

# RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)  
autor(a), o texto completo desta tese  
será disponibilizado somente a partir  
de 08/04/2027.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**

**CAMPUS DE JABOTICABAL**

**EFICIÊNCIA DO USO DO FÓSFORO ASSOCIADA A  
CARACTERES AGRONÔMICOS E RADICULARES EM  
GENÓTIPOS DE SOJA**

**Alyce Carla Rodrigues Moitinho**

**Bióloga**

**2025**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**

**CAMPUS DE JABOTICABAL**

**EFICIÊNCIA DO USO DO FÓSFORO ASSOCIADA A  
CARACTERES AGRONÔMICOS E RADICULARES EM  
GENÓTIPOS DE SOJA**

**Discente: Alyce Carla Rodrigues Moitinho**

**Orientadora: Profa. Dra. Sandra Helena Unêda-Trevisoli**

**Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas).**

**2025**

M715e Moitinho, Alyce Carla Rodrigues  
Eficiência do uso do fósforo associada a caracteres agronômicos e radiculares em genótipos de soja / Alyce Carla Rodrigues Moitinho. -- Jaboticabal, 2025  
88 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal  
Orientadora: Sandra Helena Unêda -Trevisoli

1. Glycine max. 2. Arquitetura radicular. 3. Densidade de pelos. 4. Eficiência de absorção de fósforo. 5. Solos tropicais.  
I. Título.

## **Impacto potencial desta pesquisa**

A adoção de estratégias que conciliem alta produtividade com menor dependência de fertilizantes está em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente no que se refere à erradicação da fome, segurança alimentar e promoção de práticas agrícolas sustentáveis. Neste cenário, o melhoramento genético da soja visando à seleção de genótipos mais eficientes na absorção e utilização do fósforo (P) surge como alternativa promissora frente à escassez e ao alto custo desse nutriente essencial. As avaliações conduzidas neste estudo — contemplando a produtividade de grãos, biomassa aérea e radicular, acúmulo de P nos tecidos, arquitetura do sistema radicular e densidade de pelos radiculares — oferecem subsídios para a identificação de genótipos superiores em eficiência no uso do fósforo. Tais informações são fundamentais para o incremento da produtividade em solos com baixa disponibilidade de P, ao mesmo tempo em que minimizam os impactos ambientais decorrentes do uso excessivo de fertilizantes fosfatados. Os genótipos eficientes identificados poderão ainda ser utilizados como genitores em programas de melhoramento, contribuindo para o desenvolvimento de cultivares adaptadas a condições de baixa fertilidade, com menor custo de produção. Os resultados obtidos reforçam o papel da ciência na promoção de uma agricultura mais sustentável, resiliente e comprometida com a conservação dos recursos naturais.

## **Potential impact of this research**

The adoption of strategies that reconcile high productivity with reduced reliance on fertilizers is aligned with the United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs), particularly those targeting hunger eradication, food security, and the promotion of sustainable agriculture. In this context, soybean breeding aimed at selecting genotypes with greater efficiency in phosphorus (P) uptake and utilization represents a viable approach to address the challenges posed by low P availability in soils. This contributes to more efficient fertilizer use and supports environmentally sustainable agricultural production. In this study, traits such as grain yield, shoot and root dry matter, phosphorus accumulation in plant tissues, root system architecture, and root hair density were evaluated to identify genotypes with superior phosphorus use efficiency. This understanding is essential not only for increasing productivity in low-fertility soils but also for reducing the environmental impact associated with excessive use of phosphate fertilizers. Moreover, the efficient genotypes identified herein may serve as parents in breeding programs focused on developing cultivars adapted to low-phosphorus conditions, promoting lower production costs and greater sustainability. Thus, the findings of this research offer direct benefits to society by contributing to the conservation of natural resources and strengthening sustainable agriculture in Brazil and other key agricultural regions worldwide.


## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: EFICIÊNCIA DO USO DO FÓSFORO ASSOCIADA A CARACTERES AGRONÔMICOS E RADICULARES EM GENÓTIPOS DE SOJA


**AUTORA: ALYCE CARLA RODRIGUES MOITINHO**

**ORIENTADORA: SANDRA HELENA UNÊDA TREVISOLI**


Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 SANDRA HELENA UNEDA TREVISOLI  
Data: 22/04/2025 14:54:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Profa. Dra. SANDRA HELENA UNÊDA TREVISOLI (Participação Presencial)  
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente  
 GLAUCO VIEIRA MIRANDA  
Data: 09/04/2025 06:49:32-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GLAUCO VIEIRA MIRANDA (Participação Virtual)  
Departamento de Agronomia / Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Santa Helena/PR

Documento assinado digitalmente  
 MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ  
Data: 22/04/2025 09:22:18-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ (Participação Presencial)  
Departamento de Ciência do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente  
 EVERTON LUIS FINOTO  
Data: 10/04/2025 19:39:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador Dr. EVERTON LUIS FINOTO (Participação Presencial)  
APTA - Polo Regional do Centro Norte / Pindorama/SP



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RINALDO CESAR DE PAULA  
Data: 22/04/2025 13:49:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RINALDO CESAR DE PAULA (Participação Presencial)  
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 08 de abril de 2025

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

ALYCE CARLA RODRIGUES MOITINHO – Nascida em 23 de abril de 1997, na cidade de Conceição da Barra, Espírito Santo. Ingressou em fevereiro de 2015 na Faculdade Pitágoras de Linhares – Linhares - ES, no curso de Ciências Biológicas – Bacharelado, graduando-se em janeiro de 2019. Durante a graduação, foi bolsista do Edital FAPES Nº 014/2014 do Programa de Iniciação Científica Júnior (Pesquisador do Futuro), atuando como monitora no Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER). Participou do projeto “Avaliação do desenvolvimento inicial de fruteiras (cultura da manga ‘Ubá’ e mamão Formosa cv. Rubi)” nos anos de 2015 a 2017. Posteriormente, de 2017 a 2018, foi bolsista de Iniciação Científica e Tecnológica (ICT) pelo Edital FAPES/SEAG Nº 06/2015 – PPE Agropecuária, contribuindo para o projeto “Avaliação do segundo ciclo de seleção recorrente do mamoeiro ‘RUBI INCAPER 511’ para melhor qualidade de frutos”. Em março de 2019, iniciou o curso de Mestrado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas) na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP/FCAV), Câmpus de Jaboticabal, SP. Durante o mestrado, foi bolsista CAPES sob a orientação da Profa. Dra. Sandra Helena Unêda-Trevisoli, desenvolvendo pesquisa intitulada “Seleção de genótipos de soja oriundos do cruzamento de genitores do tipo grão x tipo alimento”, concluindo o curso em fevereiro de 2021. Em março de 2021, ingressou no curso de Doutorado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), na mesma instituição (UNESP/FCAV), sob orientação da Profa. Dra. Sandra Helena Unêda-Trevisoli, sendo bolsista CAPES, período em que desenvolveu a pesquisa “Eficiência do uso do fósforo associado a caracteres agrônômicos e radiculares em genótipos de soja”, pertencente ao Programa de Melhoramento de Soja da UNESP/FCAV.

*“No fundo, todos temos necessidade de dizer quem somos e o que é que estamos a fazer e a necessidade de deixar algo feito, porque esta vida não é eterna e deixar coisas feitas pode ser uma forma de eternidade.”*

(José Saramago)

Dedico aos meus pais, Maria Stela e Carlos Alberto (*in memoriam*), que sempre me apoiaram a correr atrás dos meus sonhos, com todo o meu amor e gratidão.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, por me iluminar, pela oportunidade de concluir mais esta etapa e por ter me guiado às escolhas certas.

