

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ADUBAÇÃO FOSFATADA E BACTÉRIAS
SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO: ESTRATÉGIAS PARA A
PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO COMUM**

Antonia Erica Santos De Souza
Engenheira Agrônoma

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**ADUBAÇÃO FOSFATADA E BACTÉRIAS
SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO: ESTRATÉGIAS PARA A
PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO COMUM**

Discente: Antonia Erica Santos de Souza

Orientador: Prof. Dr. Leandro Borges Lemos

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Prates Coelho

Dissertação de mestrado apresentada à
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias –
UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte
das exigências para obtenção do título de
Mestra em Agronomia (Produção Vegetal).

2023

S729a

Souza, Antonia Erica Santos de

Adubação fosfatada e bactérias solubilizadoras de fosfato:
estratégias para a produção do feijoeiro comum / Antonia Erica Santos
de Souza. -- Jaboticabal, 2023

62 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Leandro Borges Lemos

Coorientador: Anderson Prates Coelho

1. Feijoeiro comum. 2. Bactérias solubilizadoras de fosfato. 3.
Fósforo. 4. Nutrição de plantas. 5. Sustentabilidade. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

IMPACTO ESPERADO NA SOCIEDADE

As conclusões dessa pesquisa contribuem para adoção de práticas agrícolas sustentáveis na produção de feijoeiro comum, com reflexos diretos na melhoria da produtividade e manejo no cultivo dessa leguminosa. Além disso, resultados como estes podem auxiliar à tomada de decisão e incentivar a inserção de bioinsumos no manejo agrícola com o objetivo de melhorar a qualidade no cultivo e a eficiência dos recursos naturais nos sistemas de produção de feijoeiro comum.

EXPECTED IMPACT ON SOCIETY

The findings of this research contribute to the adoption of sustainable agricultural practices in common bean production, directly reflecting the improvement of yield and management in the cultivation of this pulse crop. In addition, the results can assist in decision making and encourage the insertion of bio-inputs in agricultural management in order to improve crop quality and efficiency of natural resources in production systems of common bean.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ADUBAÇÃO FOSFATADA E BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO: ESTRATÉGIAS PARA A PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO COMUM

AUTORA: ANTONIA ÉRICA SANTOS DE SOUZA

ORIENTADOR: LEANDRO BORGES LEMOS

COORDENADOR: ANDERSON PRATES COELHO

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

Prof. Dr. LEANDRO BORGES LEMOS (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal



Dra. CHRISTIANE ABREU DE OLIVEIRA PAIVA (Participação Virtual)
Embrapa Milho e Sorgo / Sete Lagoas/MG



Dr. FÁBIO TIRABOSCHI LEAL (Participação Virtual)
ICL América do Sul / São Paulo/SP



Jaboticabal, 01 de março de 2023

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ANTONIA ERICA SANTOS DE SOUZA - nasceu no dia 12 de junho de 1998 em Capitão-Poço, município localizado no interior do Estado do Pará. Filha de Francisco Chagas de Souza e Francisca Neuma Bernardo dos Santos. Coursou ensino fundamental e médio no município de Capitão-Poço/PA, no período de 2009 a 2015. Em 2016 iniciou o curso de bacharelado em Agronomia na Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, *campus* Capitão-Poço. Durante o curso foi bolsista de Iniciação Científica pelo Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica PIVIC-UFRA (2018-2019) sob a orientação do Prof. Dr. Raimundo Thiago Lima da Silva. Atuou como estagiária no Programa de Melhoramento Genético de Citros (PMG) da Embrapa Amazônia Oriental (2019-2020) desenvolvendo atividades de pesquisa aplicada a avaliação de genótipos, fertilidade e nutrição de citros. Obteve título de Engenheira Agrônoma no ano de 2021. No mesmo ano ingressou no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal – UNESP/FCAV, sob orientação do Prof. Dr. Leandro Borges Lemos. É integrante do grupo de pesquisa Sustentabilidade em Sistemas Agrícolas - SAGRIS, participando de projetos relacionados ao manejo da fertilidade do solo, nutrição mineral de culturas em sistemas de produção agrícolas associados a utilização bioinsumos, com ênfase na cultura do feijoeiro comum.

Aos meus pais, Francisco Chagas de Souza e
Francisca Neuma Bernardo do Santos e minha
irmã, Ellem Santos de Souza.

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela proteção, bençãos e por me manter forte nesta caminhada.

À minha família, em nome dos meus pais, Francisco Chagas de Souza e Francisca Neuma Bernardo de Santos e minha irmã, Ellem Santos de Souza e também aos meus avós e tios, por todo incentivo e por vibrarem a cada conquista.

Ao meu namorado, Marcelo Júnior, por toda força, cuidado e companheirismo durante essa caminhada.

À minha melhor amiga, Thalia Siqueira, a qual sempre esteve presente, vibrando cada conquista, por todo apoio perante as minhas escolhas e por ter tornado a caminhada mais leve e feliz.

Aos meus amigos, que estiveram presentes durante todos os momentos, por todo companheirismo e discernimentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Leandro Borges Lemos, que tem toda minha admiração. Gostaria de agradecer pelo seu comprometimento, confiança e exemplo.

Ao meu coorientador Dr. Anderson Prates Coelho, pela disponibilidade e por todas contribuições.

Aos integrantes e parceiros do grupo de pesquisa Sustentabilidade em Sistemas Agrícolas – SAGRIS, em especial aos meus amigos Vinicius Filla e João Paulo por toda amizade e contribuições, e também aos estagiários que nunca mediram esforços para me ajudar.

Estendo os agradecimentos a todos Professores e Funcionários do Departamento de Ciências da Produção Agrícola, em especial ao Rubens Libório (Faro Fino) por toda alegria e parceira durante a condução do experimento.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – FEPE, por todo comprometimento e profissionalismo ao longo da pesquisa de campo.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal).

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

Finalmente gostaria de agradecer a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram durante essa jornada

Meus sinceros agradecimentos!

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1. <i>A cultura do feijoeiro comum</i>	8
2.2. <i>Fósforo na agricultura</i>	10
2.3. <i>Bactérias solubilizadoras de fosfato</i>	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
4. RESULTADOS.....	24
4.1. <i>Teor e acúmulo de fósforo no feijoeiro comum</i>	24
4.2. <i>Índice de conteúdo de clorofila e pigmentos fotossintéticos</i>	26
4.3. <i>Componentes de crescimento, produção e produtividade</i>	30
4.4. <i>Qualidade de grãos de feijoeiro comum</i>	32
4.5. <i>Análise multivariada de componentes principais (ACP)</i>	33
5. DISCUSSÃO	35
5.1 <i>Crescimento e eficiência fotossintética promovidos por BSF e doses de fertilização fosfatada.</i>	35
5.2 <i>Teor e acúmulo de P promovidos por BSF e doses de fertilização fosfatada</i>	37
5.3 <i>Componentes de produção e produtividade de grãos promovidos por BSF e doses de fertilização fosfatada</i>	38
5.4 <i>Qualidade de grãos de feijoeiro comum de grãos promovida por doses de fertilização fosfatada</i>	40
6. CONCLUSÕES	41
7. REFERÊNCIAS.....	42

ADUBAÇÃO FOSFATADA E BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO: ESTRATÉGIAS PARA A PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO COMUM

RESUMO – O fósforo (P) é um nutriente que atua no crescimento, fisiologia, nutrição, produtividade e qualidade de grãos do feijoeiro comum. Em regiões tropicais, a interação deste nutriente com a fração argila do solo torna grande parte do P indisponível. Dessa maneira, a fração disponível pode não atender a demanda das plantas. Nesse contexto, a utilização de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF) pode ser uma estratégia sustentável para tornar o nutriente disponível às plantas e promover produtividades satisfatórias. Neste estudo, o objetivo foi avaliar se a inoculação com BSF no feijoeiro comum aumenta o crescimento, fisiologia, nutrição, produtividade, qualidade de grãos e reduz a dose de aplicação química de fósforo para obtenção de máximas produtividades. O experimento foi conduzido com o feijoeiro comum 'IAC 2051' em delineamento de blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial 4x4, com quatro repetições. O primeiro fator foram quatro doses de P_2O_5 (0, 20, 40 e 60 kg ha⁻¹), aplicadas no sulco de semeadura, e o segundo fator foram quatro doses de BSF (0, 100, 200 e 300 mL ha⁻¹), através da inoculação das sementes. Ao longo do estudo foram analisadas variáveis relacionadas ao crescimento, fisiologia, nutrição, componentes de produção, produtividade e qualidade dos grãos do feijoeiro comum. Ocorreu interação positiva entre BSF e P_2O_5 apenas para a área foliar e teor de clorofila do feijoeiro comum. Para essas variáveis, a associação da inoculação com BSF com a dose de 40 kg ha⁻¹ de P_2O_5 promoveram as melhores condições para o feijoeiro comum. No entanto, não ocorreu interação entre a inoculação com BSF e doses de P_2O_5 para nutrição, componentes de produção e produtividade da cultura. A aplicação de P_2O_5 aumentou a produtividade do feijoeiro comum em 79 kg ha⁻¹ para cada 10 kg ha⁻¹ adicionado, enquanto a inoculação com BSF na dose de 192 mL ha⁻¹ promoveu a exportação de 15,28 kg ha⁻¹ de P e 159 mL ha⁻¹ incrementou a produtividade em 389 kg ha⁻¹ (12%) comparado ao manejo sem inoculação. Embora a qualidade dos grãos tenha sido pouco afetada pelos manejos, ela se manteve dentro dos padrões exigidos pelo mercado consumidor. As melhorias do crescimento e estado nutricional e fisiológico do feijoeiro comum promovidas pela aplicação de P_2O_5 e BSF foram essenciais para o aumento de produtividade. Assim, este estudo apresenta avanços para a adoção de estratégias de produção sustentável no feijoeiro comum, oferecendo alternativas para o aumento de produtividade.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium*, sustentabilidade, fósforo

PHOSPHATE FERTILIZATION AND PHOSPHATE SOLUBILIZING BACTERIA: STRATEGIES FOR COMMON BEAN PRODUCTION

ABSTRACT – Phosphorus (P) is a nutrient for common bean growth, physiology, nutrition, yield and grain quality. In tropical regions, this nutrient interacts with soil clay fraction and a part becomes unavailable. Thus, soil P available may not meet plant demand. In this context, phosphate solubilizing bacteria (PSB) may be a sustainable strategy to make the nutrient available to plants and promote satisfactory yields. In this study, the aim was to evaluate whether PSB inoculation in common bean increases growth, physiological state, nutrition, yield, grain quality and if reduces P chemical application rate to optimal grain yield. The experiment was carried out using common bean 'IAC 2051' in a randomized block design (RBD) in a 4x4 factorial scheme, with four repetitions. The first factor was four P_2O_5 rates (0, 20, 40 and 60 kg ha⁻¹) applied in the sowing furrow, and the second factor was four PSB rates (0, 100, 200 and 300 mL ha⁻¹), through seed inoculation. Throughout the study, variables related to growth, physiology, nutrition, yield components, grain yield and grain quality of common bean were analyzed. There was a positive interaction between PSB and P_2O_5 only for leaf area and chlorophyll content. For these variables, the association of PSB inoculation with a rate of 40 kg ha⁻¹ of P_2O_5 promoted the best conditions for common bean. However, there was no interaction between PSB inoculation and P_2O_5 rates for crop yield components and grain yield. The application of P_2O_5 linearly increased common bean grain yield by 79 kg ha⁻¹ for each 10 kg ha⁻¹ added, while PSB inoculation of 192 mL ha⁻¹ promoted P export of 15.28 kg ha⁻¹ and 159 mL ha⁻¹ increased grain yield by 389 kg ha⁻¹ (12%) compared to management without inoculation. Although grain quality was little affected by management, it remained within the standards required by the consumer market. Improvements in the growth and nutritional and physiological status of common bean promoted by P_2O_5 and PSB were essential for increasing grain yield. Thus, this study presents advances towards the adoption of sustainable production strategies in common bean, offering alternatives to increase yield.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L., *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium*, sustainability, phosphorus

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Caracterização química do solo nas camadas de 0,0-0,2m..... 17
- Tabela 2.** Valores de F para teor e acúmulo de fósforo no feijoeiro comum em função das doses de P_2O_5 e doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF).24
- Tabela 3.** Valores de F para Clorofila a (Chl _a), clorofila b (Chl _b), clorofila total (Chl total) e carotenóides (Cx + c) em função das doses de P_2O_5 e doses de bactérias solubilizadoras de fosfato nos estádios V4, R6 e R8.26
- Tabela 4.** Valores F para número de trifólios (NT), índice de área foliar (IAF), massa seca (MSPA), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de cem grãos (MCG), produtividade de grãos (PROD) em função das doses de P_2O_5 e doses de BSF.....30
- Tabela 5.** Valores de F para Rendimento de Peneira (RP), Teor de proteína bruta (TPB), Tempo de cozimento (TCoz), Tempo de máxima hidratação (TMH) e Relação de Hidratação (RH) de grãos do feijoeiro comum em função das doses de P_2O_5 e doses de bactérias solubilizadoras fosfato.33

