

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 06/03/2027

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until March 6, 2027

CARLA NADIELE ALVES DE OLIVEIRA

**INTERAÇÃO RAIZ X MICRORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO
PARA O USO EFICIENTE DE FÓSFORO NO CULTIVO DO FEIJOEIRO-COMUM**
(Phaseolus vulgaris)

Botucatu

2025

CARLA NADIELE ALVES DE OLIVEIRA

**INTERAÇÃO RAIZ X MICRORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO
PARA O USO EFICIENTE DE FÓSFORO NO CULTIVO DO FEIJOEIRO-COMUM**
(Phaseolus vulgaris)

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Leonardo Theodoro Büll

Coorientador: João de Andrade Bonetti

Botucatu

2025

O48i

Oliveira, Carla Nadiele Alves de

Interação raiz X microrganismos solubilizadores de fosfato para o uso eficiente de fósforo no cultivo do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris*) / Carla Nadiele Alves de Oliveira. -- Botucatu, 2025

72 p. : tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Leonardo Theodoro Büll

Coorientador: João de Andrade Bonetti

1. Bactérias solubilizadoras de fosfatos. 2. Fracionamento de P. 3. Sistema radicular. 4. Solo tropical. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: INTERAÇÃO RAIZ X MICRORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO PARA O USO EFICIENTE DE FÓSFORO NO CULTIVO DO FEIJOEIRO COMUM (*Phaseolus vulgaris*)

AUTORA: CARLA NADIELE ALVES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: LEONARDO THEODORO BÜLL

COORDENADOR: JOÃO DE ANDRADE BONETTI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Agricultura), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOÃO DE ANDRADE BONETTI (Participação Presencial)
Departamento de Ciência Florestal Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu
UNESP



Pesquisadora Dr.ª ROSEMARY MARQUES DE ALMEIDA BERTANI (Participação Presencial)
Pesquisa e Desenvolvimento / Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios



Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES (Participação Presencial)
Departamento de Ciência Florestal Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu
UNESP

Botucatu, 06 de março de 2025

À Maria de Fátima e dona Raimunda (mãe e avó), por todo o amor e apoio durante a vida.

Ao meu amado sobrinho Pedro Daniel (*in
memoriam*),
dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, por todas as bênçãos e por seu infinito amor e misericórdia, que sempre me conduziram no caminho certo.

À Virgem Maria, que sempre me amparou nos momentos difíceis, me guardando sob seu manto.

À minha mãe, Maria de Fátima, e à minha avó, Raimunda Alves, por me criarem com todo amor, dedicação e trabalho duro, para que nada faltasse para mim e meus irmãos.

Aos meus amados irmãos, Nauara, Neilton, Naele e, especialmente, meu irmão Jorge Arley, pelo apoio e pelas risadas, que mesmo à distância não permitiu que eu sentisse solidão.

Ao meu amado sobrinho, Pedro Daniel (*in memoriam*), que durante 5 anos, 11 meses e 1 dia alegrou a vida de todos à sua volta, sendo minha sustentação em vários momentos, e hoje é o anjo de luz que me guia.

Ao meu amado namorado, Gabriel Dias, que sempre vibra a cada conquista minha, me consola nos momentos difíceis e que sempre me ofertou palavras positivas durante esse percurso, se tornando o meu “lar” enquanto estou há mais de dois mil km de casa.

À minha melhor amiga Flávia, que mesmo longe continua apoiando minhas ideias e projetos de trabalho, sempre me dando ânimo e não me deixando desistir.

À minha amiga Érica Souza, com quem dividi moradia nesses 2 anos, compartilhando momentos de alegria e conselhos para a vida.

Aos amigos que a UNESP me deu: Ana Paula, Oziel, Lucas, Olavo e Cristiano. Obrigada pela parceria nos trabalhos e pelos momentos de descontração.

Agradeço ao meu orientador, Professor Leonardo Büll, por me apresentar e me receber em seu grupo de pesquisa SisPLANT. Também sou grata por seu apoio, paciência, confiança e oportunidades, que ajudaram a tornar este trabalho possível. Enfatizo que levarei seus ensinamentos como pontos de referência para minha vida pessoal e profissional.

Ao meu coorientador, Professor João Bonetti, pelo apoio e por suas valiosas contribuições, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Grupo de Pesquisa Silício no Sistema Solo-Planta (SisPLANT), que foi base para a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” / Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP/FCA), que durante 2 anos foi minha segunda casa, onde tive a oportunidade de conhecer pessoas excelentes, crescer como ser humano, além de me desenvolver como profissional com a colaboração dos demais discentes, docentes e técnicos.

Aos docentes da UNESP/FCA, em especial aos que fazem parte do Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente, pelos conhecimentos repassados durante os 24 meses de Mestrado.