Aos meus pais, Maria Stela e Carlos Alberto (*In Memoriam*), que sempre se esforçaram, me incentivaram e apoiaram nos estudos e em todas as minhas escolhas. Se hoje eu estou aqui é graças a vocês e por vocês.

Ao meu irmão Carlos Eduardo, e que eu possa ser um bom exemplo para ele nos estudos.

À minha família (Rodrigues e Moitinho), por confiarem e acreditarem na minha capacidade.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Câmpus de Jaboticabal, pelos professores e funcionários, pela estrutura disponibilizada, pelas oportunidades oferecidas e pelos anos de acolhimento.

À Profa. Dra. Sandra Helena Unêda-Trevisoli pela amizade, confiança, oportunidade, dedicação, ensinamentos e tempo dedicado para a conclusão deste trabalho, durante todos esses anos.

À professora Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz pelos ensinamentos, paciência e por sempre estar disposta em ensinar.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas) da UNESP/FCAV, por compartilharem seus conhecimentos.

Aos amigos do Laboratório de Biotecnologia e Melhoramento de Plantas da UNESP/FCAV, que sempre estiveram presentes e que me auxiliaram durante a condução desse trabalho: Dardânia, Jardel, Márcio Mandrá, Matheus, Ery, Laura, Davi e Thayná; aos estagiários que passaram pelo departamento, serei eternamente grata pela ajuda e por todos os dias de convivência e momentos de troca.

Ao funcionário do Departamento de Produção Vegetal - Faro pela ajuda na condução dos experimentos em casa de vegetação.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão, minha eterna gratidão pelo empenho e auxílio na execução dos experimentos em campo.

Agradeço imensamente à República Santa Casa pelo acolhimento e amizade durante esses 6 anos. Vocês foram meu ponto de apoio e minha família aqui em Jaboticabal. Graças a essa convivência, estou concluindo essa etapa com muito mais força e gratidão. Vocês fazem parte de todo esse processo! Muito obrigada, meninas!

A todos os amigos que fiz ao longo do curso e que levarei para a vida, minha sincera gratidão por cada momento de companheirismo, aprendizado e partilha.

Aos membros da banca examinadora pela disponibilidade e contribuição neste trabalho.

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho fosse realizado, expresso a minha gratidão.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

O meu muito obrigada,  
vocês são parte disso!

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais .....	1
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Importância do fósforo na cultura da soja .....	3
2.2 Mecanismos que Regulam a Eficiência no Uso do Fósforo e sua Aplicação no Melhoramento de Plantas .....	4
2.3 Arquitetura radicular e eficiência do uso de fósforo .....	7
2.4. Eficiência do uso de fósforo (PUE) .....	9
2.5 Análises multivariadas no melhoramento de plantas .....	12
2.5.1 K-means .....	13
2.5.2 Análise de Componentes Principais (PCA).....	13
2.5.3 Integração de Técnicas Multivariadas no Melhoramento .....	13
3. REFERÊNCIAS .....	14
CAPÍTULO 2 – Seleção de genótipos de soja para eficiência e resposta à absorção de fósforo .....	22
1 INTRODUÇÃO .....	23
2 MATERIAL E MÉTODOS .....	24
2.1 Material vegetal e condução experimental.....	24
2.2 Avaliações de eficiência nutricional e de componentes primários da produtividade .....	26
2.3 Análises Estatísticas .....	28
3 RESULTADOS.....	29
4 DISCUSSÃO .....	50
5 CONCLUSÕES .....	60
REFERÊNCIAS.....	61
CAPÍTULO 3 – Seleção de Genótipos de Soja para eficiência e resposta à absorção de Fósforo utilizando características radiculares.....	65
1. INTRODUÇÃO .....	66
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	68
2.1 Fenotipagem da arquitetura do sistema radicular .....	68

2.2 Fenotipagem da densidade dos pelos radiculares.....	69
2.3 Análises Estatísticas.....	71
3. RESULTADOS.....	71
4 DISCUSSÃO .....	79
5 CONCLUSÕES .....	84
6. REFERÊNCIAS.....	85
CAPÍTULO 4 – Considerações finais .....	88