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Descrição da área de estudo. Mapa da América do Sul destacando o Brasil (A); Estado de São Paulo (B); cidade de Jaboticabal (C) e área experimental (D). ...16
- Figura 2.** Médias de precipitação, temperaturas máximas, médias e mínimas registradas durante o período em que o experimento foi conduzido (20/4 à 27/08/2022). Jaboticabal, São Paulo, Brasil. Semeadura (S), Emergência (V1), Terceiro trifólio completamente expandido (V4), Florescimento pleno (R6) e Maturidade fisiológica (R9).....18
- Figura 3.** Teor de P nas folhas (TPF, A), matéria seca (TPMS, B) e nos grãos (TPG, C) do feijoeiro comum em função das doses de P_2O_525
- Figura 4.** Teor de P (TPMS, A), acúmulo de P na matéria seca (APMS, B) e exportação (C) de P pelo feijoeiro comum em função das doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF).....25
- Figura 5.** Desdobramento da interação entre doses de P_2O_5 e doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF) para clorofila a (Chl_a, A e B), clorofila b (Chl_b, C e D) e carotenoides (Cx + c, E e F) no estágio vegetativo (V4).28
- Figura 6.** Clorofila a (Chl_a, A), clorofila b (Chl_b, B) e carotenoides (Cx + c, C) no estágio R8 em função das doses de P_2O_529
- Figura 7.** Índice do conteúdo de clorofila (ICC) em função de doses de P_2O_529
- Figura 8.** Interações entre doses de P_2O_5 (A) e doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF, B) para área foliar (AF) do feijoeiro comum.....31
- Figura 9.** Número de vagens por planta (NVP, A) e número de grãos por vagem (NGV, B) em função das doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF).....31
- Figura 10.** Matéria seca (MS, A e B) e produtividade (PROD, C e D) em função de doses de P_2O_5 e doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF).32
- Figura 11.** Tempo de cozimento do feijoeiro comum em função das doses de P_2O_533
- Figura 12.** Análise de componentes principais para espacialização dos tratamentos e variáveis em duas dimensões (biplot). CP: componente principal; P: doses de P_2O_5 ; BSF: bactérias solubilizadoras de fosfato; PROD: produtividade de grãos; NVP: número de vagens por planta; NGV: número de grãos por vagem; MCG: massa de cem grãos; MS: massa seca da parte aérea; ICC: índice de conteúdo de clorofila; C_{ab}: teor de clorofila total nas folhas; TPF: teor de P nas folhas; TPG: teor de P nos grãos34

1. INTRODUÇÃO

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa de ciclo anual que produz grãos comestíveis de alto valor nutricional (Almeida et al., 2020; Boix et al., 2023). Aproximadamente 20% do peso seco dos grãos é de proteína, também rico em vitaminas, carboidratos e minerais (Castro-Guerrero et al., 2016; Avican e Bilgen, 2022). Tal cultura confere as partes interessadas a possibilidade de compor diferentes sistemas de produção agrícola devido aos seus benefícios no aporte de fertilidade e melhorias na qualidade do solo e ciclo curto (Bitocchi et al., 2017; Vougeleka et al., 2023). O Brasil se destaca como líder na produção e consumo do grão (Faostat, 2022).

Nitrogênio (N) e fósforo (P) são os nutrientes mais limitantes para sustentar a produtividade de grãos. A aquisição de N pelo feijoeiro comum é favorecida por associações simbióticas com *Rhizobium* spp., capazes de fixar N atmosférico. Essa associação contribui com o manejo de N e redução de fertilizantes sintéticos nitrogenados. Existem vários estudos sobre estratégias sustentáveis e mais econômicas para o fornecimento de N ao feijoeiro (Barros et al., 2018; Wilker et al., 2019; Reinprecht et al., 2020; Sousa, Teixeira, et al., 2022), mas poucos são os estudos quanto a eficiência de P nesta cultura. Dessa maneira, estratégias mais sustentáveis devem ser analisadas para o fornecimento de P ao feijoeiro comum (Elkoca, Turan e Donmez, 2010; Castro-Guerrero et al., 2016).

O fósforo é um dos nutrientes mais limitantes para produtividade das culturas em regiões tropicais. Nessas regiões, grande parte dos solos possuem elevado grau de intemperismo e eles carecem desse nutriente devido os processos de adsorção à fração argila do solo que tornam esse nutriente indisponível para absorção pelas plantas (Rawat et al., 2021; Attar et al., 2022). Os solos agrícolas brasileiros são conhecidos pela alta capacidade de fixação de P, devido sua pedogênese, característicos de alta concentração de óxidos de Al e Fe, que favorecem os processos de indisponibilidade do nutriente (Roy et al., 2016; Boitt et al., 2018).

A carência de P nos solos compromete processos como fotossíntese e respiração das plantas, em decorrência desse efeito as plantas respondem morfológicamente, apresentando baixo crescimento e produtividade (Malhotra et al., 2018; Zhang et al., 2021) além de comprometer a fixação biológica de nitrogênio (FBN)

(Liu et al., 2018). Em especial, as leguminosas são afetadas pela baixa disponibilidade de P nos solos, devido ao processo de simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio necessitarem de mais P (Dokwal et al., 2021).

Para superar a disponibilidade limitada de P nos solos, altas doses de fertilizantes fosfatados são importadas e aplicadas para sustentar a produtividade das culturas, colocando o Brasil numa posição de risco devido a elevada dependência na importação de fertilizantes químicos (Ringeval et al., 2017; Rheinheimer et al., 2019; Demay et al., 2023). Fatores geopolíticos podem gerar insegurança na aquisição desse insumo e aumentar os custos de produção (Demay et al., 2023). Sendo assim, são necessárias novas sugestões tecnológicas para satisfazer a aquisição de P às plantas em virtude de melhorar os sistemas agrícolas (Pang et al., 2018).

Os microrganismos têm grande importância nos ciclos biogeoquímicos, em particular o do P, por isso, tem sido apontado como tecnologia única ou complementar aos fertilizantes químicos fosfatados (Hegyi, Nguyen e Posta, 2021; Zutter et al., 2022). Os mecanismos da atividade bacteriana no ciclo de P tem sido bastante documentado e essas espécies são denominadas bactérias solubilizadoras de fosfato (Sharma et al., 2013; Adnan et al., 2017). O gênero *Bacillus* spp. é um dos mais dominantes nesse efeito (Meena et al., 2016). As bactérias atuam sobre as formas de P no solo, solubilizando a porção inorgânica através da liberação de ácidos orgânicos ou através da mineralização da fração orgânica pela exsudação de enzimas (Sousa et al., 2021).

Estudos recentes constataram que aplicação de BSF melhora o crescimento, nutrição e produtividade de cereais, como o milho (Pereira et al., 2020; Sousa et al., 2021; Massucato et al., 2022; Ribeiro et al., 2022), trigo (Shirmohammadi et al., 2020; Emami et al., 2022) e arroz (Rawat, Shankhdhar e Shankhdhar, 2022), leguminosas, como a soja (Fiuza et al., 2022; Reis et al., 2022; Shome, Barman e Solaiman, 2022), além de culturas energéticas, como a cana de açúcar (Rosa et al., 2020). No entanto, estudos sobre o uso combinado de BSF e fertilizantes fosfatados para cultura do feijoeiro ainda são incipientes.

As plantas possuem exigências de P diferentes durante o ciclo de cultivo. O estudo integrado de BSF e fertilizante fosfatado fornece a informação se as bactérias são capazes de cumprir a demanda total de P das plantas ou dependem parcialmente

de fertilizantes fosfatados (Etesami e Maheshwari, 2018; Zutter, Ameye, Bekaert, et al., 2022). Além disso, taxas de inoculação também podem ter influência sobre eficiência das bactérias no sistema solo planta (Ramírez e Kloepper, 2010). Portanto, esforços devem ser gerados para determinar a taxa adequada de BSF e da adubação fosfatada em campo com intuito de encontrar a proporção adequada para correta nutrição de P do feijoeiro. O manejo eficiente e sustentável de P é um desafio para alcançar o segundo objetivo do desenvolvimento sustentável (ODS#2) (Langhans et al., 2022). Dessa forma, este estudo teve como objetivo avaliar se inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato em feijoeiro comum i) aumenta o crescimento, ii) nutrição, iii) produtividade, iv) qualidade de grãos e v) reduz a dose de aplicação química de fósforo para obtenção de máximas produtividades.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura do feijoeiro comum

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa de ciclo anual, pertencente à família Fabaceae e do gênero *Phaseolus* L. Tal gênero possui uma diversidade de espécies, porém apenas cinco são cultivadas (Almeida et al., 2020). O feijoeiro comum se destaca por ser umas das leguminosas alimentícias mais importantes, principalmente, quando comparada com as demais leguminosas mais cultivadas no mundo, como a soja (*Glycine max* L.) e amendoim (*Arachis hypogaea* L.), e esta importância está diretamente relacionada com a alimentação humana (Arteaga et al., 2019; Shamseldin e Velázquez, 2020). O consumo do feijão comum na dieta alimentar gera benefícios e promoção da melhoria na saúde devidos suas características nutricionais, como alto teor de proteínas, nutrientes e carboidratos (Kumar e Shastri, 2017; Weller et al., 2019; Carbas et al., 2020).

O Brasil é o terceiro maior produtor de feijão no mundo, após Myanmar e Índia, respectivamente (Faostat, 2022). No país, a cultura tem importância econômica expressiva, com os estados Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso, Bahia e São Paulo como maiores produtores nacionais, respectivamente (Conab, 2023). Na safra de 2021/2022, a produção brasileira total de feijão foi de, aproximadamente, 3 milhões de toneladas (t) de grãos em uma área de 2,9 milhões de hectares (ha), atingindo produtividade média total de 1.050 kg ha⁻¹. Desse total produzido, 60% são de feijão-comum cores, 21% de feijão-caupi e 19% de feijão-comum preto com produtividades médias de grãos de 1.532 kg ha⁻¹, 1.430 kg ha⁻¹ e 491 kg ha⁻¹, respectivamente (Conab, 2023).

Dentre os tipos comerciais de feijoeiro comum, os mais consumidos nacionalmente são os grãos do tipo carioca (tegumento bege com estrias marrons) e preto, sendo o grão do tipo comercial carioca mais produzido (Chiorato et al., 2020). Dentro da própria espécie existe diversidade com relação ao tipo de grão, principalmente relacionados as suas características (tamanho, cor, brilho, cor do hilo e halo), atributos qualitativos e nutricionais (Arf et al., 2015).

A espécie é nativa da América Central e Sul e amplamente cultivada por ser uma cultura flexível ao cultivo. Possui expressiva importância no Brasil devido sua

ampla adaptação aos fatores edafoclimáticas do país e também ao nível tecnológico que o produtor pode empregar no seu cultivo, pois esta cultura está presente nos sistemas de produção desde pequenos a grandes produtores (Souza e Ferreira, 2017; Shamseldin e Velázquez, 2020; Sousa, Soratto, et al., 2022).

A diversidade dentro da própria espécie, também a torna atrativa para compor os sistemas de produção dos produtores, no que diz respeito ao seu: hábito de crescimento, com cultivares de porte determinado e indeterminado; ciclo de cultivo, variando desde de cultivares super precoce até tardias (Beebe et al., 2013) e permite sazonalidade quanto a épocas de semeadura ao longo do ano. Pode ser cultivado em três safras ao longo do ano: se semeado entre agosto e dezembro recebe a denominação de safras das águas; também pode ser cultivado na safra da seca, com semeadura entre janeiro e abril; e na safra de outono-inverno, ou 3ª safra, com semeadura a partir de maio. Para essa última, há necessidade de sistema de irrigação para atender as necessidades hídricas da cultura (Moura e Brito, 2015). Na terceira safra são obtidas produtividades mais elevadas devido ao nível tecnológico dos produtores e por ser cultivado em estação com temperaturas amenas, ideais para o desenvolvimento do feijoeiro. Com essa elevada variabilidade de condições que o feijoeiro pode ser produzido no Brasil, surge a necessidade de estudos específicos em cada safra, gerando manejos mais específicos para aumentar a produtividade da cultura.

O feijoeiro comum é uma cultura sensível a fatores abióticos e possui exigências para o seu desenvolvimento ótimo. A cultura se adapta a condições edafoclimáticas moderadas, logo ambientes extremos são preuciais a cultura (Losa et al., 2022). As temperaturas ótimas são as diurnas abaixo de 30 °C e noturnas com temperaturas abaixo de 20 °C, temperaturas acima dessas faixas são danosas para a produtividade da cultura (Rainey e Griffiths, 2005). A demanda hídrica da cultura está entre 300 e 500 mm, bem distribuídos ao longo do ciclo (Beebe et al., 2013).

Apesar da grande expressividade econômica e social da cultura, a produtividade média brasileira do feijoeiro comum é de, aproximadamente, 1.532 kg ha⁻¹ (Conab, 2023). Esse valor é considerado baixo, visto o potencial produtivo da cultura, com médias de produtividade superiores a 3,600 kg ha⁻¹ (Carvalho et al., 2018). Grande parte dessa baixa produtividade está associado ao fato da cultura ser

sensível a fatores abióticos e bióticos (Fageria et al., 2015). Dentre eles, limitações associadas ao ambiente de cultivo, predominantemente em regiões tropicais. Nessas condições, as principais limitações são de caráter hídrico e disponibilidade limitada de fósforo (Beebe et al., 2008, 2009; Losa et al., 2022).