À coordenação e aos trabalhadores da fazenda “Santa Fé – Agropecuária” pelo auxílio durante as atividades e por disponibilizar sua propriedade para a condução do experimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES – Código de financiamento 001.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Vinde a mim, todos os que estais cansados e carregados de fardos, e eu vos darei descanso. Tomai sobre vós o meu jugo e aprendei de mim, porque sou manso e humilde de coração, e encontrareis descanso para vós, pois o meu jugo é suave e o meu fardo é leve”

Mateus 11:28-30

RESUMO

A atividade de microrganismos solubilizadores de fosfato na rizosfera pode aumentar a disponibilidade de fósforo para as plantas, podendo influenciar no seu desenvolvimento radicular. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de doses de P e de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF) sobre o desenvolvimento radicular do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris*). O experimento foi conduzido em campo, no município de Pardinho-SP, em esquema fatorial 3x3, sendo três inoculações de BSF (sem BSF; com BSF; e BSF+M (microrganismos fixadores de N)) e três doses de P (0%; 50%; e 100% da dose recomenda de P), com quatro repetições. Coletou-se amostras de raízes de 2 plantas por parcela nos estádios V₄ e R₆, que foram lavadas com água corrente e em seguida, digitalizadas no *Scanner WinRhizo*, determinando-se: i) comprimento da raiz (cm); ii) área de superfície de raiz (cm²); iii) diâmetro médio de raiz (mm); iv) volume de raiz (cm³); v) densidade de raízes (c/cm³). Adicionalmente foi quantificado o número de nódulos radiculares e determinou-se a massa seca de raízes e nódulos. Realizou-se análise de fracionamento de P no solo, no qual quantificou-se as formas de P-lábil, P-moderadamente lábil, P_{ocluso}, P_{sorção}, P_{total} e P_{Legado}. Por fim, realizou-se análise de produtividade da cultura. Os resultados obtidos foram submetidos à ANOVA e ao teste Tukey, a 5% de probabilidade. As inoculações com BSF influenciaram na maioria das variáveis de desenvolvimento radicular e promoveram aumento na produtividade do feijoeiro-comum, ao contrário da adubação fosfatada. A nodulação e massa dos nódulos aumentaram com a inoculação com BSF. O P_{Total} aumentou com a adição de bactérias solubilizadoras de fosfatos e com microrganismos fixadores de N (BSF+M) no sulco de semeadura do feijão. A inoculação com BSF+M, bem como com a adição de 100% de P₂O₅, aumentaram o teor de P lábil do solo. A inoculação com BSF e 50% da fertilização fosfatada aumentou as frações que compõem o P moderadamente lábil. A sorção de P aumentou com a adição de P₂O₅, o P ocluso não sofreu influência dos fatores da pesquisa, mas o legado de P aumentou com as dosagens de P e as inoculações bacterianas. Assim sendo, conclui-se que o uso das BSF foi benéfico para a produção do feijoeiro-comum, pois as bactérias promoveram aumento na produtividade e mudanças na arquitetura radicular, sob as condições edafoclimáticas em que o experimento foi realizado.

Palavras-chave: bactérias solubilizadoras de fosfatos; fracionamento de P; sistema radicular; solo tropical.

ABSTRACT

The activity of phosphate-solubilizing microorganisms in the rhizosphere can increase phosphorus availability to plants, potentially influencing their root development. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of applying different P rates and phosphate-solubilizing bacteria (PSB) on the root development of common bean (*Phaseolus vulgaris*). The field experiment was conducted in the municipality of Pardinho-SP, using a 3x3 factorial design with three PSB inoculation treatments (no PSB; PSB; and PSB+N-fixing microorganisms) and three P rates (0%, 50%, and 100% of the recommended P rate), with four replications. Root samples from 2 plants per plot were collected at the V4 and R6 growth stages, washed with running water, and then scanned using the WinRhizo Scanner to determine: i) root length (cm); ii) root surface area (cm²); iii) average root diameter (mm); iv) root volume (cm³); and v) root density (cm/cm³). Additionally, the number of root nodules was quantified and the dry mass of roots and nodules was determined. Soil phosphorus fractionation analysis was performed to quantify the labile P, moderately labile P, occluded P, sorbed P, total P, and legacy P fractions. Finally, crop yield analysis was carried out. The results were subjected to ANOVA and Tukey's test at a 5% significance level. PSB inoculations influenced most of the root development variables and promoted an increase in common bean yield, unlike phosphate fertilization. Nodule formation and nodule dry mass increased with PSB inoculation. Total P content increased with the addition of phosphate-solubilizing bacteria and nitrogen-fixing microorganisms (PSB+N) in the planting furrow. Inoculation with PSB+N, as well as the application of 100% P₂O₅, increased the labile P content in the soil. Inoculation with PSB and 50% of the phosphate fertilizer dose increased the moderately labile P fractions. P sorption increased with P₂O₅ addition; occluded P was not influenced by the experimental factors, but legacy P increased with P rates and bacterial inoculations. Therefore, it is concluded that the use of PSB was beneficial for common bean production, as the bacteria promoted yield increases and changes in root architecture under the edaphoclimatic conditions of the experiment.