## EFICIÊNCIA DO USO DO FÓSFORO ASSOCIADA A CARACTERES AGRONÔMICOS E RADICULARES EM GENÓTIPOS DE SOJA

**RESUMO** – O fósforo (P) é um macronutriente finito e de baixa mobilidade no solo, o que limita a produtividade das plantas, especialmente em regiões com solos deficientes nesse nutriente. A eficiência na absorção de P é fundamental para a sustentabilidade agrícola, pois permite reduzir o uso de fertilizantes sem comprometer a produtividade das culturas. O objetivo do presente estudo consistiu em caracterizar genótipos de soja quanto à eficiência de absorção de P, com base em caracteres agronômicos e radiculares. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, utilizando 10 genótipos de soja, submetidos a três doses de P (P0, P60 e P120 mg dm<sup>-3</sup>). Foram realizadas avaliações de eficiência nutricional e dos componentes primários da produtividade nas plantas, relacionadas à arquitetura radicular e densidade de pelos radiculares. Após a obtenção dos dados, foram realizadas análises univariadas e multivariadas. A análise da eficiência de uso de P foi baseada nos índices de matéria seca da raiz (MSR) e na razão entre a produção máxima e mínima de MSR. Os resultados indicaram variabilidade significativa entre os genótipos quanto à eficiência de absorção e utilização de P. O genótipo IAC-6 se destacou, apresentando as maiores médias para produção de matéria seca da parte aérea (24,3 g), produção de matéria seca da raiz (5,1 g) e para acúmulo de P, com média de 7,9 mg/planta na raiz e 30,9 mg/planta na parte aérea, demonstrando maior eficiência em condições de baixa disponibilidade de P. Os genótipos IAC-6, IAC-5 e IAC-1 foram classificados como eficientes e responsivos, com IAC-5 e IAC-6 apresentando também alta eficiência de utilização de P. Além disso, o genótipo IAC-6 obteve densidade de pelos radiculares 27,03% maior do que o genótipo IAC-1, que apresentou a menor densidade de pelos radiculares, destacando a importância da arquitetura radicular na aquisição eficiente de nutrientes e corroborando com sua elevada capacidade de absorção de fósforo. Este estudo contribui para o melhoramento genético da soja, indicando que genótipos com maior eficiência na absorção de P e arquitetura radicular aprimorada podem ser utilizados como genitores na síntese de populações segregantes, pois apresentam herdabilidades acima de 0,70 para os caracteres de eficiência nutricional e dos componentes primários da produtividade, relacionadas à arquitetura radicular e densidade de pelos radiculares. Dessa forma, tais genótipos poderão ser utilizados como genitores na formação de populações que visam o desenvolvimento de cultivares mais produtivas e sustentáveis, especialmente para solos pobres em fósforo, como aqueles encontrados em zonas tropicais.

**Palavras-chave:** *Glycine max*, arquitetura radicular, densidade de pelos, eficiência de absorção de fósforo, solos tropicais, sustentabilidade agrícola.