2.2. Fósforo na agricultura

O fósforo (P) é definido como macronutriente primário e sua importância é dada pela sua atuação no crescimento e desenvolvimento das culturas, e também por estar envolvido em processos metabólicos, como transferência de energia, transdução de sinal, biossíntese de macromoléculas, processos fotossintéticos e respiração (Bouras et al., 2021). Por desempenhar importante papel em processos bioquímicos e fisiológicos, o P atua diretamente no crescimento e promoção de produtividade do feijoeiro comum. Em disponibilidade adequada estimula o crescimento de raízes e aumenta o potencial produtivo da cultura, por induzir maior formação dos componentes de produção da cultura, como massa seca da parte aérea, número de vagens e a massa de 100 grãos (Fageria et al., 2015).

O P é o macronutriente primário menos extraído pelo feijoeiro quando comparado ao nitrogênio (N) e potássio (K) (Fageria et al., 2015). Porém, as leguminosas possuem maiores exigência de P quando comparadas com outras culturas, principalmente devido a arquitetura do sistema radicular, que explora menos volume de solo (Haling et al., 2016). A exigência de P é explicada pela sua função nas plantas no fornecimento de energia. O processo simbiótico de fixação de N_2 e formação de nódulos são proporcionalmente afetadas pela disponibilidade adequada de P as plantas por serem mecanismos exigentes em energia (Bargaz et al., 2012; Sulieman e Tran, 2015; Makoudi et al., 2018). Além disso, é definido como elemento decisivo para leguminosas, em especial para o feijão, no que diz respeito a maturação precoce, enchimento de grãos e desenvolvimento radicular. Na disponibilidade inadequada desse nutriente, as plantas podem expressar deficiência e baixo potencial produtivo (Mitran et al., 2018).

O principal efeito da deficiência de P é sobre crescimento das plantas e, consequentemente, na sua produtividade, por ser vital em processos nas plantas,

como fotossíntese e respiração (Carstensen et al., 2018). Na ausência ou disponibilidade inadequada desse nutriente, os sintomas serão expressos nas folhas velhas em forma de coloração escura, devido a mobilidade desse nutriente na planta (Prado, 2021). Morfologicamente, as folhas são produzidas em baixa qualidade (menores e estreitas) (Meng et al., 2021). Consequentemente, essas alterações fisiológicas e morfológicas refletem baixa produtividade (Malhotra et al., 2018), e em leguminosas, redução da FBN (Liu et al., 2018).

Nos solos, o P está presente de duas formas e são representadas pela fração orgânica (P orgânico, Po) e pela fração inorgânica (P inorgânico, Pi) (Rawat et al., 2021). A porção orgânica de P nos solos é representada por monoésteres (fosfato de Inositol) e diésteres de fosfato (ácidos nucleicos e fosfolipídios) incorporado a compostos microbianos, vegetais e animais (Huang et al., 2017). A estimativa é que a concentração de fósforo nos solos é alta, porém apenas uma quantidade está acessível para a absorção pelas plantas. Esta disponibilidade de P é afetada pela alta interação que este nutriente está suscetível nos solos, como precipitação e adsorção (Van Raij, 2011; Ali et al., 2020).

O fosfato é suscetível a reação de precipitação com Fe, Al e Ca. Em solos de pH alcalinos existe a formação do composto fosfato de cálcio, enquanto em solos ácidos existe os fosfatos de alumínio e ferro. Essas reações resultam em formas de P de baixa solubilidade, que dificultam a absorção de P pelas plantas (Kumar and Shastri, 2017; Zhu, Li e Whelan, 2018). Além disso, o fósforo pode se tornar insolúvel quando adsorvidos as superfícies minerais no solo, como óxidos de ferro e alumínio, adquirindo alta estabilidade devido a força de ligação (complexo de esfera interna) (Tiecher et al., 2020).

No ciclo de P ambas as porções (Po e Pi) possuem diferenças quanto o restabelecimento com a solução do solo e a disponibilidade de P é comandada por processo de: dissolução e precipitação, por reação com compostos minerais no solo; adsorção e dessorção, ligação com as superfícies minerais e; mineralização e imobilização, modulado por microrganismos (Zhu, Li e Whelan, 2018). O fósforo pode ser armazenado na biomassa microbiana, caracterizando assim a imobilização, bem como pode ser liberado da fração orgânica pelo processo de mineralização mediada por microrganismos (Bünemann, 2015; Rheinheimer et al., 2019).

As plantas absorvem o fósforo da solução do solo por difusão principalmente na forma monobásica (H_2PO_4^-), porém os processos que tornam o fósforo insolúvel, diminuem a concentração desse nutriente na solução solo, logo, o fornecimento adequado é crucial para estabelecer padrões corretos de concentrações de P para absorção pelas plantas (Roberts e Johnston, 2015). Para suprir a demanda das plantas, as entradas de P no sistema solo é realizada por meio de adubação com fertilizantes químicos ou orgânicos (Richardson et al., 2011; Baig et al., 2012). Os fertilizantes fosfatados são: fosfato monoamoniaco (MAP), fosfato diamoniaco (DAP), fosfato monocálcico (superfosfato) ou polifosfato amoniaco (APP) (Degryse e McLaughlin, 2014).

A adsorção e precipitação são os processos responsáveis pela baixa eficiência da adubação fosfatada, enquanto que as propriedades físico químicas dos solos (material de origem, pH, textura) modulam essas reações de disponibilidade do fósforo no solo (Degryse e McLaughlin, 2014; Fischer et al., 2018). Estima-se que 75% de todo o solo mundial característico de fixação de P estão localizados no Brasil (Roy et al., 2016). E por esta razão as práticas de adubação fosfatada compensam as baixas eficiências aplicando quantidades de P maiores do que as necessárias à planta. Logo, os altos padrões de consumo dos adubos podem ser explicados baixa eficiência da adubação fosfatado (Rose, Hardiputra e Rengel, 2010) e, principalmente, pelo material de origem formadores dos solos agrícolas.

Aumentar o consumo de adubos fosfatados para suprir essa necessidade é uma prática perigosa ambientalmente e que aumenta o custo de produção das culturas. Neste cenário de incertezas quanto a disponibilização do P às plantas, devido pouca disponibilidade desse nutrientes nos solos, bem como a baixa eficiência dos adubos fosfatados, alternativas viáveis e sustentáveis devem ser propostas como a premissa de ofertar a demanda de P das plantas (Rawat et al., 2021).

2.3. Bactérias solubilizadoras de fosfato

Inúmeros fatores de caráter físicos e químicos do solo influenciam a disponibilidade de P às plantas. Os microrganismos tem sido bastante estudados por apresentarem mecanismos específicos e pelo seu papel no ciclo do P (Adnan et al., 2017). Dentre estes organismos microbianos, as bactérias, capazes de solubilizar o P

indisponível do solo, são definidas por esta função como bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF)(Adnan et al., 2017). As cepas ativas comumente estudadas e responsáveis por esta solubilização são do gênero: *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Rhizobium*, *Mesorhizobium* e *Sinorhizobium* (Sharma et al., 2013).

O gênero tem se destacado *Bacillus* na disponibilização de P e promoção de crescimento das plantas, em particular as espécies: *B. subtilis*, *B. cereus*, *B. thuringiensis*, *B. pumilus*, *B. megaterium*, etc. (Meena et al., 2016). As bactérias desse gênero são caracterizadas como gram-positivas, com estrutura em forma de bastonetes, aeróbicas e formadoras de endósporos (Sousa, Soratto, et al., 2022). A formação de endósporos confere a este gênero maior resiliência a fatores abióticos, como temperatura extremas, oscilações de pH e tolerância a agroquímicos (Sözer Bahadır, Liaqat e Eltem, 2018).

As bactérias podem ser classificadas de acordo com sua colonização no solo, podendo ser endofíticas, através das células vegetais (tecidos radiculares), ou de vida livre, caracterizadas pela habitação fora das células vegetais (rizosfera) (Moreira et al., 2020). As espécies *B. subtilis* e *B. megaterium* foram isoladas precisamente mediante seus mecanismos de solubilização de fosfato e selecionada para produção de inoculante. Elas possuem diferenças quanto à colonização e produção de compostos. A estirpe de *B. megaterium* (CNPMS B119) foi isolada de rizosfera de milho e atua na solubilização de compostos insolúveis de fosfato de cálcio e rocha e mineralização de P pela liberação de fosfatases, enquanto que a de *B. subtilis* (CNPMS B2084) é endofítica com alto potencial de exsudação de ácidos orgânicos e fitase (Oliveira et al., 2009; Abreu et al., 2017; Velloso et al., 2020; Ribeiro et al., 2022).

As bactérias podem atuar nas duas formas de P do solo (Po e Pi) e por reações bioquímicas atuarem nos processos de solubilização, mineralização e imobilização de P (Sharma et al., 2013). No processo de solubilização do P inorgânico (Pi) e mineralização de P orgânico (Po) para torná-los prontamente disponível às plantas, as bactérias solubilizadoras de fosfato atuam por dois mecanismos: produção de ácidos orgânicos para converter compostos de Pi e; secreção de enzimas (fosfatase e fitases) para mineralização do Po. Através desses mecanismos as BSF criam uma

zona propicia de disponibilização de P na rizosfera (Chen e Liu, 2019; Dey et al., 2021; Hakim et al., 2021).

A biodisponibilidade de P da fração inorgânica ocorre devido a liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (ácido cítrico, ácido málico, ácido oxálico e ácido glucônico) no solo (Alaylar et al., 2019; Zutter, Ameye, Vermeir, et al., 2022). A priori, esses ácidos atuam solubilizando composto insolúveis de fosfato inorgânico pela acidificação (liberação de prótons H^+) e combinar PO_4^{3-} para formar HPO_4^{2-} ou $H_2PO_4^-$. É assumido também o papel desses ácidos no processo de quelação pela formação de compostos insolúveis com cátions (Ca^{2+} , Al^{3+} e Fe^{3+}), liderando a fração fosfato ligado a eles (Wyciszkiewicz et al., 2016; Saeid, Prochownik e Dobrowolska-Iwanek, 2018; Yang et al., 2018).

As bactérias solubilizadoras de fosfato são multifuncionais, e além dessa importância no ciclo do P, possuem mecanismos para promoção de crescimento de plantas pela liberação de fitohormônios (Ahmad et al., 2018). Entre eles, a auxina é um fitohormônio relacionado com a divisão e diferenciação celular, através dessa função media alterações no crescimento radicular e consequentemente melhora o aporte de fósforo as plantas (Timofeeva, Galyamova and Sedykh, 2022). A formação de raízes finas, laterais e aumento do sistema radicular foram associadas a inoculação com BSF e produção de auxina por esses microrganismos, e está diretamente relacionado com a aquisição de nutrientes, em especial fósforo, que possui baixa mobilidade no solo (Sousa et al., 2021).

Além disso, a associação de BSF em leguminosas tem gerado efeitos positivos quando associadas a bactérias fixadoras de nitrogênio. Os efeitos dessa coinoculação foram observados em leguminosas através do aumento de nódulos radiculares, acúmulo de N e P, desenvolvimento radicular e aéreo, e consequentemente aumento da produtividade (Kaschuk et al., 2022). Em feijão mungo, o efeito aditivo de *Rhizobium* e PSB estimulou a nodulação e melhorou a nutrição (Ahmad et al., 2018) e aumentou o crescimento, produtividade e qualidade da soja, com redução na adubação em 50% de N e 25% de P_2O_5 (Shome, Barman and Solaiman, 2022).

Os estudos com bactérias solubilizadoras de fosfato tem sido realizado em diferentes grupos de plantas, entre elas: leguminosas, cereais, gramíneas. Em milho, Sousa et al. (2021) estudaram o efeito de linhagens de bactérias do gênero *Bacillus*

em duas condições: primeiro em solução nutritiva e posteriormente em campo combinada com adubação fosfatada (omissão e presença de P). O objetivo foi detectar a capacidade de produção de moléculas relacionadas ao AIA, bem como a capacidade de desenvolvimento de raízes, peso seco, teor de nutrientes e rendimentos de grãos. Os autores concluíram que as linhagens B2084, B119 e B32 obtiveram melhor desempenho em hidroponia para as características avaliadas, enquanto que as linhagens B116 e B119 se destacaram no aumento de produtividade e teor de P em grãos na condição de campo. Isso enfatiza os mecanismos dessas bactérias na produção de moléculas semelhantes ao AIA e solubilização de fosfato, bem como melhoria nas características agronômicas.

Em estudos anteriores encontramos resultados que bactérias promotoras de crescimento (*A. brasiliense* e *Bacillus subtilis*) proporcionou aumento de 38% na produtividade e redução de 75% da adubação fosfatada em cana-de-açúcar, o que justifica o mecanismo de conversão de fósforo indisponível em disponível para absorção pelas plantas (Rosa, et al., 2020). Em leguminosa, mais especificamente na soja, o estudo com inoculações microbianas destacou os efeitos de isolados bacterianos no aumento da concentração de nutriente (N, P e Mg), índice de clorofila e matéria seca (Reis et al., 2022).