Keywords: phosphate-solubilizing bacteria; P fractionation; root system; tropical soil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa representando a localização da área experimental na fazenda. Ao lado destaca-se a cidade de Pardinho no mapa de São Paulo, o Estado de São Paulo no mapa do Brasil e o Brasil no mapa da América do Sul.....	29
Figura 2 - Temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima e precipitação na área experimental durante o período de fevereiro a junho de 2024.....	30
Figura 3 – Ajuste da Isoterma de Langmuir para a medida de CMAP do solo da área experimental.....	33
Figura 4 – Esquema geral da área experimental.....	34
Figura 5 - Semeadura mecanizada do feijão no dia 26/02/2024.....	36
Figura 6 - Coleta das raízes com gabarito de ferro durante o estágio V ₄ do feijoeiro-comum.....	37
Figura 7 – Produtividade da cultura em função das doses de P e BSF.....	42
Figura 8 – Eficiência agrônômica em função das doses de P e BSF.....	43
Figura 9 - Comprimento radicular durante o estágio V ₄ do feijoeiro-comum em função das doses de P e BSF.....	43
Figura 10 - Área superficial radicular, volume radicular e densidade radicular durante o estágio V ₄ do feijoeiro-comum em função das doses de P e BSF.....	44
Figura 11 - Diâmetro médio radicular durante o estágio V ₄ do feijoeiro-comum em função das doses de P e BSF.....	45
Figura 12 - Massa seca da parte aérea, massa seca radicular e razão parte aérea/raiz durante o estágio V ₄ do feijoeiro-comum em função das doses de P e BSF.....	46
Figura 13 - Número de nódulos na raiz e massa seca dos nódulos durante o estágio V ₄ do feijoeiro-comum em função das doses de P e BSF.....	47
Figura 14 - Comprimento radicular, área superficial radicular e volume radicular durante o estágio R ₆ do feijoeiro-comum em função das doses de P e BSF.....	48
Figura 15 - Diâmetro médio radicular e densidade radicular durante o estágio R ₆ do feijoeiro-comum em função das doses de P e BSF.....	49

Figura 16 - Massa seca da parte aérea, massa seca radicular e razão parte aérea/raiz durante o estágio R ₆ do feijoeiro-comum em função das doses de P e BSF.....	50
Figura 17 - Número de nódulos na raiz e massa seca dos nódulos durante o estágio R ₆ do feijoeiro-comum em função das doses de P e BSF.....	51
Figura 18 - Teor de fósforo total (P _{Total}) no solo em função das doses de P e BSF.....	52
Figura 19 - Teor de fósforo disponível (P _{M3}) no solo em função das doses de P e BSF.....	53
Figura 20 - Teor de fósforo inorgânico (P _{iOH}) no solo em função das doses de P e BSF.....	53
Figura 21 - Teor de fósforo orgânico (P _{oOH}) no solo em função das doses de P e BSF	54
Figura 22 - Teor de P _{Ca} (P _{HCl}) no solo em função das doses de P e BSF.....	55
Figura 23 - Teor de fósforo ocluído (P _{OCL}) no solo em função das doses de P e BSF....	55
Figura 24 - Teor de sorção de P (P _{SOR}) no solo em função das doses de P e BSF.....	56
Figura 25 - Legado de fósforo (P _{Legado}) no solo em função das doses de P e BSF.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição granulométrica e textura do solo da área experimental.....	31
Tabela 2 - Caracterização química do solo da área experimental, na profundidade de 0-20 cm, antes da instalação do experimento.....	31
Tabela 3 – Equação linear da Isoterma de Langmuir, sua contante e teor de argila do solo da área experimental.....	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1	Feijoeiro-comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	23
2.2	Importância do fósforo (P) na agricultura.....	24
2.3	Microrganismos solubilizadores de fosfato (MSF).....	26
2.4	Interação raiz X microrganismos solubilizadores de fosfato (MSF)...	27
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1	Localização e caracterização edafoclimática da área experimental...	29
3.2	Delineamento experimental e tratamentos.....	34
3.3	Caracterização da cultivar utilizada.....	35
3.4	Implantação e condução do experimento.....	35
3.5	Avaliações.....	37
3.5.1	Avaliações realizadas nos estádios V₄ e R₆.....	37
3.5.2	Análise de fracionamento químico de P.....	38
3.5.3	Produtividade de grãos.....	41
3.5.4	Eficiência agronômica (EA).....	41
3.6	Análise estatística.....	41
4	RESULTADOS.....	42
4.1	Avaliações vegetativas.....	42
4.1.1	Produtividade da cultura.....	42
4.1.2	Eficiência agronômica de P₂O₅ e das BSF.....	42
4.1.3	Análises radiculares em diferentes estádios fenológicos.....	43
4.2	Análises de P no solo.....	52
4.2.1	Fracionamento químico de P.....	52
5	DISCUSSÃO.....	58
5.1	Desenvolvimento radicular do feijoeiro-comum.....	58
5.2	Produtividade do feijoeiro-comum e eficiência agronômica das BSF e P₂O₅.....	60
5.3	Teor de P solúvel e P Lábil no solo.....	61
5.4	Teor de P moderadamente lábil no solo.....	61
5.5	Teor de P_{Total}, P_{Sorção}, P_{OCL} e P_{Lgado} no solo.....	62