## PHOSPHORUS USE EFFICIENCY ASSOCIATED WITH AGRONOMIC AND ROOT TRAITS IN SOYBEAN GENOTYPES

**ABSTRACT** – Phosphorus (P) is a macronutrient that is finite and exhibits low mobility in the soil, limiting plant productivity, particularly in regions with phosphorus-deficient soils. Efficiency in phosphorus uptake is crucial for agricultural sustainability, as it enables the reduction of fertilizer use without compromising crop productivity. This study aimed to characterize soybean genotypes regarding phosphorus uptake efficiency based on agronomic and root traits. Experiments were conducted in a greenhouse using 10 soybean genotypes subjected to three phosphorus doses (P0, P60, and P120 mg dm<sup>-3</sup>). Nutritional efficiency and primary productivity components were evaluated, focusing on root architecture and root hair density. Following data collection, univariate and multivariate analyses were performed. Phosphorus use efficiency was assessed based on root dry matter (RDM) indices and the ratio between maximum and minimum RDM production. Results revealed significant variability among genotypes in phosphorus uptake and utilization efficiency. The genotype IAC-6 stood out, exhibiting the highest averages for shoot dry matter production (24.3 g), root dry matter production (5.1 g), and phosphorus accumulation, with means of 7.9 mg/plant in the roots and 30.9 mg/plant in the shoots, demonstrating greater efficiency under low phosphorus availability. The genotypes IAC-6, IAC-5, and IAC-1 were classified as efficient and responsive, with IAC-5 and IAC-6 also showing high phosphorus use efficiency. Moreover, IAC-6 presented a root hair density 27.03% greater than that of IAC-1, which had the lowest density, underscoring the importance of root architecture in efficient nutrient acquisition and corroborating its superior phosphorus uptake capacity. This study contributes to soybean breeding by indicating that genotypes with enhanced phosphorus uptake efficiency and root architecture can be used as parents in the synthesis of segregating populations, as they present heritabilities above 0.70 for the traits of nutritional efficiency and primary components of productivity, related to root architecture and root hair density. Thus, such genotypes can be used as parents in the formation of populations that aim at the development of more productive and sustainable cultivars, especially for soils poor in phosphorus, such as those found in tropical areas.

**Keywords:** *Glycine max*, root architecture, root hair density, phosphorus uptake efficiency, tropical soils, agricultural sustainability.

## **CAPÍTULO 1 – Considerações gerais**

### **1 INTRODUÇÃO**

O fósforo (P) é um macronutriente finito e limitado na agricultura mundial (Salim et al., 2023).

A forma disponível de fósforo para as plantas, o fosfato inorgânico (Pi), é geralmente imóvel no solo e apresenta baixa disponibilidade. Essa deficiência é uma das principais limitações ao crescimento e à produtividade das plantas, especialmente em culturas de alta demanda pelo nutriente, como a soja, que é sensível ao estresse causado pela escassez de P (Chen et al., 2023).

Além de ser importante para o crescimento e produtividade vegetal, o fósforo desempenha diversas funções em processos metabólicos, como a aquisição, armazenamento e utilização de energia, além de regular atividades enzimáticas que afetam diretamente a produtividade final das culturas (Yang et al., 2020; Zhao et al., 2021; Salim et al., 2023).

A eficiência na absorção de nutrientes pelas plantas é influenciada, principalmente, pela arquitetura das raízes, que favorece a exploração do solo. Mecanismos de alteração morfológica, como adaptações na estrutura das raízes, são algumas das estratégias para aumentar a aquisição de nutrientes principalmente em condições de deficiência, possibilitando uma captação mais eficaz do Pi do solo. Essas modificações são cruciais para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis e ecologicamente responsáveis (Li et al., 2016; Bello, 2021; Chen et al., 2023).

A utilização de P apresenta desafios, pois ele é um recurso não renovável com alta taxa de fixação. Sendo assim, desenvolver estratégias para aumentar a eficiência de aquisição de fósforo na agricultura. Em resposta à baixa disponibilidade de P, as plantas evoluíram em alguns mecanismos fisiológicos e moleculares que promovem adaptações na morfologia e na arquitetura das raízes, favorecendo a absorção desse nutriente. Além disso, a manipulação genética visando aprimorar a eficiência de

aquisição de P tornou-se prioridade para alcançar práticas agrícolas mais sustentáveis. Além disso, os mecanismos moleculares envolvidos na absorção de fósforo são prioridade para o aprimoramento de cultivares mais eficientes em seu uso (Guo et al., 2022; An et al., 2023; Khan et al., 2023).