Em um estudo recente em estufa, Rady et al. (2020) estudaram o efeito de bactérias solubilizadoras de fosfato e aplicação foliar de fósforo em nanopartículas, em uma situação de estresse de alto carbonato em *Phaseolus vulgaris*. Os autores concluíram que a aplicação integrativa das BSF e das nanopartículas influenciaram positivamente no crescimento e produtividade do feijoeiro comum. Outro estudo recente, Mortinho et al. (2022) verificou a ação de bactérias (isoladas e em consórcio) associadas a redução de fertilização NPK para o feijoeiro. A autora verificou que os consórcios bacterianos foram eficazes para aumentar concentração de macronutrientes e produtividade do feijoeiro quando combinados com 50% de NPK. No entanto, os estudos para a cultura do feijão ainda são incipientes e não exploram as dinâmicas e complexidade do sistema em campo e da ação integrada entre BSF e adubação fosfatada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na safra de inverno (3ª safra) do ano agrícola de 2021/2022, na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, SP, em área situada próxima às coordenadas 21°14'59"S, 48°17'16"W e altitude de 570 m (Figura 1). A região possui clima do tipo Aw, de acordo com a classificação climática de Koppen, sendo caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e inverno seco. A precipitação anual média da região é de 1425 mm, com temperatura média de 22 °C.

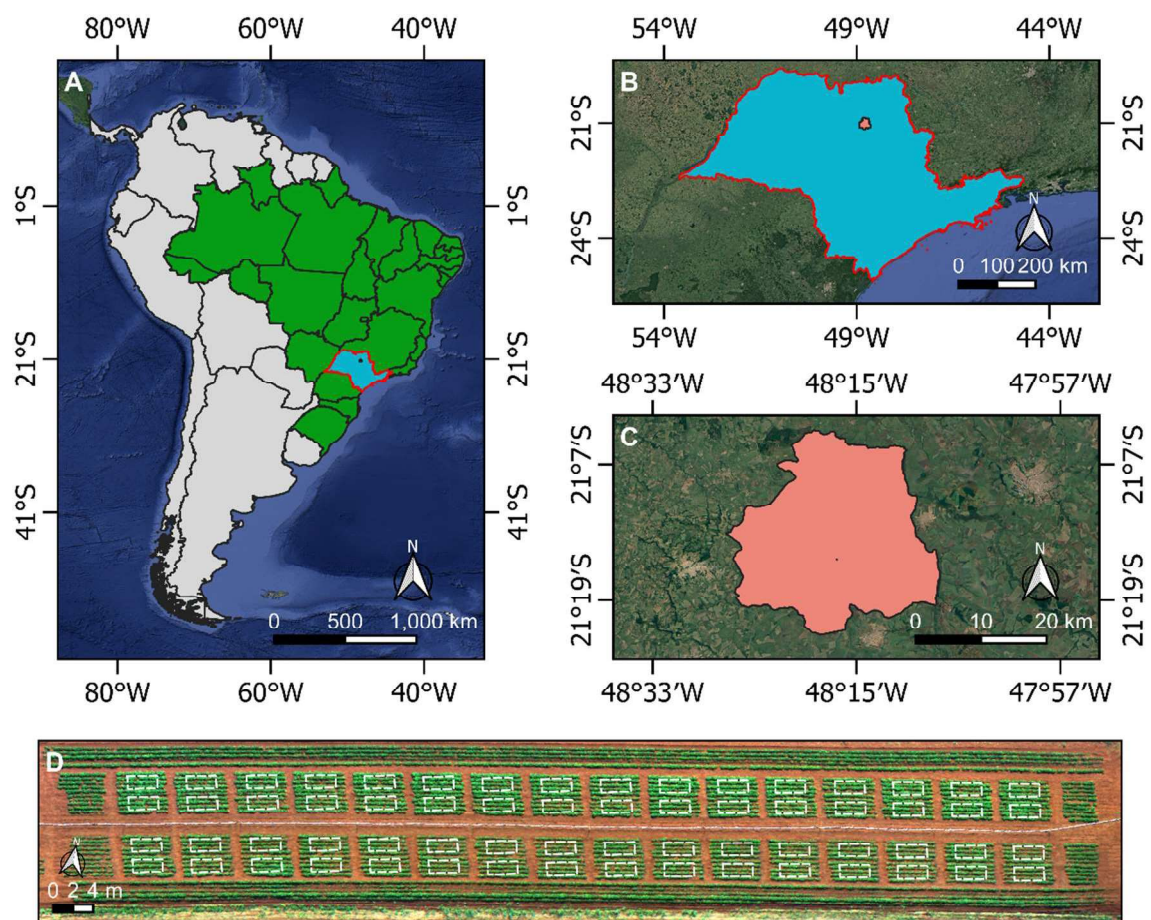


Figura 1. Descrição da área de estudo. Mapa da América do Sul destacando o Brasil (A); Estado de São Paulo (B); cidade de Jaboticabal (C) e área experimental (D).

Historicamente, a área experimental foi utilizada para o cultivo de culturas anuais (cereais e leguminosas). Anteriormente ao presente estudo, foi cultivado o milho (*Pennisetum americanum* L.), em preparo de solo convencional, semeado em 18/10/2021 na densidade de 14 kg ha⁻¹ de sementes no espaçamento entre linhas

de 0,45 m. Após 90 dias da emergência (DAE) foi realizado a dessecação com glifosato potássico na dosagem de 1,3 kg ha⁻¹ (i.a.). Após o milho estar seco, foi realizado manejo com triturador de palha mecanizado.

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho eutroférico (EMBRAPA, 2018), textura argilosa, relevo suave ondulado, com declividade média de 6%. Antes da instalação do experimento, amostras de solos foram coletadas para determinação da fertilidade do solo na camada 0,00–0,20 m, seguindo metodologia proposta por (Raij, 2001) obtendo-se os seguintes resultados (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química do solo nas camadas de 0,0-0,2m.

Camada	P	S	MO		pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB
(m)	mg dm ⁻³		g dm ⁻³		CaCl ₂	mmol _c dm ⁻³					
	32	5	26		5,8	6,4	24	14	18	0	44,4
0,00 - 0,20	B*	Cu**	Fe**	Mn**	Zn**	CTC		V		m	
	mg dm ⁻³					mmol _c dm ⁻³		%			
	0,86	11,8	24	2,7	4,5	62,4		71		0	

MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca de cátions; SB: soma de bases; V: saturação de bases; m: saturação por Al. P: resina. ** Determinação em DTPA. * Método Azometina-H.

Os dados climatológicos foram registrados durante todo o período experimental (Figura 2). As temperaturas máxima e mínima médias durante o período experimental foram de 27,9 e 13,4 °C, respectivamente, com precipitação acumulada de 45,6 mm.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC), no esquema fatorial 4 x 4, com quatro repetições. Os fatores experimentais consistiram em quatro doses de P₂O₅ (0, 20, 40 e 60 kg ha⁻¹) e quatro doses de inoculante a base de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF) (0, 100, 200, 300 mL ha⁻¹). De acordo com a análise de solo (Tabela 1) e considerando produtividades esperadas superiores a 2.500 kg ha⁻¹, a recomendação seria aplicar 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Ambrosano et al., 1997). Sendo assim, além da dose recomendada, utilizou-se um manejo com metade da dose recomendada, um com 50% de acréscimo e um controle sem adubação. A fonte de P₂O₅ utilizada foi o superfosfato triplo (SFT), que apresentou 41% de P₂O₅. Para o inoculante, foi utilizado o produto comercial BiomaPhos®, que contém as cepas das BSFs: *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084 (BRM034840)) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119 (BRM033112)), com concentração de 4×10⁹ células viáveis mL⁻¹.

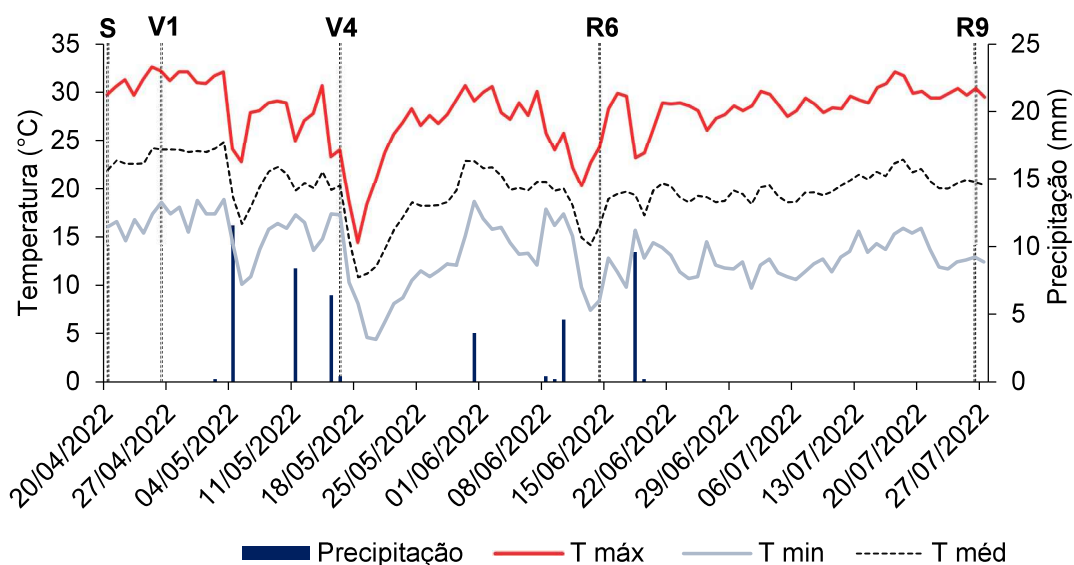


Figura 2. Médias de precipitação, temperaturas máximas, médias e mínimas registradas durante o período em que o experimento foi conduzido (20/4 à 27/08/2022). Jaboticabal, São Paulo, Brasil. Semeadura (S), Emergência (V1), Terceiro trifólio completamente expandido (V4), Florescimento pleno (R6) e Maturidade fisiológica (R9).

Para o estabelecimento do experimento foi realizado apenas a abertura dos sulcos de semeadura de forma mecanizada. Cada unidade experimental apresentou 5 linhas de feijão-comum com 5 m de comprimento cada, espaçadas em 0,45 m. Posteriormente, foi realizada a adubação de semeadura manualmente, utilizando 100 kg ha⁻¹ do formulado 20-00-20, fornecendo 20 kg ha⁻¹ de N e 20 kg ha⁻¹ de K₂O, juntamente com as respectivas doses de P₂O₅ de cada tratamento. A semeadura manual foi realizada nos sulcos. Previamente todas as sementes de feijão foram inoculadas com *Rhizobium tropici*, inoculante comercial líquido (BiomaRhyzo®), linhagem SEMIA 4077, com 1x10⁹ células viáveis mL⁻¹, na dose de 150 mL para cada 50 kg de sementes. Após secagem das sementes foi realizada a inoculação para solubilização de fosfato, conforme os tratamentos.

Utilizou-se a cultivar recém lançada de feijoeiro comum IAC 2051 que possui como características: hábito de crescimento indeterminado, tipo II, ciclo normal, tempo médio de cozimento dos grãos de 30 min e teor médio de proteína de 20% (Carbonell et al., 2021). A população de plantas foi ajustada para 240.000 plantas ha⁻¹.

Na adubação de cobertura a dose de N foi ajustada para classe de alta resposta esperada, devido ao cultivo anterior com gramínea, no caso o milho, e uso de irrigação (Ambrosano et al., 1997). Foi utilizada a dose de 90 kg ha⁻¹ de N, aplicada de forma parcelada. Na primeira aplicação (17 dias após a emergência - DAE) foi utilizado o fertilizante sulfato de amônio, com o objetivo de fornecer o S para o feijoeiro, além do N. Nesta primeira aplicação foi fornecido 30 kg ha⁻¹ de S e 28 kg ha⁻¹ de N (Ambrosano et al., 1997). Na segunda aplicação (28 DAE), utilizou-se a ureia como fonte de N, na dose de 60 kg ha⁻¹ de N. As aplicações foram em filete contínuo, a 10 cm do centro das linhas do feijoeiro.

Para o controle de plantas infestantes de folhas largas a área experimental foi pulverizada com herbicidas seletivos de pós-emergência (Bentazona, 600 g ha⁻¹ de i.a. + Imazamoxi, 28 g ha⁻¹ de i.a. e Fomesafem, 250 g ha⁻¹ ia) aos 16 DAE. Aos 20 DAE foi realizada pulverização com Cletodim (240 g ha⁻¹ ia) + Nafta pesada (535 g ha⁻¹ ia) para controle de plantas daninhas de folhas estreitas já emergidas. O manejo fitossanitário foi realizado de acordo com monitoramento e recomendações para cultura. A irrigação foi do tipo aspersão convencional, com turno de rega variável, de acordo com a necessidade da cultura. A lâmina total aplicada foi de 440 mm.

Durante a condução do experimento foram avaliados atributos de caráter fisiológico, nutricionais e produtivos nas plantas e qualitativos nos grãos de feijoeiro comum, descritos a seguir:

Pigmentos fotossintéticos (mg g⁻¹ MF): aos 37, 54 e 79 DAE, referentes aos estádios fenológicos V4 (terceiro trifólio completamente expandido), R6 (florescimento pleno) e R8 (enchimento de grãos) foram determinadas as concentrações de Clorofila a (*Chl a*), b (*Chl b*), total (*Chl t*), e carotenoides (Cx + c), utilizando o método de extrato de acetona. Posteriormente, as leituras de absorbância foram registradas em 470 nm, 645 nm e 663 nm utilizando um espectrofotômetro (Beckman Coulter DU 640, Brea, CA, USA) para calcular o conteúdo de pigmentos em mg g⁻¹ de massa fresca de folha através das equações sugeridas por Lichtenthaler (1987).