6	CONCLUSÕES.....	64
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), é uma das principais culturas alimentares produzidas e consumidas em países dos continentes africano, asiático e americano, por ser um alimento rico em proteínas, minerais, vitaminas e carboidratos, contribuindo para a segurança alimentar populacional (Backes; Hemp, 2014; Castro-Guerrero *et al.*, 2016; Mohammed, 2013; Souza; Wander, 2014).

No cenário mundial, o Brasil se destaca como sendo o terceiro maior produtor da cultura, atrás de Myanmar e Índia (FAO, 2024). No último levantamento nacional, a produção brasileira foi de 2.899.864 toneladas, com um rendimento médio de 1 ton/ha⁻¹, com destaque para o Paraná, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e São Paulo, que produziu cerca de 229 mil toneladas, mantendo a média de produção e produtividade desde 2018, apesar da diminuição da área colhida em cerca de 7% no Estado (IBGE, 2023).

No Estado de São Paulo, a produção de feijão-comum encontra condições climáticas favoráveis a seu desenvolvimento, sendo cultivado em três safras no mesmo ano agrícola: safra das águas, safra da seca (safrinha) e safra de inverno (terceira safra), posicionando, assim o Estado entre os principais produtores do país (CONAB, 2023; Fuscaldi; Prado, 2005; Silva; Wander, 2013).

Dentre os fatores que limitam a produção, está o manejo de nutrientes no solo, especialmente o fósforo (P), que é um elemento essencial nos processos metabólicos que afetam significativamente o crescimento e a produtividade das plantas (Khan *et al.*, 2023; Malhotra *et al.*, 2018; Nascente *et al.*, 2014; Pastorini *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2023; Zucareli *et al.*, 2011).

Culturas produzidas em solos com baixo teor de fósforo inorgânico (Pi), apresentam diminuição na taxa de fotossíntese e na condutância estomática (Bechtaoui *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023). Em leguminosas, a deficiência de P compromete a fixação biológica de nitrogênio (FBN) (Liu *et al.*, 2018; Qu *et al.*, 2019).

Devido a fixação desse nutriente às partículas minerais do solo, especialmente em solos ácidos, sua disponibilidade, normalmente, é insuficiente para as plantas, sendo necessário realizar adubações fosfatadas nas áreas agrícolas (Khan *et al.*, 2023; Malhotra *et al.*, 2018; Nascente *et al.*, 2014; Pastorini *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2023; Zucareli *et al.*, 2011).

No Brasil, cerca de 80% dos fertilizantes fontes de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) são importados, tornando o país vulnerável as oscilações do mercado internacional. Os principais fornecedores de adubos e fertilizantes para o Brasil são a Rússia, seguida pela China, Canadá, Marrocos, Belarus, Catar, Estados Unidos, Alemanha e Holanda (Brasil, 2021; CONAB, 2021).

Todavia, intercorre que problemas como a pandemia de Covid-19 e conflitos geopolíticos influenciaram diretamente na aquisição destes fertilizantes (Osaki, 2023). Dessa forma, o uso de bioinsumos aliado às tecnologias de manejo do solo, tornam-se uma estratégia viável para reduzir a dependência brasileira de fertilizantes químicos importados, principalmente dos fertilizantes fosfatados (Brasil, 2021; Pavinato *et al.*, 2020).

A microbiota presente no solo é apontada como uma solução para melhorar a saúde e fertilidade do solo, promovendo o crescimento da planta, sem comprometer o equilíbrio do ecossistema (Rawat *et al.*, 2020). Nesse sentido, menciona-se que os microrganismos solubilizadores de fosfato (MSF) são bactérias ou fungos capazes de quebrar formas insolúveis de P no solo e disponibilizá-lo às plantas como uma forma solúvel que pode ser facilmente absorvida (Silva *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023).

No Brasil, existem alguns inoculantes comerciais para a solubilização de P, podendo citar o *BiomaPhos®*, que contém as cepas *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *B. megaterium* (CNPMS B119), que pode ser utilizado via tratamento de sementes ou aplicado diretamente no sulco de semeadura (Oliveira-Paiva *et al.*, 2020; Oliveira-Paiva *et al.*, 2022; Owen *et al.*, 2015; Viana, 2021). Seu uso é indicado para a produção de milho (*Zea mays*) e já foi validado para uso na soja (*Glycine max*) (Oliveira-Paiva *et al.*, 2021), porém, sua utilização no cultivo de feijoeiro-comum é pouco investigada.

