taxonomy and speciation. In: WILCOX, J. R. (Ed.). **Soybeans: Improvement, production, and uses**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1987. p. 23-48.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro: IBGE, dezembro de 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15 jan. 2026.

IFA - International Fertilizer Association; ARGUS. **Phosphate rock reserves and resources: current and future outlook**. Paris: IFA, 2023. Disponível em: <https://www.fertilizer.org>. Acesso em: 20 jan. 2026.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, 1994. p. 53-72.

KUCEY, R. M. N. Phosphate-solubilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 63, n. 4, p. 671-678, 1983.

LEMAIRE, G. et al. Grassland-based livestock systems: securing ecosystem sustainability. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 45, n. 1, p. 1-18, 2025.

LI, C. J. et al. Rhizosphere interactions and phosphorus mobilization. **Plant and Soil**, v. 142, n. 2, p. 183-191, 1991.

LYNCH, J. P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 1041-1049, 2011.

- MARSCHNER, H. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. 651 p.
- MOSELEY, D. O. The soybean growth cycle: important risks and management strategies. **Crop, Forage & Turfgrass Management**, v. 11, n. 1, e20215, 2025.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.
- NAHAS, E. Controle microbiano da disponibilidade de fósforo em solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 8, p. 991-1005, ago. 2002.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.
- NUSSAUME, L. et al. Phosphate import in plants: focus on the PHT1 transporters. **Frontiers in Plant Science**, v. 2, p. 83, 2011.
- PARENTONI, S. N.; SOUZA JÚNIOR, C. L. de et al. Eficiência de aquisição e utilização interna de fósforo em milho tropical: importância relativa e critérios de seleção. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008, Londrina. **Agroenergia, produção de alimentos e mudanças climáticas: desafios para milho e sorgo**. Londrina: IAPAR; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008.
- PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. (Ed.). **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2019. 482 p.
- PINTO, F. A.; DUARTE, A. P. Adubação fosfatada na cultura da soja. In: LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. (Ed.). **Interpretação de análise de solo: conceitos e aplicações**. 3. ed. São Paulo: ANDA, 2019. p. 245-268.
- PLAXTON, W. C.; TRAN, H. T. Metabolic adaptations of phosphate-starved plants. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 1006-1015, 2011.
- POIRIER, Y.; BUCHER, M. Phosphate transport and homeostasis in Arabidopsis. **The Arabidopsis Book**, v. 1, e0024, 2002.
- POORTER, H. et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, v. 193, n. 1, p. 30-50, 2012.
- PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória: INCAPER, 2013. 104 p.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2026. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- RAGHOTHAMA, K. G.; KARTHIKEYAN, A. S. Phosphate acquisition. **Plant and Soil**, v. 274, n. 1-2, p. 37-49, 2005.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 1, p. 151-160, jan. 2001.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 115-124, 1999.

ROSA, F. A.; CAMPONI, S. S.; ZANÃO JÚNIOR, L. A. Disponibilidade de fósforo em função do pH do solo. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 2, n. 3, p. 1234-1245, 2016.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, mar./abr. 2007.

SCHOLZ, R. W. et al. **The dynamics of increasing mineral resources and improving resource efficiency**. Resources, Conservation and Recycling, 2024.

SCHWALBERT, R. et al. Phosphorus dynamics in soybean: partitioning, redistribution, and physiological responses under fertilized and unfertilized tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 258, 107030, 2026.

SCHWALBERT, R. et al. Nutrient solution composition for soybean hydroponic studies. **Crop Science**, v. 59, n. 3, p. 1181-1190, 2019.

SCHWALBERT, R. A. et al. Satellite-based soybean yield forecast: Integrating machine learning and weather data for improving crop predictions in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 284, n. 1, p. 107886, 2023.

SEDIYAMA, T. (Ed.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecenas, 2016. 352 p.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: UFV, 2015. 333 p.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496 p.

TEDESCO, M. J. (Org.). **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1995. 174 p.

USDA - United States Department of Agriculture. **World agricultural production**. Washington, DC: USDA, 2025. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline>. Acesso em: 12 jan. 2026.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, v. 157, n. 3, p. 423-447, 2003.

VENEKLAAS, E. J. et al. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. **New Phytologist**, v. 195, n. 2, p. 306-320, 2012.