Índice de Conteúdo de Clorofila (ICC): foram realizadas leituras aos 28, 49 e 77 DAE, referentes aos estádios V4, R6 e R8, respectivamente, utilizando o clorofilômetro portátil CCM-200 Plus (Opti-Sciences Inc., Hudson, NH, USA). As leituras foram

realizadas adotando o terceiro trifólio completamente expandido a partir do ápice. Foram escolhidas ao acaso 3 plantas na área útil da parcela, realizando uma leitura por folíolo de cada folha trifoliolada, totalizando 9 leituras por unidade experimental.

Teor foliar de P (TPF, g kg⁻¹): foram coletadas amostras foliares com pecíolo no estágio R6, no terço médio de cinco plantas, de acordo com metodologia descrita por Ambrosano et al. (1997). As folhas foram lavadas (água com detergente a 1% e água deionizada) e, posteriormente, condicionadas em estufa de circulação de ar forçada sob temperatura de 65 a 70 °C até massa constante. Depois de secas, foram moídas e a determinação do teor de P seguiu método descrito por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

Área foliar (AF, cm² planta⁻¹): no florescimento pleno (R6), foram coletadas amostras foliares de três plantas da parcela útil para posterior leitura no equipamento de área foliar (LI- COR 3100C, Biosciences, Nebraska, USA).

Matéria seca da parte aérea (MS, g planta⁻¹): foram coletadas durante o estágio fenológico R6 cinco plantas consecutivas na área útil de cada parcela. Em seguida, as plantas foram lavadas com água destilada e secas em estufa de circulação forçada a 65 °C até atingirem massa constante para posterior pesagem.

Teor e acúmulo de P na parte aérea (TPMS, g kg⁻¹ e APMS, kg ha⁻¹): as amostras obtidas no item anterior (massa seca da parte aérea) foram moídas em moinho tipo Willey e a determinação do teor de P seguiu metodologia de Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). O acúmulo de P foi obtido pelo produto do teor de P e a massa seca da parte aérea.

Número de vagens (NVP): no estágio de maturidade fisiológica (R9), foram coletadas dez plantas na área útil de cada para contagem simples do número de vagens nas plantas coletadas.

Número de grãos por vagens (NGV): relação entre número total de grãos e o número total de vagens.

Massa de cem grãos (MCG, g): foi determinada por meio da pesagem de quatro subamostras de 100 grãos de cada parcela experimental, corrigindo os dados para 0,13 kg kg⁻¹ em base úmida.

Produtividade (PROD, kg ha⁻¹): a colheita foi realizada mediante o arranquio manual das plantas presentes em três linhas da área útil de cada parcela. Após a secagem ao sol, foi realizada trilha mecanizada. Para obtenção da produtividade a umidade dos grãos foi padronizada para 0,13 kg kg⁻¹ em base úmida.

Teor (TPG, g kg⁻¹) e exportação de P (kg ha⁻¹): a determinação do teor de P nos grãos seguiu a metodologia proposta por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Enquanto que a exportação de P foi calculada em função dos dados de produtividade e dos teores do nutriente nos grãos.

Eficiência agrônômica (EA, kg kg⁻¹): obtida pela seguinte equação: $EA = (PG_{CF} - PG_{SF}) / (Q_F)$. Em que: PG_{CF} = produtividade de grãos com fertilizante fosfatado; PG_{SF} = produtividade de grãos sem fertilizante fosfatado; Q_F = quantidade de P₂O₅ aplicado (Fageria et al., 2015).

Após a colheita, amostras dos grãos foram acondicionados em sacos de papel e armazenados em temperatura ambiente, para a realização das avaliações dos seguintes atributos qualitativos:

Rendimento de peneira (RP, %): os grãos foram classificados em tamanho pela passagem com agitação manual em conjunto de peneiras de crivos oblongos 11/64" x 3/4 (4,37 x 19,05 mm), 12/64" x 3/4 (4,76 x 19,05 mm), 13/64" x 3/4 (5,16 x 19,05 mm), 14/64" x 3/4 (5,56 x 19,05 mm), 15/64" x 3/4 (5,96 x 19,05 mm), sendo denominadas RP11, RP12, RP13, RP14 e RP15, respectivamente. O percentual de grãos retidos foi calculado pela relação entre o peso dos grãos retidos em cada peneira e o peso da amostra total para cada tratamento. O somatório do percentual de grãos retidos nas peneiras RP12, RP13, RP14 e RP15 resulta no valor de $RP \geq 12$. As amostras que foram retidas em maior proporção, sendo a peneira 13 neste estudo, foram utilizadas para obtenção dos demais atributos qualitativos dos grãos.

Tempo para máxima hidratação dos grãos (TMH, min:seg): foram determinadas utilizando amostras de 50 g de grãos de cada tratamento, sobre volume inicial de 200 mL de água destilada. De duas em duas horas, até 18 horas, foi quantificado o volume de água não absorvido pelos grãos. Ao final do tempo previsto para a hidratação, as amostras foram novamente pesadas. O tempo para máxima hidratação foi determinado pelo estudo de regressão polinomial entre o tempo (horas) e a capacidade de hidratação (mL).

Relação de hidratação (RH): A relação de hidratação foi determinada pela razão entre a massa final e a massa inicial dos grãos das amostras utilizadas na avaliação descrita acima.

Teor de proteína bruta (TPB, %): foi determinada pela fórmula: $PB = 6,25 \times N$, em que N é o teor de nitrogênio nos grãos determinado por digestão sulfúrica e método semi-micro-Kjeldahl.

Tempo de cozimento (Tcoz, minutos): para essa determinação amostras de grãos foram previamente hidratados por 12h. Posteriormente, os grãos foram organizados no cozedor de Mattson. Esse cozedor consta basicamente de 25 estiletes verticais com peso de 90 gramas sobre ele e ponta de 1 mm de diâmetro. Essa estrutura fica apoiada nos grãos durante o cozimento e, quando o grão se encontra cozido, a ponta penetra-o, deslocando o estilete. O tempo final para cozimento da amostra foi computado quando $50\% + 1$, ou seja, 13 estiletes foram deslocados. Durante a condução do teste a temperatura da água foi mantida a 96°C. A escala de Proctor e Watts (1987) foi adotada para verificar o nível de resistência ao cozimento.

Os dados foram submetidos a análise exploratória multivariada por componentes principais (Hair et al., 2009). Para isso, inicialmente foi realizada uma matriz de correlação para selecionar as variáveis com maior dependência com as demais do conjunto de dados. Sendo assim, as variáveis utilizadas nessa análise foram a PROD, MS, MCG, NVP, NGV, TPG, TPF, ICC em R6 e R8 e C_{ab} em R8. Antes da análise os dados foram padronizados (média zero e variância unitária). Para a confecção do gráfico de dispersão em duas dimensões (biplot), foram utilizados os dois primeiros componentes principais que apresentaram autovalores acima de 1,00

(Kaiser, 1958). Foi utilizada a matriz de covariância das variáveis originais para a extração dos autovalores. As variáveis com escores (cargas fatoriais) acima de 0,60 foram consideradas relevantes dentro de cada componente principal. No texto, os valores entre parênteses representam o valor da carga fatorial com o respectivo componente principal. A análise multivariada foi realizada no software Statistica® v. 7.0 (StatSoft, EUA).

Na análise univariada, os dados obtidos foram submetidos aos testes de preposição da anova (normalidade e homogeneidade) e em seguida submetidos à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$). Pelos fatores de estudo serem quantitativos, quando os dados foram significativos na ANOVA, eles foram ajustados através de modelos de regressão utilizando o software R (R Development Core Team, 2015).

4. RESULTADOS

4.1. Teor e acúmulo de fósforo no feijoeiro comum

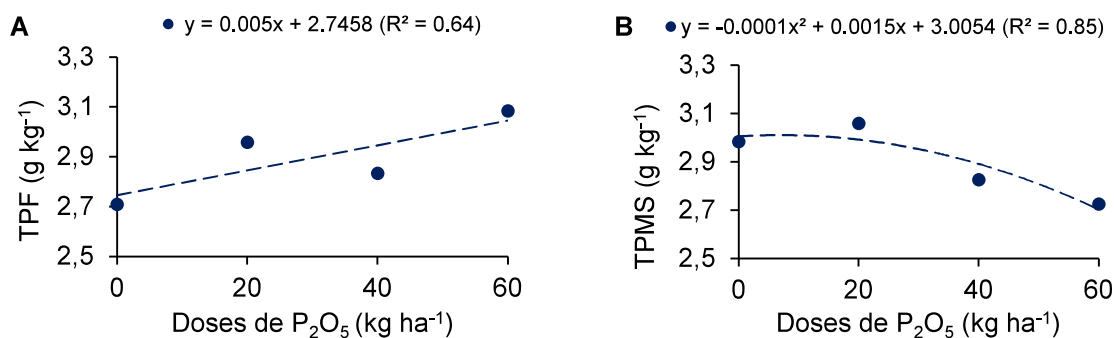
As doses de P_2O_5 e a inoculação com BSF alteraram o teor e o acúmulo de P no feijoeiro comum (Tabela 2). A aplicação de P_2O_5 e a inoculação com BSF contribuiu efetivamente para o aumento de TPMS, enquanto para as variáveis TPF e TPG apenas a aplicação de P_2O_5 foi eficiente. Em contraste, respostas significativas para APMS e exportação foram alcançadas para a inoculação com BSF. Os fatores de estudo não afetaram a eficiência agrônômica do feijoeiro.

Tabela 2. Valores de F para teor e acúmulo de fósforo no feijoeiro comum em função das doses de P_2O_5 e doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF).

F valor	TFP	TPMS	TPG	APMS	Exportação	EA
	g kg ⁻¹			kg ha ⁻¹		kg kg ⁻¹
Doses de P_2O_5 (P)	3,52*	5,71**	3,75*	1,68 ^{ns}	0,98 ^{ns}	1,21 ^{ns}
Doses de BSF (I)	0,27 ^{ns}	2,93*	0,26 ^{ns}	5,27**	3,95*	2,53 ^{ns}
P x I	1,00 ^{ns}	1,68 ^{ns}	0,91 ^{ns}	1,87 ^{ns}	0,56 ^{ns}	1,90 ^{ns}
Média Geral	2,9	2,9	4,26	4,58	14,3	9,79
CV (%)	10,29	7,54	6,65	19,05	13,03	74,59

**, * e ns: significativos a $p < 0,01$, $p < 0,05$ e não significativo, respectivamente. CV: coeficiente de variação; TFP: teor foliar de fósforo; TPMS: teor de fósforo na matéria seca do feijão (R6); TPG: teor de fósforo nos grãos; APMS: Acúmulo de fósforo na parte aérea (R6); Exportação de P na maturidade fisiológica (R9) e EA: eficiência agrônômica.

O TPF aumentou linearmente a taxa de 0,05 g kg⁻¹ para cada 10 kg ha⁻¹ de P_2O_5 adicionado (Figura 3A). O TPMS apresentou variação quadrática em função do acréscimo das doses de P_2O_5 , com máximo valor de 2,96 g kg⁻¹, quando fertilizado com 5,6 kg ha⁻¹ de P_2O_5 . Entretanto, o TPG reduziu linearmente a taxa de 0,059 g kg⁻¹ para cada aumento de 10 kg ha⁻¹ de P_2O_5 .



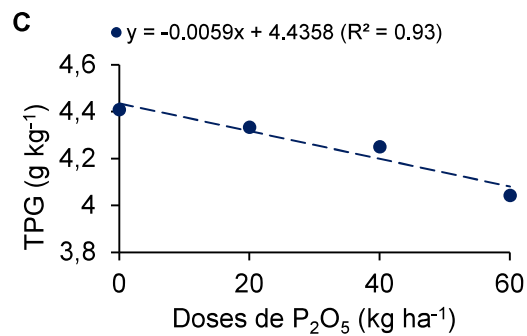


Figura 3. Teor de P nas folhas (TPF, A), matéria seca (TPMS, B) e nos grãos (TPG, C) do feijoeiro comum em função das doses de P_2O_5 .

O TPMS apresentou variação quadrática em função das doses de BSF, com teor máximo de $2,99\ g\ kg^{-1}$ na dose de $156\ ml\ ha^{-1}$ de BSF (Figura 4A). Além disso, o APMS e a exportação também apresentaram variação quadrática em função das doses de BSF (Figura 4B e C). Os valores máximos encontrados para APMS ($5,30\ kg\ ha^{-1}$) e exportação ($15,28\ kg\ ha^{-1}$) foram nas doses de 160 e 192 $ml\ ha^{-1}$ de BSF, respectivamente.