Neste contexto, surgiu a hipótese de que a aplicação de bactérias solubilizadoras de fosfatos pode aumentar o teor de P no solo e promover mudanças na arquitetura radicular do feijoeiro. A constatação desta hipótese seria relevante para o fortalecimento da sustentabilidade dos sistemas de produção de leguminosas em solos tropicais.

Dessa maneira, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da aplicação de doses de P e de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF) sobre o desenvolvimento radicular do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris*), nas condições edafoclimáticas do Estado de São Paulo.

6 CONCLUSÕES

As inoculações com bactérias solubilizadoras de fosfatos (BSF) testadas promoveram aumento na produtividade do feijoeiro-comum. A adubação fosfatada não influenciou na maioria das variáveis de desenvolvimento radicular, enquanto as BSF influenciaram no comprimento, volume, área superficial, diâmetro médio e densidade da raiz no estágio V₄ e no comprimento, volume e área superficial no estágio R₆. A nodulação e massa dos nódulos aumentaram com a inoculação com BSF e as doses de P₂O₅.

O P_{Total} aumentou com a adição de bactérias solubilizadoras de fosfatos e com microrganismos fixadores de N (BSF+M) no sulco de semeadura do feijão. A inoculação com BSF+M, bem como com a adição de 100% de P₂O₅, aumentaram o teor de P lábil do solo. A inoculação com BSF e 50% da fertilização fosfatada aumentou as frações que compõem o P moderadamente lábil. A sorção de P aumentou com a adição de P₂O₅, o P ocluso não sofreu influência dos fatores estudados, mas o legado de P aumentou com as dosagens de P e as inoculações bacterianas.

Assim sendo, conclui-se que o uso das BSF foi benéfica para a produção do feijoeiro-comum, promovendo aumento na produtividade e mudanças na arquitetura radicular, sob as condições edafoclimáticas em que o experimento foi realizado.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, S. Plant–microbe interactions ameliorate phosphate-mediated responses in the rhizosphere: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1074279, 2023.
- ALORI, E. T. *et al.* Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. **Frontiers in microbiology**, v. 8, p. 971, 2017.
- ALVAREZ, V. H. *et al.* Determinação e uso do fósforo remanescente. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2000. p. 27-32 (Boletim Informativo).
- ALVAREZ, V. H. *et al.* Fósforo remanescente. *In*: Teixeira, P. K.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. (Eds.). **Manual de métodos de análise de solos**, Rio de Janeiro, RJ: Embrapa, p. 337-342. 2017.
- AMARH, F. *et al.* Effects of soil depth and characteristics on phosphorus adsorption isotherms of different land utilization types: phosphorus adsorption isotherms of soil. **Soil and Tillage Research**, v. 213, p. 105139, 2021.
- ARAÚJO, F. F. *et al.* *Bacillus subtilis* changes the root architecture of soybean grown on nutrient-poor substrate. **Rhizosphere**, v. 18, p. 100348, 2021.
- ARAÚJO, F. F.; HUNGRIA, M. Nodulação e rendimento de soja co-infectada com *Bacillus subtilis* e *Bradyrhizobium japonicum*/*Bradyrhizobium elkanii*. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 34, p. 1633-1643, 1999.
- BACKES, R. L.; HEMP, S. A soberania do feijão. **Revista Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 27, n. 1, p. 18-20, mar./jun. 2014.
- BARGAZ, A. *et al.* Benefits of phosphate solubilizing bacteria on belowground crop performance for improved crop acquisition of phosphorus. **Microbiological research**, v. 252, p. 126842, 2021.
- BECHTAOUI, N. *et al.* Phosphate-dependent regulation of growth and stresses management in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 679916, 2021.
- BEEBE, S. E. *et al.* Phenotyping common beans for adaptation to drought. **Frontiers in physiology**, v. 4, p. 35, 2013.
- BILLAH, M. *et al.* Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: keys for sustainable agriculture. **Geomicrobiology Journal**, v. 36, n. 10, p. 904-916, 2019.
- BITTENCOURT, C. D. *et al.* Desempenho de inoculante solubilizador de fosfato no crescimento e produção do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). **Embrapa Arroz e Feijão**, 2022. (Anais e Proceedings de eventos).
- BOITT, G. *et al.* Plant biomass management impacts on short-term soil phosphorus dynamics in a temperate grassland. **Biology and fertility of soils**, v. 54, p. 397-409, 2018.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050). **Brasília: SAE**, 2021, 195 p.

CARDOSO, I. M.; KUYPER, T. W. Mycorrhizas and tropical soil fertility. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 116, n. 1-2, p. 72-84, 2006.

CASTRO-GUERRERO, N. A. *et al.* Common bean: a legume model on the rise for unraveling responses and adaptations to iron, zinc, and phosphate deficiencies. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 600, 2016.

CHENG, Y. *et al.* Phosphate-solubilizing bacteria: their agroecological function and optimistic application for enhancing agro-productivity. **Science of The Total Environment**, p. 166468, 2023.