A distribuição e a arquitetura radicular com aspectos incluindo alta biomassa, maior comprimento específico de raiz e volume radicular, permitem que as plantas explorem um volume de solo mais amplo, otimizando assim a absorção de P. Tais características são cruciais para a eficiência na captação de nutrientes (Abebe et al., 2023; Zhou et al., 2016).

A plasticidade fenotípica das raízes — a capacidade de se adaptar às condições ambientais — foi proposta como um alvo para o desenvolvimento de cultivares mais produtivas e resilientes em ambientes variáveis. No entanto, a complexidade das respostas anatômicas e arquitetônicas das raízes a sinais ambientais ainda não é completamente compreendida, e suas implicações para a aptidão e desempenho das plantas permanecem incertas (Schneider e Lynch, 2020).

Embora características radiculares que contribuem para a produtividade tenham sido identificadas na soja, o papel dessas características no incremento da produtividade de grãos ainda não foi totalmente explorado (Abebe et al., 2023).

Além disso, pouco se sabe sobre as respostas da morfologia agronômica e radicular, assim como os mecanismos fisiológicos de genótipos contrastantes de soja em diferentes estádios de desenvolvimento e os possíveis efeitos da variação de P no rendimento e nos componentes do rendimento da soja (Salim et al., 2023).

O estudo da tolerância à deficiência de P, assim como a eficiência de absorção e utilização desse nutriente, é uma área ainda pouco explorada na cultura da soja em solos tropicais do Brasil com baixa disponibilidade do nutriente. Mediante o exposto, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar genótipos de soja quanto à eficiência de absorção de P, por meio de caracteres agronômicos e radiculares.

## **5 CONCLUSÕES**

Os resultados evidenciam ampla variabilidade entre os genótipos de soja quanto à arquitetura do sistema radicular e à densidade de pelos radiculares, com elevada herdabilidade para os caracteres estruturais das raízes. Genótipos como IAC-5, IAC-6, IAC-4 e TMG1179RR reúnem características desejáveis para exploração eficiente do solo e absorção de fósforo, destacando-se como potenciais genitores para programas de melhoramento voltados à seleção de plantas adaptadas a solos de baixa fertilidade, com foco na eficiência de absorção via sistema radicular.

Esses genótipos representam potenciais genitores para programas de melhoramento genético, especialmente em esquemas de cruzamento dialélico, visando o desenvolvimento de cultivares superiores quanto exploração do solo e ao uso eficiente de fósforo. A utilização de tais genótipos pode contribuir significativamente para a geração de cultivares adaptadas a ambientes com diferentes níveis de disponibilidade desse nutriente, promovendo maior eficiência agrônômica e sustentabilidade nos sistemas de produção de soja.

## 6. REFERÊNCIAS

- Adem, G. D., Ueda, Y., Hayes, P. E., Wissuwa, M. (2020). Genetic and physiological traits for internal phosphorus utilization efficiency in rice. **PLOS ONE** 15(11): e0241842. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241842>
- Bello, S.K. (2021). An Overview of the Morphological, Genetic and Metabolic Mechanisms Regulating Phosphorus Efficiency Via Root Traits in Soybean. **J Soil Sci Plant Nutr** 21, 1013–1029. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00418-y>
- Chandnani, R.; Qin, T.; Ye, H.; Hu, H.; Panjvani, K.; Tokizawa, M.; Mora Macias, J.; Armenta Medina, A.; Bernardino, K. C.; Pradier, P.-L.; Banik, P.; Mooney, A.; Magalhaes, J. V.; Nguyen, H. T.; Kochian, L. V. (2023). Application of an Improved 2-Dimensional High-Throughput Soybean Root Phenotyping Platform to Identify Novel Genetic Variants Regulating Root Architecture Traits. **Plant Phenomics**.5:0097.DOI:10.34133/plantphenomics.0097
- Falk, K. G., Jubery, T. Z., Mirnezami, S. V., Parmley, K. A., Sarkar, S., Singh, A., et al. (2020). Computer vision and machine learning enabled soybean root phenotyping pipeline. **Plant Methods** 16:5. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0550-5>
- Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M. and Zhao, C. (2023). Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. **Plants**. <https://doi.org/10.3390/plants12152861>
- Kim K-S, Kim S-H, Kim J, Tripathi P, Lee J-D, Chung YS and Kim Y (2021) A Large Root Phenome Dataset Wide-Opened the Potential for Underground Breeding in Soybean. **Frontiers in Plant Science**. 12:704239. doi: 10.3389/fpls.2021.704239
- Liu, D. (2021). Root developmental responses to phosphorus nutrition. **Journal of Integrative Plant Biology**. <https://doi.org/10.1111/jipb.13090>
- Liu, S., Begum, N., An, T., Zhao, T., Xu, B., Zhang, S., Deng, X., Lam, H.-M., Nguyen, H.T., Siddique, K. H. M. and Chen, Y. (2021). Characterization of Root System Architecture Traits in Diverse Soybean Genotypes Using a Semi-Hydroponic System. **Plants**. <https://doi.org/10.3390/plants10122781>