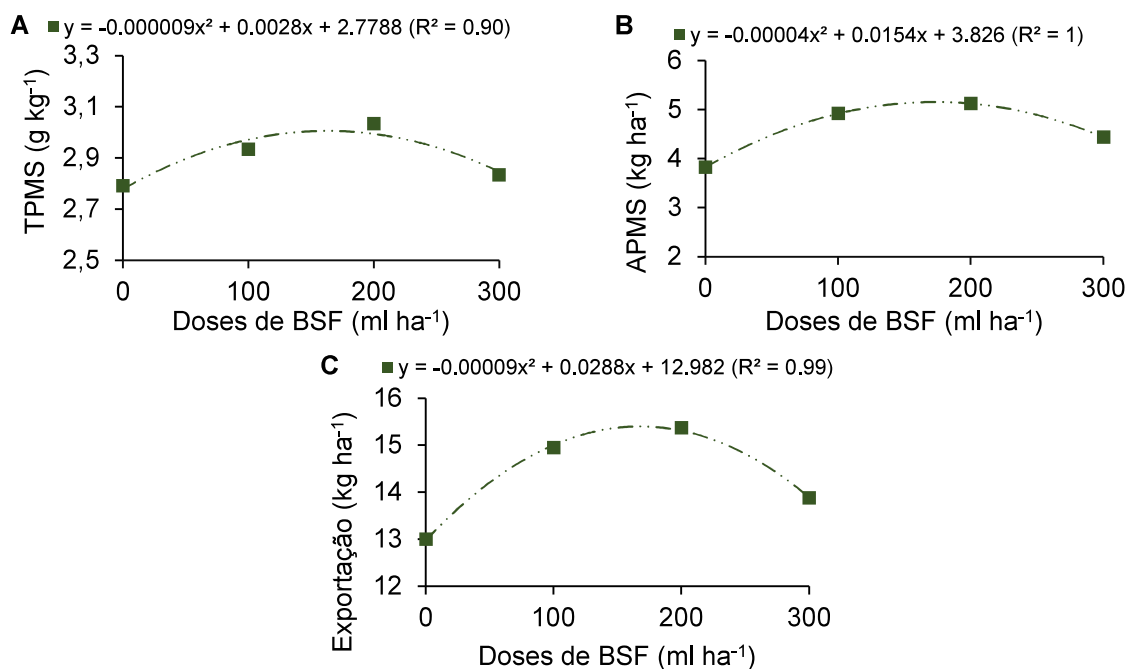


Figura 4. Teor de P (TPMS, A), acúmulo de P na matéria seca (APMS, B) e exportação (C) de P pelo feijoeiro comum em função das doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF).

4.2. Índice de conteúdo de clorofila e pigmentos fotossintéticos

Ocorreu interação entre doses de P_2O_5 e doses de BSF sobre os pigmentos fotossintéticos Chl a , Chl b e Cx+c no estágio vegetativo (V4). O efeito das doses de P_2O_5 foi significativo para Chl total (Tabela 3). Nos estádios reprodutivos, o efeito das doses de P_2O_5 foi significativo para ICC em R6 e R8 e para os pigmentos Chl a , Chl b e Chl total ocorreram diferenças apenas em R8 (Tabela 3).

Tabela 3. Valores de F para Clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b), clorofila total (Chl total) e carotenóides (Cx + c) em função das doses de P_2O_5 e doses de bactérias solubilizadoras de fosfato nos estádios V4, R6 e R8.

F valor	Estádio Vegetativo (V4)				
	ICC	Chl a	Chl b	Chl total	Cx + c
	-----mg g ⁻¹ -----				
Doses de P_2O_5 (P)	1,44 ^{ns}	3,66 ^{**}	10,56 ^{**}	3,80 [*]	2,95 ^{**}
Doses de BSF (I)	0,3 ^{ns}	4,48 [*]	3,50 [*]	0,39 ^{ns}	0,41 ^{ns}
P x I	1 ^{ns}	8,32 ^{**}	6,62 ^{**}	1,5 ^{ns}	2,28 [*]
Média Geral	19,06	0,21	0,3	0,52	0,46
CV (%)	7,76	8,07	7,19	3,92	14,5
F valor	Estádio Reprodutivo (R6)				
	ICC	Chl a	Chl b	Chl total	Cx + c
Doses de P_2O_5 (P)	7,46 ^{**}	0,28 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,61 ^{ns}
Doses de BSF (I)	0,64 ^{ns}	0,75 ^{ns}	1,40 ^{ns}	1,12 ^{ns}	1,56 ^{ns}
P x I	0,63 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,86 ^{ns}	1,42 ^{ns}
Média Geral	22,18	0,22	0,33	0,54	0,5
CV (%)	7,28	11,32	11,36	11,28	11,24
F valor	Estádio Reprodutivo (R8)				
	ICC	Chl a	Chl b	Chl total	Cx + c
Doses de P_2O_5 (P)	3,79 [*]	4,21 [*]	7,03 ^{**}	3,70 [*]	2,22 ^{ns}
Doses de BSF (I)	0,12 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,80 ^{ns}
P x I	0,82 ^{ns}	0,96 ^{ns}	1,32 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,80 ^{ns}
Média Geral	21,6	0,15	0,26	0,41	0,47
CV (%)	10,79	16,35	9,77	11,35	13,93

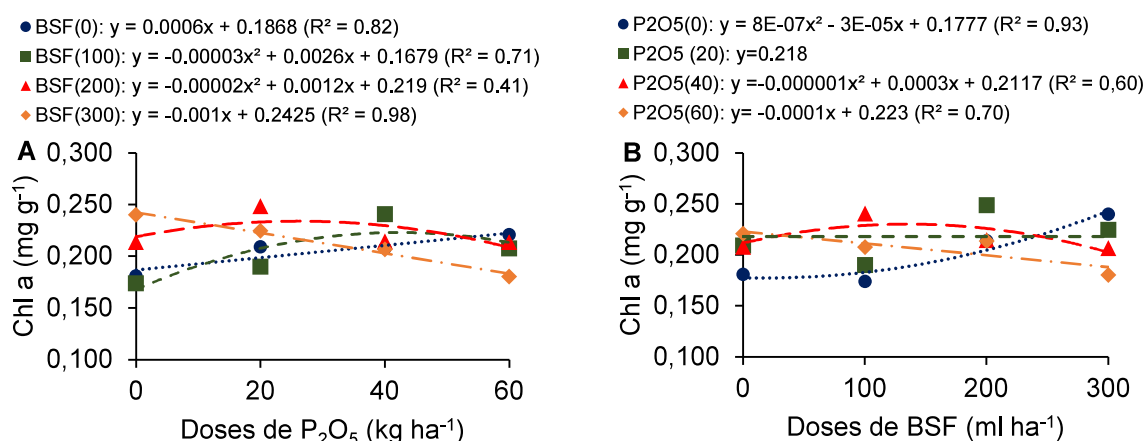
^{**}, ^{*} e ^{ns}: significativos a $p < 0,01$, $p < 0,05$ e não significativo, respectivamente. CV: coeficiente de variação

O conteúdo de clorofilas e carotenoides respondeu significativamente às doses de BSF combinadas com P_2O_5 no estágio V4 (Figura 5). A produção de Chl a em função da adubação fosfatada aumentou linearmente quando o feijoeiro não foi inoculado. Quando foi inoculado com as doses de 100 e 200ml ha⁻¹ ocorreu resposta quadrática, com valores máximos de 0,224 e 0,237 mg g⁻¹ quando fertilizado nas

doses de 43,3 e 30,0 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente (Figura 5A). Em função das doses de BSF, a Chl a decresceu quadraticamente quando o feijoeiro não foi adubado. Para esse tratamento, maiores quantidades desse pigmento foram obtidas com doses de BSF superiores a 18,75 ml ha⁻¹. Quando fertilizado com doses maiores que a recomendada (40 kg ha⁻¹ de P₂O₅), esse grupo de pigmentos decresceu quadraticamente quando inoculados com doses de BSF maiores que 150 ml ha⁻¹ (Figura 5B).

Em função da fertilização fosfatada, quando o feijoeiro não foi inoculado a produção de clorofila b reduziu quadraticamente até a dose de 38,3 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Quando inoculado com 100 e 200 ml ha⁻¹ de BSF os maiores teores de clorofila b foram observados nas doses de 12,5 e 32,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente (Figura 5C). Em função da inoculação, quando fertilizado com doses inferiores à recomenda (40 kg ha⁻¹ de P₂O₅), a máxima produção desse pigmento foi alcançada quando o feijoeiro foi inoculado com até 150 ml ha⁻¹ de BSF (Figura 5D). Quando não inoculado, decresceu quando foi fertilizado até a dose de 46 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e na dose de 300 ml ha⁻¹ esse grupo de pigmentos reduziu linearmente, (Figura 5E).

Em função das doses de BSF, os carotenoides decresceram até a dose de 133,3 ml ha⁻¹ quando o feijoeiro não recebeu adubação fosfatada. Em adubação reduzida (20 kg ha⁻¹ de P₂O₅) esse grupo de pigmentos apresentou variação quadrática, com máximo valor obtido quando inoculado com até 278 ml ha⁻¹ de BSF (Figura 5F).



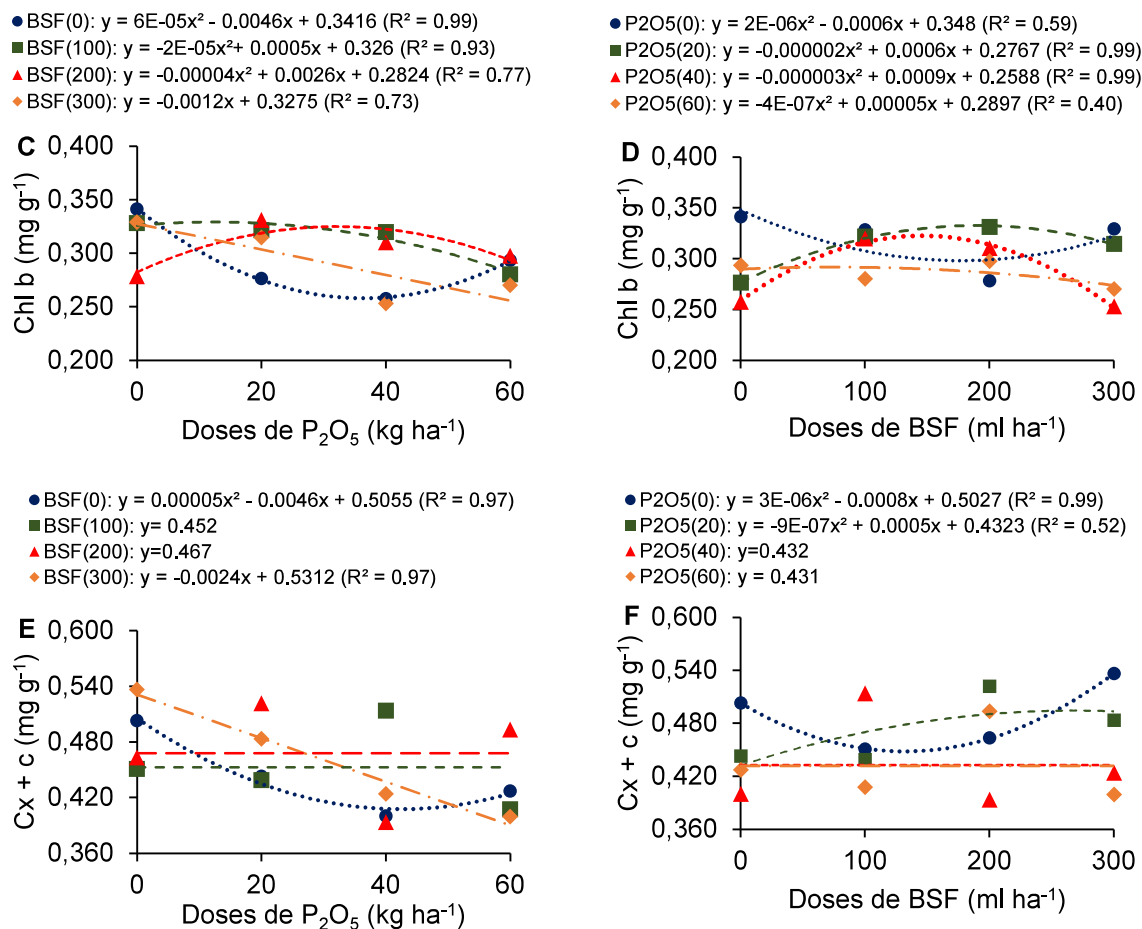


Figura 5. Desdobramento da interação entre doses de P₂O₅ e doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF) para clorofila a (Chl_a, A e B), clorofila b (Chl_b, C e D) e carotenoides (Cx + c, E e F) no estágio vegetativo (V4).

Em função das doses de P₂O₅, a Chl_a aumentou quadraticamente, com máxima concentração de 0,157 mg g⁻¹ na dose de 32,5 kg ha⁻¹ (Figura 6A). A Chl_b apresentou um comportamento quadrático decrescente até 0,244 mg g⁻¹ na dose de 18,3 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 6B). Em relação ao teor de clorofila total, observou-se um aumento linear desse grupo de pigmentos fotossintéticos em função das doses de P₂O₅ a taxa de 0,008 mg g⁻¹ para cada 10 kg ha⁻¹ adicionado (Figura 6C).