CHIORATO, A. F.; CARBONELL, S. A. M. IAC 2051 e IAC 1849: cultivares de feijão carioca tolerantes ao escurecimento do grão. **O Agrônomo. Boletim técnico-informativo do instituto agrônomo**, v. 73, p. 63-67, 2021.

CHIORATO, A. F. *et al.* IAC 1849 Polaco: carioca common bean cultivar with an early maturity and tolerance to seed darkening. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, 2020.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2021). **Boletim logístico**: ano 5. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercadoagropecuario-e-extrativista/boletimlogistico/item/download/37307_3037108c4e1d127665d9c6ec29b18239. Acesso em: 21 de setembro de 2024.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2023). **Série histórica das safras, Feijão total (1ª, 2ª e 3ª Safras)**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/serie-historica-das-safras?start=20>. Acesso em: 20 jul. 2024.

CONAFER – Confederação Nacional de Agricultores Familiares e Empreendedores Familiares Rurais (2022). **Feijão no prato**: produção supera consumo no país; agricultura familiar é responsável por 42% da produção nacional. Disponível em: <https://conafer.org.br/feijao-no-prato-producao-supera-consumo-no-pais-agricultura-familiar-e-responsavel-por-42-da-producao-nacional/>. Acesso em: 21 agosto 2023.

DARDANELLI, M. S. *et al.* Effect of *Azospirillum brasilense* coinoculated with *Rhizobium* on *Phaseolus vulgaris* flavonoids and Nod factor production under salt stress. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 11, p. 2713-2721, 2008.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v. 6, n. 1, p. 82-85, 1977.

DOILOM, M. *et al.* Screening of phosphate-solubilizing fungi from air and soil in Yunnan, China: four novel species in *Aspergillus*, *Gongronella*, *Penicillium*, and *Talaromyces*. **Frontiers in microbiology**, v. 11, p. 585215, 2020.

ELHAISSOUFI, W. *et al.* Phosphate bacterial solubilization: a key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity. **Journal of Advanced Research**, v. 38, p. 13-28, 2022.

EMAMI, S. *et al.* Effect of rhizospheric and endophytic bacteria with multiple plant growth promoting traits on wheat growth. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 19804-19813, 2019.

FAGERIA, N. K. *et al.* Agronomic evaluation of phosphorus sources in lowland rice production. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 45, n. 15, p. 2067-2091, 2014.

FAGERIA, N. K. *et al.* Nutrição mineral do feijoeiro. Brasília, DF: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2015.

FAO (2024). **Crops and livestock products**. Disponível em: <https://fenix.fao.org/faostat/internal/en/#data>. Acesso em: 19 de setembro 2023.

FERNANDES, A. C. *et al.* Crescimento inicial da parte aérea e do sistema radicular de três cultivares de alfafa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 51-56, 2005.

FERREIRA, L. V. M. *et al.* Co-inoculation of selected nodule endophytic rhizobacterial strains with *Rhizobium tropici* promotes plant growth and controls damping off in common bean. **Pedosphere**, v. 30, n. 1, p. 98-108, 2020.

FREYTAG, G. F.; DEBOUCK D. G. Taxonomy, distribution, and ecology of the genus *Phaseolus* (Leguminosae – Papilionoideae) in North America, Mexico, and Central America. **Botanical Research Institute of Texas (BRIT)**, Fort Worth, TX, USA. 298 p. (Sida, botanical miscellany no. 23).

FUSCALDI, K. C.; PRADO, G. R. Análise econômica da cultura do feijão. **Revista de Política Agrícola**, v. 14, n. 1, p. 17-30, 2005.

GATIBONI, L. C.; CONDRON, L. M. A rapid fractionation method for assessing key soil phosphorus parameters in agroecosystems. **Geoderma**, v. 385, p. 114893, 2021.

GATIBONI, L. C. *et al.* Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 691-699, 2007.

GEPTS, P.; DEBOUCK, D. Origin, domestication, and evolution of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Common beans: research for crop improvement**, p. 7-53, 1991.

GEPTS, P. Origin and evolution of common bean: past events and recent trends. **HortScience**, v. 33, n. 7, p. 1124-1130, 1998.

GOUBRAN, F. H.; RICHARDS, D. The estimation of root length in samples and subsamples. **Plant and Soil**, v. 52, n. 1, p. 77-83, 1979.

HUANG, J. *et al.* Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 159, p. 171-179, 2017.

HUNGRIA, M. *et al.* Co-inoculation of soybeans and common beans with *rhizobia* and *azospirilla*: strategies to improve sustainability. **Biology and fertility of soils**, v. 49, p. 791-801, 2013.

HUNGRIA, M. *et al.* Soybean seed co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense*: a new biotechnological tool to improve yield and sustainability. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, n. 6, p. 811-817, 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023). Produção de feijão. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/feijao/br>. Acesso em: 03 agosto 2024.