Lynch, J. P. (2011). Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: Tools for future crops. *Plant Physiology*. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175414>

Noh, E., Fallen, B., Payero, J. e Narayanan, S. (2022) Parsimonious root systems and better root distribution can improve biomass production and yield of soybean. *PLoS ONE* 17(6): e0270109. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270109>

Pace, J., Lee, N., Naik, H. S., Ganapathysubramanian, B. and Lübberstedt, T. (2014). Analysis of Maize (*Zea mays* L.) Seedling Roots with the High-Throughput Image Analysis Tool ARIA (Automatic Root Image Analysis). *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108255>

Ruiz, S., Koebernick, N., Duncan, S., McKay Fletcher, D., Scotson, C., Boghi, A., Marinho, S., Bengough, P. G., George, T. S., Marrom, L. K., Hallett, P. D., & Roose, T. Significance of root hairs at the field scale – modelling root water and phosphorus uptake under different field conditions. *Plant Soil*. **447**, 281–304 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04308-2>

Salim, M.; Chen, Y.; Ye, H.; Nguyen, H.T.; Solaiman, Z.M.; Siddique, K.H.M. (2022). Screening of Soybean Genotypes Based on Root Morphology and Shoot Traits Using the Semi-Hydroponic Phenotyping Platform and Rhizobox. *Technique Agronomy*. **12**, 56. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010056>

Seck, W., Torkamaneh, D. and Belzile, F. (2020) Comprehensive Genome-Wide Association Analysis Reveals the Genetic Basis of Root System Architecture in Soybean. *Frontiers in Plant Science*. 11:590740. doi: 10.3389/fpls.2020.590740

Schneider, H. M., Lynch, J. P. (2020). Should Root Plasticity Be a Crop Breeding Target? *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00546>

Wang, L., Li, X., Mang, M., Ludewig, U., Shen, J. (2021). Heterogeneous nutrient supply promotes maize growth and phosphorus acquisition: additive and compensatory effects of lateral roots and root hairs . *Annals of Botany*. doi: 10.1093/aob/mcab097. PMID: 34309655; PMCID: PMC8414595.

Wang, H. Y., Guo, Y., Wang, L. e Yang, M. D. (2024). The genetics of root architecture in legumes: implications for nutrient uptake efficiency. **Legume Genomics and Genetics**. 15(2): 82-92 doi:10.5376/lgg.2024.15.0010

Zhu S, Luo L, Zhang X, Zhao M, Wang X, Zhang J, Wan Q, Li X, Wan Y, Zhang K and Liu F (2022) Study on the Relationship of Root Morphology and Phosphorus Absorption Efficiency With Phosphorus Uptake Capacity in 235 Peanut (*Arachis hypogaea* L.) Germplasms. **Frontiers in Environmental Science**. 10:855815. doi: 10.3389/fenvs.2022.855815