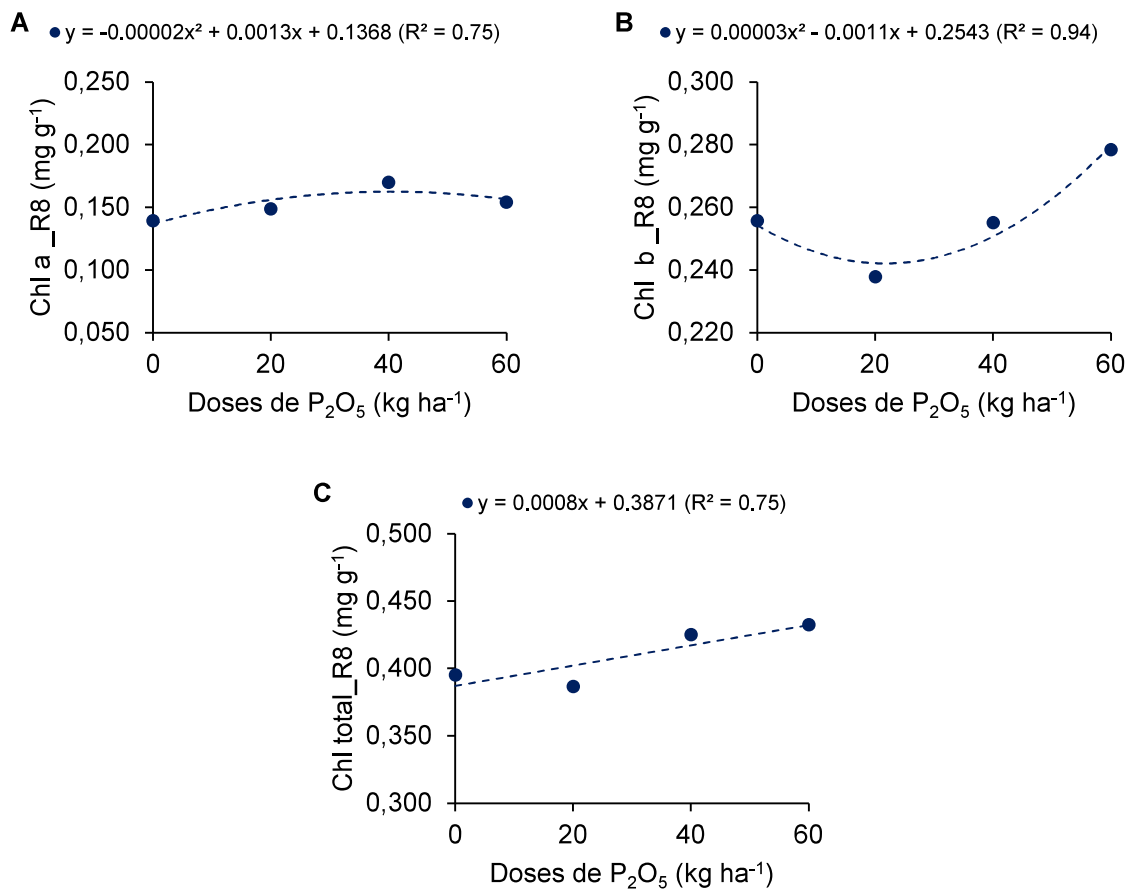


Figura 6. Clorofila a (Chl_a, A), clorofila b (Chl_b, B) e carotenoides (Cx + c, C) no estágio R8 em função das doses de P_2O_5 .

Verificou-se incrementos lineares para o ICC nos estádios R6 e R8 a taxas de 0,405 e 0,425 para cada 10 kg ha⁻¹ de P_2O_5 adicionado. No estágio V4, o ICC não foi influenciado pelas doses de P_2O_5 , mas observou-se menores valores em relação aos estádios reprodutivos. De maneira geral, no estágio R6 as plantas apresentaram maior ICC comparado aos demais (Figura 7).

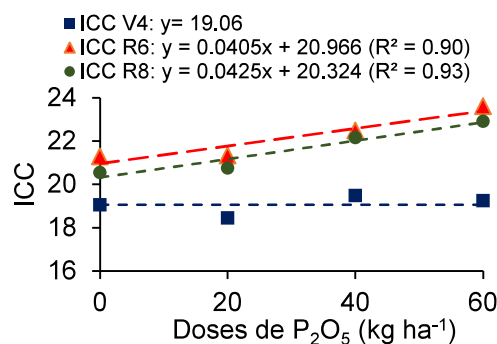


Figura 7. Índice do conteúdo de clorofila (ICC) em função de doses de P_2O_5 .

4.3. Componentes de crescimento, produção e produtividade

A área foliar foi influenciada pela interação entre as doses de P_2O_5 e de BSF (Tabela 4). Para número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV), houve influência única das doses de inoculante, independentemente das doses de fósforo aplicadas. Matéria seca (MS) e produtividade (PROD) foram afetadas pelos efeitos principais, ou seja, doses de P_2O_5 e inoculação com doses de BSF (Tabela 4). A massa de cem grãos (MCG) não foi afetada pelas doses de P_2O_5 , doses de inoculante ou pela interação entre os fatores (Tabela 4).

Tabela 4. Valores F para número de trifólios (NT), índice de área foliar (IAF), massa seca (MSPA), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de cem grãos (MCG), produtividade de grãos (PROD) em função das doses de P_2O_5 e doses de BSF.

F valor	AF	MS	NVP	NGV	MCG	PROD
	cm ²	g planta ⁻¹	-----nº-----		g	kg ha ⁻¹
Doses de P_2O_5 (P)	0,55 ^{ns}	6,65 ^{**}	1,49 ^{ns}	1,49 ^{ns}	0,50 ^{ns}	5,54 ^{**}
Doses de BSF (I)	3,63 [*]	3,57 [*]	7,83 ^{**}	3,78 [*]	0,19 ^{ns}	5,13 ^{**}
P x I	2,73 [*]	0,90 ^{ns}	1,92 ^{ns}	1,01 ^{ns}	1,23 ^{ns}	0,18 ^{ns}
Média Geral	1065,18	7,29	12,22	4,91	26,27	3295,38
CV (%)	19,11	15,44	15,96	14,43	2,25	10,67

^{**}, ^{*} e ^{ns}: significativos a $p < 0,01$, $p < 0,05$ e não significativo, respectivamente. CV: coeficiente de variação

Quando o feijoeiro não recebeu BSF sua área foliar aumentou quadraticamente em respostas às doses de P_2O_5 . Quando inoculado com 100 e 200 ml ha⁻¹ aumentou linearmente, enquanto que quando inoculado com 300 ml ha⁻¹ não respondeu às doses de P_2O_5 (Figura 8A). Com relação as doses de P_2O_5 em função das doses crescentes de BSF, na dose mínima de P_2O_5 o feijoeiro precisou de doses maiores que 85,7 ml ha⁻¹ de BSF para produzir maior área foliar, enquanto a dose mais elevada de P_2O_5 resultou em maior área foliar quando inoculado até a dose de 198,1 ml ha⁻¹ de BSF (Figura 8B).

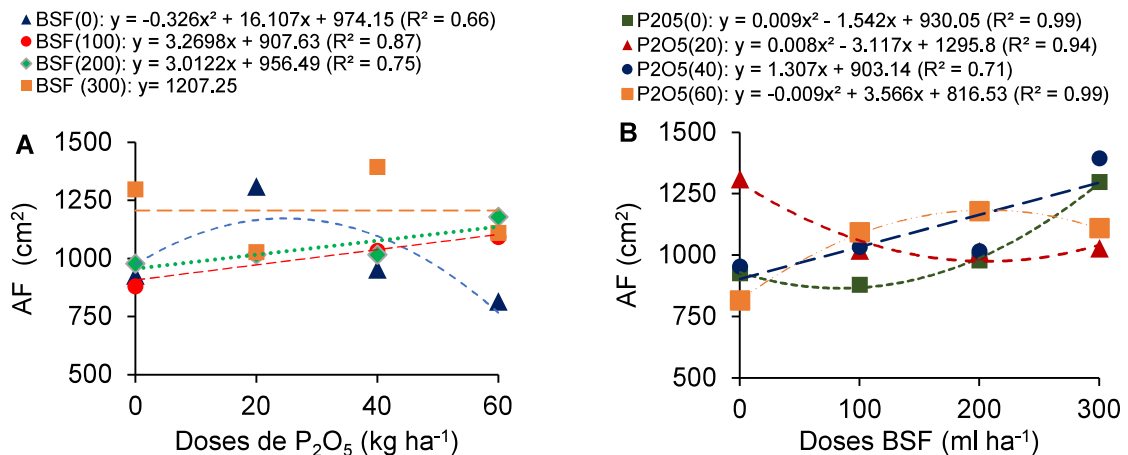


Figura 8. Interações entre doses de P_2O_5 (A) e doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF, B) para área foliar (AF) do feijoeiro comum.

O NVP aumentou linearmente a taxa de 1,05 para cada 100 $ml\ ha^{-1}$ de BSF adicionado (Figura 9A). O NGV reduziu linearmente em função das doses crescentes da inoculação a taxa de 0,23 para cada 100 $ml\ ha^{-1}$ de BSF adicionado (Figura 9B). Em resumo, plantas com menos vagens tiveram maior número de grãos por vagem produzidas em função das doses crescentes de P_2O_5 .

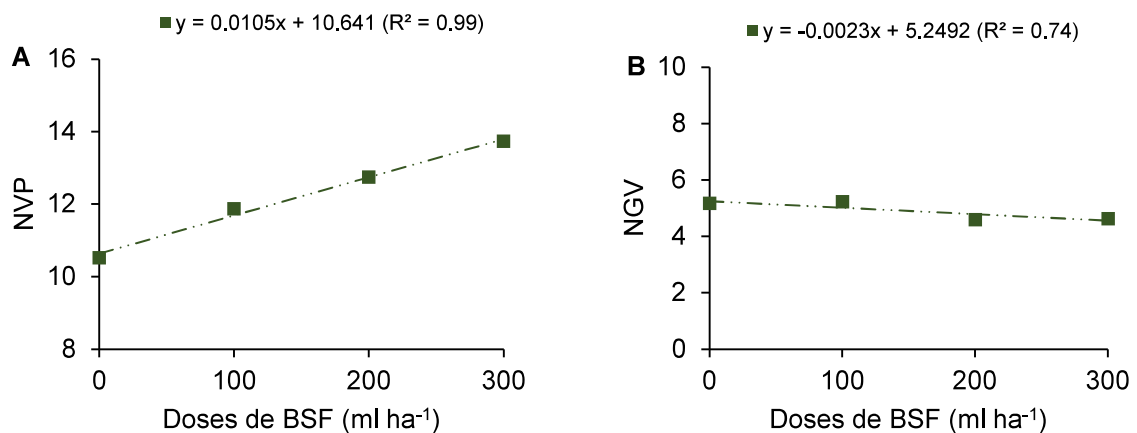


Figura 9. Número de vagens por planta (NVP, A) e número de grãos por vagem (NGV, B) em função das doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF).

A MS aumentou quadraticamente, com valor máximo de 7,75 $g\ planta^{-1}$ com 49,4 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 adicionado (Figura 10A). Para as doses de BSF o aumento também foi quadrático, com valor máximo de 7,80 $g\ planta^{-1}$ na dose de 186,1 $ml\ ha^{-1}$ (Figura 10B). A PROD apresentou aumento linear a taxa de 79 $kg\ ha^{-1}$ para cada 10 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 adicionado (Figura 10C) e variação quadrática para as doses de BSF.

Para esse último caso, a máxima PROD do feijoeiro comum foi de 3.489 kg ha⁻¹ quando inoculado com a dose de 159 ml ha⁻¹ de BSF (Figura 10D).

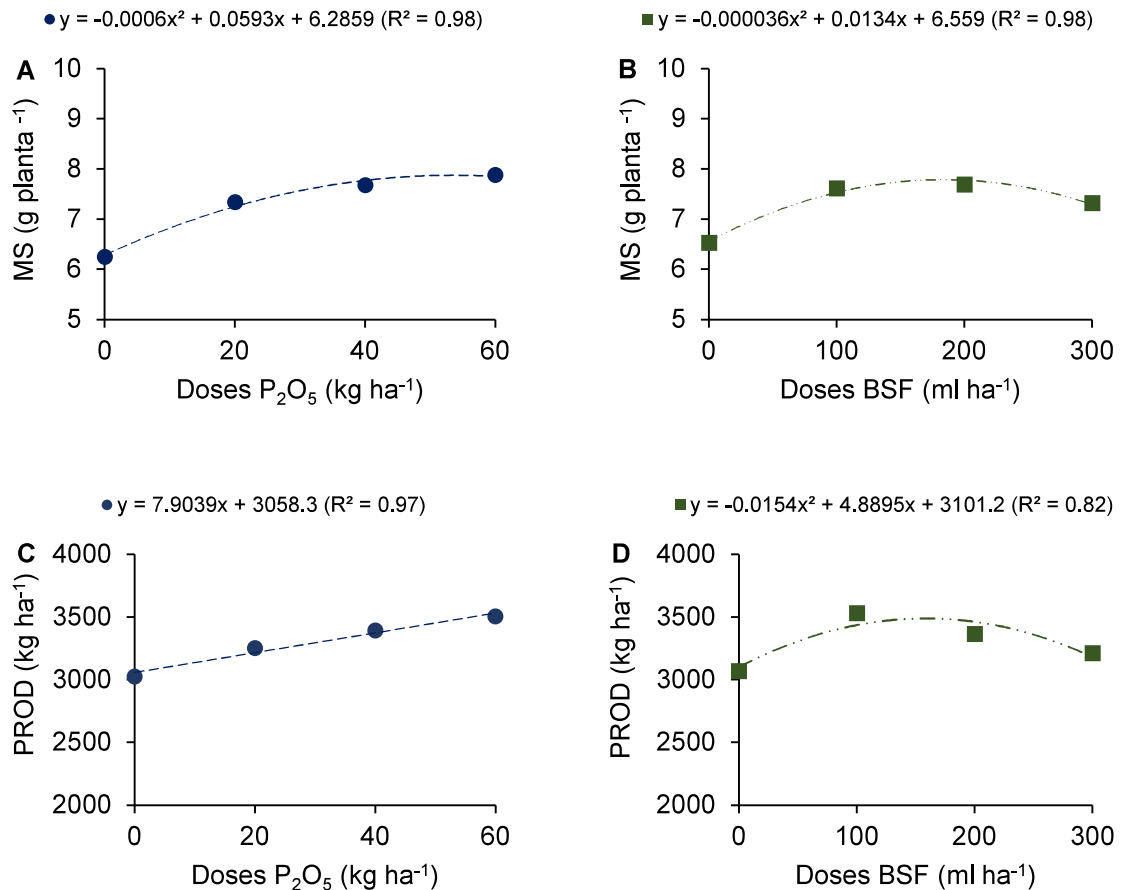


Figura 10. Matéria seca (MS, A e B) e produtividade (PROD, C e D) em função de doses de P₂O₅ e doses de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF).