KASCHUK, G. *et al.* Coinoculation impact on plant growth promotion: a review and meta-analysis on coinoculation of rhizobia and plant growth-promoting *bacilli* in grain legumes. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 53, n. 4, p. 2027-2037, 2022.

KHAN, F. *et al.* Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. **Plants**, v. 12, n. 15, p. 2861, 2023.

KHAN, N. *et al.* The stimulatory effects of plant growth promoting rhizobacteria and plant growth regulators on wheat physiology grown in sandy soil. *Archives of microbiology*, v. 201, n. 6, p. 769-785, 2019

KISHORE, N. *et al.* Phosphate-solubilizing microorganisms: a critical review. **Plant Biology and Biotechnology: Volume I: Plant Diversity, Organization, Function and Improvement**, p. 307-333, 2015.

KOUR, D. *et al.* Alleviation of drought stress and plant growth promotion by *Pseudomonas libanensis* EU-LWNA-33, a drought-adaptive phosphorus-solubilizing bacterium. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**, v. 90, p. 785-795, 2020.

LIU, A. *et al.* Interaction and regulation of carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in root nodules of legumes. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1860, 2018.

MALHOTRA, H. *et al.* Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. In: Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Oku, H., Nahar, K., Hawrylak-Nowak, B. (eds). **Plant nutrients and abiotic stress tolerance**. Springer: Singapore, p. 171- 190, 2018.

MARCHÃO, R. L. *et al.* Improving soybean development and grain yield by complementary inoculation with growth-promoting bacteria *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Priestia*, and *Bacillus*. **Plants**, v. 14, n. 3, p. 402, 2025.

MELO, L. C. *et al.* Cultivo do feijão: carioca. **Embrapa**, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/preproducao/cultivares/carioca>. Acesso em: 03 outubro 2023.

MENG, X. *et al.* Effects of phosphorus deficiency on the absorption of mineral nutrients, photosynthetic system performance and antioxidant metabolism in *Citrus grandis*. **PLoS One**, v. 16, n. 2, p. e0246944, 2021.

MITRAN, T. *et al.* Role of soil phosphorus on legume production. **Legumes for soil health and sustainable management**, p. 487-510, 2018.

MOHAMMED, A. An overview of distribution, biology and the management of common bean anthracnose. **Journal of plant pathology and microbiology**, v. 4, n. 8, p. 1-6, 2013.

MOURA, A. D.; BRITO, L. M. Aspectos socioeconômicos. In: CARNEIRO, J. E.; JÚNIOR, T. J. P.; BORÉM, A. (Ed.). **Feijão do plantio à colheita**. 1. ed. Viçosa: UFV. 2015. p. 16-36.

MURPHY, J.; RILLEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chim. Acta**, n. 27, p. 31-36, 1962.

NACCOON, S. *et al.* Interaction between phosphate solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on growth promotion and tuber inulin content of *Helianthus tuberosus* L. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 4916, 2020.

NASCENTE, A. S. *et al.* Produtividade do feijoeiro comum afetada por fontes de fósforo com ou sem cálcio. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 57, n. 2, p. 180-185, 2014.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 3, p. 305-325, 2009.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais Viçosa. **MG: UFV**, 1999. 399p.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al.* Inoculation with *Bacillus megaterium* CNPMS B119 and *Bacillus subtilis* CNPMS B2084 improve P-acquisition and maize yield in Brazil. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1426166, 2024.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al.* Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja. In: MEYER, M.; BUENO, A. F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. (ed.). Bioinsumos da cultura da soja. Brasília, DF: **Embrapa**, 2022. p. 163-179.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al.* Validação da recomendação para o uso do inoculante BiomaPhos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) na cultura de soja. Sete Lagoas, MG: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2021. 18p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 279).

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al.* Viabilidade técnica e econômica do Biomaphos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas culturas de milho e soja. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2020. 20p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 210).

OLIVEIRA, L. F. C. *et al.* **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 59 p.

OSAKI, M. Com forte dependência do mercado externo, setor nacional de fertilizantes enfrenta desafios. **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA-USP)**, 2023. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniao-cepea/com-forte-dependencia-domercado-externo-setor-nacional-de-fertilizantes-enfrenta-desafios.aspx>. Acesso em: 20 de setembro de 2023.

OWEN, D. *et al.* Use of commercial bioinoculants to increase agricultural production through improved phosphorus acquisition. **Applied Soil Ecology**, v. 86, p. 41-54, 2015.

PASTORINI, L. H. *et al.* Crescimento inicial de feijoeiro submetido a diferentes doses de fósforo em solução nutritiva. **Revista Ceres**, v. 47, n. 270, p. 219-228, 2000.

PAVINATO, P. S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 15615, 2020.

PEREIRA, H. S. *et al.* Cultivo do feijão: preto. **Embrapa**, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/preproducao/cultivares/preto>. Acesso em: 03 outubro 2023.

PERES, A. R. *et al.* Co-inoculation of *Rhizobium tropici* and *Azospirillum brasilense* in common beans grown under two irrigation depths. **Revista Ceres**, v. 63, p. 198-207, 2016.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. Editora Unesp, 2021.

QU, P. *et al.* Distinct responses of the nitrogen-Fixing marine cyanobacterium *Trichodesmium* to a thermally variable environment as a function of phosphorus availability. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1282, 2019.

RAIJ, B. *et al.* Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. B. van Raij, JC, andrade, H. Cantarella and JA Quaggio (Ed.), **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**, p. 189-199, 2001.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RAINEY, K. M.; GRIFFITHS, P. D. Differential response of common bean genotypes to high temperature. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 130, n. 1, p. 18-23, 2005.

RAWAT, P. *et al.* Improvement of phosphorus uptake, phosphorus use efficiency, and grain yield of upland rice (*Oryza sativa* L.) in response to phosphate-solubilizing bacteria blended with phosphorus fertilizer. **Pedosphere**, v. 32, n. 5, p. 752-763, 2022.

RAWAT, P. *et al.* Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 49-68, 2021.

RAWAT, P. *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria: A booster for ameliorating soil health and agriculture production. In: Giri, B.; Verma, A. (eds.). **Soil Health**, Springer, Cham, p. 47-68, 2020.

REZAEI-CHIYANEH, E. *et al.* Intercropping fennel (*Foeniculum vulgare* L.) with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by PGPR inoculation: A strategy for improving yield, essential oil and fatty acid composition. **Scientia Horticulturae**, v. 261, p. 108951, 2020.

RODRÍGUES, H.; FRAGA, R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. **Biotechnology advances**, v. 17, n. 4-5, p. 319-339, 1999.

RONDINA, A. B. L. *et al.* Changes in root morphological traits in soybean co-inoculated with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense* or treated with *A. brasilense* exudates. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 537-549, 2020.

SANTOS, M. S. *et al.* Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. **Amb Express**, v. 9, n. 1, p. 205, 2019.

SÃO PAULO (ESTADO). Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Florestal. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**: revisado e ampliado. Marcio Rossi. – São Paulo: Instituto Florestal, 2017. 118 p.

SHARMA, S. B. *et al.* Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, v. 2, p. 1-14, 2013.

SHARPLEY, A. N. Soil phosphorus dynamics: agronomic and environmental impacts. **Ecological engineering**, v. 5, n. 2-3, p. 261-279, 1995.

SILVA, L. I. *et al.* Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 462, 2023.

SILVA, O. F., WANDER, A. E. O feijão comum no Brasil: passado, presente e futuro. **Comunicado Técnico Embrapa Arroz e Feijão (nº 287)**. 1 ed. Embrapa, Santo Antônio de Goiás, 2013.

SOUSA, S. M. *et al.* Tropical *Bacillus strains* inoculation enhances maize root surface area, dry weight, nutrient uptake and grain yield. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, n. 2, p. 867-877, 2021.

SOUZA, R. S.; WANDER, A. E. Aspectos econômicos da produção de feijão no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 23, n. 3, p. 43-54, 2014.

TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **The Journal of Ecology**, p. 995-1001, 1975.

TIAN, J. *et al.* Roles of phosphate solubilizing microorganisms from managing soil phosphorus deficiency to mediating biogeochemical P cycle. **Biology**, v. 10, n. 2, p. 158, 2021.

TIECHER, T. *et al.* Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. **Geoderma**, v. 435, p. 116495, 2023.

TIMOFEEVA, A. *et al.* Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. **Plants**, v. 11, n. 16, p. 2119, 2022.

VIANA, G. BiomaPhos rendeu R\$ 105 milhões ao País em 2020 com aumento de produtividade de soja e milho. **Embrapa**, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/61084904/biomaphos-rendeu-r105-milhoes-ao-pais-em-2020-com-aumento-de-produtividade-de-soja-e-milho>. Acesso em: 21 de setembro de 2023.

WANG, C. *et al.* Phosphorus solubilizing microorganisms: potential promoters of agricultural and environmental engineering. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 11, p. 1181078, 2023.

YEKEN M. Z. *et al.* Breeding of dry bean cultivars using *Phaseolus vulgaris* landraces in Turkey. **International Journal of Agricultural and Wildlife Sciences**, v. 4, n. 1, p. 45-54, 2018.

YUE, Z. *et al.* Microbiological insights into the stress-alleviating property of an endophytic *Bacillus altitudinis* WR10 in wheat under low-phosphorus and high-salinity stresses. **Microorganisms**, v. 7, n. 11, p. 508, 2019.

YUE, Z. *et al.* Phosphorus solubilizing *Bacillus altitudinis* WR10 alleviates wheat phosphorus deficiency via remodeling root system architecture, enhancing phosphorus availability, and activating the ASA-GSH cycle. **Plant and Soil**, v. 492, n. 1, p. 367-379, 2023.

ZUCARELI, C. *et al.* Fósforo na produtividade e qualidade de sementes de feijão Carioca Precoce cultivado no período das águas. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 32-38, 2011