4.4. Qualidade de grãos de feijoeiro comum

Para os atributos qualitativos do feijoeiro comum, apenas o tempo de cozimento (TCoz) foi influenciado pelas doses de P₂O₅ (Tabela 6). Quando fertilizado até a dose de 29,7 kg ha⁻¹ de P₂O₅ o tempo cozimento dos grãos reduziu quadraticamente até o valor 10,16 min. Quando fertilizado em doses maiores que esta a tendência foi do TC ser maior (Figura 11). O RP_{≥12} médio do experimento foi de 85,7%, TPB de 17,0%, TMH de 15:25 (h:min) e RH de 2,02.

Tabela 5. Valores de F para Rendimento de Peneira (RP), Teor de proteína bruta (TPB), Tempo de cozimento (TCoz), Tempo de máxima hidratação (TMH) e Relação de Hidratação (RH) de grãos do feijoeiro comum em função das doses de P_2O_5 e doses de bactérias solubilizadoras fosfato.

F valor	RP (≥ 12)	TPB	Tcoz	TMH	RH
	----- % -----		min:seg	h:min	-
Doses de P_2O_5 (P)	0,92 ^{ns}	2,01 ^{ns}	4,20*	0,05 ^{ns}	0,14 ^{ns}
Doses de BSF (I)	1,36 ^{ns}	1,26 ^{ns}	0,67 ^{ns}	1,30 ^{ns}	0,69 ^{ns}
P x I	1,02 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,78 ^{ns}	1,25 ^{ns}	0,93 ^{ns}
Média Geral	85,7	17,0	12:23	15:25	2,02
Cv (%)	3,14	5,56	7,67	15,05	1,84

**, * e ns: significativos a $p < 0,01$, $p < 0,05$ e não significativo, respectivamente.

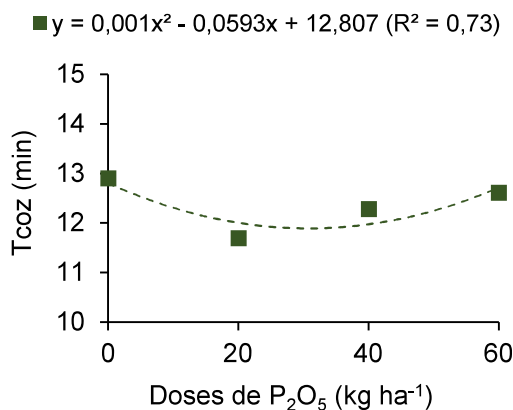


Figura 11. Tempo de cozimento do feijoeiro comum em função das doses de P_2O_5 .

4.5. Análise multivariada de componentes principais (ACP)

Os dois primeiros componentes principais foram responsáveis por explicar, aproximadamente, 60% da variabilidade total dos dados (Figura 12). As variáveis correlacionadas com o primeiro componente principal (CP1) foram ICC em R6 (-0,74), ICC em R8 (-0,84), C_{ab} em R8 (-0,76), MS (-0,78), PROD (-0,77) e TPG (0,71). As variáveis com o sinal igual das cargas fatoriais apresentam correlação direta entre si e correlação inversa com as variáveis de cargas opostas. Ou seja, a PROD apresentou correlação direta com ICC em R6 e R8, C_{ab} em R8 e MS, e todas essas variáveis apresentaram correlação inversa com TPG. Com menor intensidade, a PROD ainda apresentou correlação direta com MCG (-0,28), TPF (-0,44) e NVP (-

0,51). No CP2 as variáveis relevantes foram NVP (-0,68) e NGV (0,80), ou seja, o NVP foi indiretamente correlacionado com o NGV.

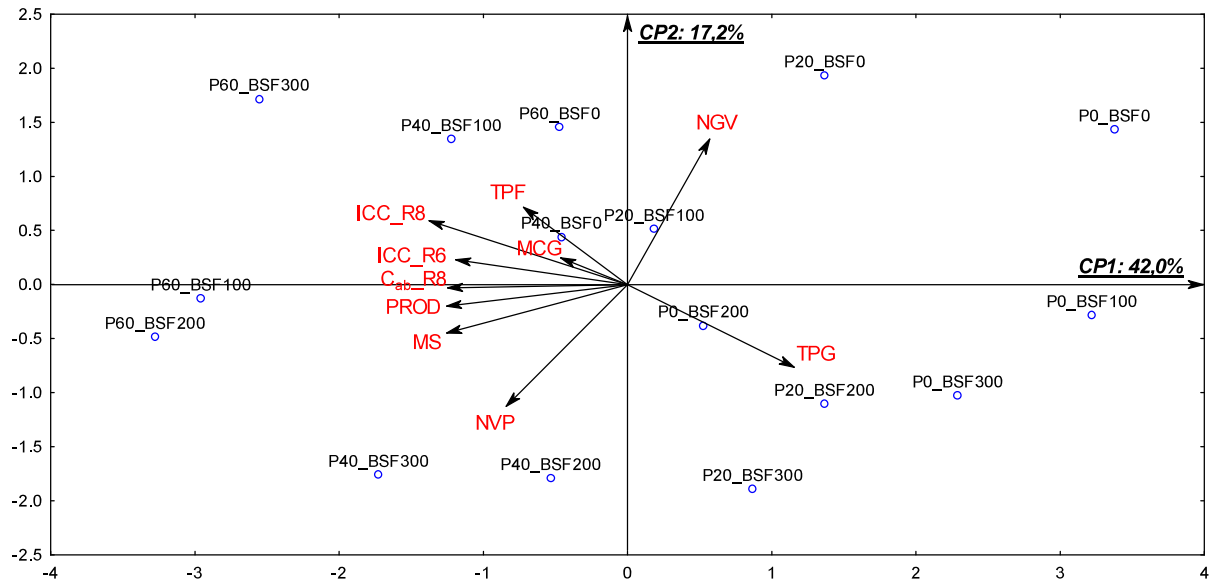


Figura 12. Análise de componentes principais para espacialização dos tratamentos e variáveis em duas dimensões (biplot). CP: componente principal; P: doses de P₂O₅; BSF: bactérias solubilizadoras de fosfato; PROD: produtividade de grãos; NVP: número de vagens por planta; NGV: número de grãos por vagem; MCG: massa de cem grãos; MS: massa seca da parte aérea; ICC: índice de conteúdo de clorofila; C_{ab}: teor de clorofila total nas folhas; TPF: teor de P nas folhas; TPG: teor de P nos grãos

Observa-se, pelo gráfico biplot, que os tratamentos com as maiores doses de P₂O₅ (40 e 60 kg ha⁻¹) e doses de BSF (100 a 300 ml ha⁻¹) ficaram próximos às variáveis relacionadas ao maior desempenho agrônômico, capacidade fisiológica e produtividade do feijoeiro. Por outro lado, o tratamento controle e os demais com as menores doses de P₂O₅ e BSF apresentaram maior TPG e ficaram em quadrantes opostos às variáveis de desempenho agrônômico, capacidade fisiológica e produtividade.

5. DISCUSSÃO

5.1 Crescimento e eficiência fotossintética promovidos por BSF e doses de fertilização fosfatada.

As BSFs e a adubação fosfatada promoveram alterações na fisiologia e no crescimento do feijoeiro comum, o que sugere potencialmente que houve mudança na dinâmica de disponibilização de P para o feijoeiro pelos tratamentos que fornecem P à planta. A inoculação de BSF na ausência e em doses moderadas de adubação fosfatada aumentaram os pigmentos fotossintéticos, promovendo a produção de clorofilas. Além dos seus efeitos na solubilização de fósforo, as bactérias do gênero *Bacillus* também possuem capacidade de fixação de N (Korir et al., 2017; Mortinho et al., 2022), nutriente que está presente na estrutura da clorofila (Prado, 2021). A produção de clorofilas pode ser aumentada por uma interação benéfica entre plantas e as bactérias e, conseqüentemente, melhorado a capacidade fotossintética das plantas (Kang et al., 2014). A disponibilidade adequada de P pode modular a atividade da Rubisco, proteína chave da fotossíntese e também está associada a melhoria na absorção de outros nutrientes, em especial, o magnésio (Mg), sendo que este elemento é o átomo central das moléculas de clorofila (Sheng et al., 2008; Fageria et al., 2015a; Wang et al., 2018). Estudo anterior indicou que ocorreram maiores concentrações de Mg e clorofila em leguminosa (*Glycine max*) quando inoculado com *B. subtilis* e *B. megaterium* (Mortinho et al., 2022). Além disso, os pigmentos fotossintéticos podem ter sido modulados devido a capacidade de *Bacillus* em alterar a fisiologia das plantas através da precursão de fitohormônios (Tsavkelova et al., 2006; Spaepen, Vanderleyden e Remans, 2007). O ácido indol-acético (AIA) é a auxina mais comum e registrada nas atividades bacterianas. Nas plantas tal fitohormônio atua em processos fisiológicos desencadeando dominância apical, divisão e diferenciação celular, germinação de sementes e desenvolvimento de raízes (Hakim et al., 2021).

Para a área foliar, os resultados demonstraram que na ausência da fertilização fosfatada o feijoeiro precisou de doses maiores que 85,66 ml ha⁻¹ de BSF para produzir máxima área foliar. Nessa situação, a limitação de P pode ter estimulado a interação do feijoeiro com as bactérias no intuito de atender as necessidades da planta

(Raymond et al., 2021). Ademais, observou-se crescimento linear na área foliar do feijoeiro com adubação fosfatada quando inoculado com doses intermediária de BSF. A promoção da expansão foliar pode ter sido influenciada pela ação das BSF na disponibilização de P para as plantas. O fósforo tem sua importância conhecida no processo divisão celular, logo a disponibilidade adequada desse nutriente favorece a expansão foliar (Tesfaye et al., 2007; Balemi e Negisho, 2012). Em caso de deficiência, processos como fotossíntese e respiração são afetados, com efeitos na qualidade das folhas (menores e finas), e como consequência redução no crescimento e desenvolvimento das plantas (Zhang et al., 2021). Estas mudanças no crescimento foliar também são atribuídas ao aumento dos pigmentos fotossintéticos foliares observados nesses tratamentos (Figura 5).

No geral, a máxima aplicação integrada dos tratamentos BSF (300 ml ha⁻¹) e P₂O₅ (60 kg ha⁻¹) promoveu decréscimo na produção de pigmentos fotossintéticos (Figura 5) e menor área foliar (Figura 8). Esse comportamento pode acontecer devido a imobilização microbiana de P em taxas mais elevadas de inoculação (Ramírez e Kloepper, 2010; Menezes-Blackburn et al., 2014). A atividade da biomassa microbiana pode se moldar aos recursos disponíveis no solo, atuando com fonte em ambiente limitado P e como sumidouro em ambiente de maior concentração de P (Achat et al., 2010). Outro acontecimento plausível, é que a exsudação de ácidos orgânicos, principal mecanismo de solubilização de fosfato, é cessado por essas bactérias em ambiente com alto suprimento de P (Saeid, Prochownik e Dobrowolska-Iwanek, 2018). Esse resultado sugere que a aplicação de BSF foi mais eficiente em manejo ausente e moderado de adubação fosfatada, e menos eficaz com excesso de fósforo (dose 60 kg ha⁻¹), para a cultivar IAC 2051 em solo com teor médio de P (32 mg dm⁻³) segundo Ambrosano et al., (1997).

O Índice de Conteúdo de Clorofila (ICC) medido em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro mostrou aumentos lineares em função das doses de P₂O₅ nos estádios R6 e R8 em comparação com o ICC medido em V4. Como observado, em V4 o ICC não foi influenciado pelas doses de P₂O₅. Isso ocorreu, pois nesse estágio fenológico as plantas ainda estão pequenas, com baixo acúmulo de massa seca. Como nessa fase as plantas ainda não possuem uma elevada necessidade de nutrientes, as doses de P₂O₅ aplicadas ainda não promoveram grandes diferenças no

crescimento das plantas. Maiores valores desse índice aconteceram no estágio R6, fato que é esperado, uma vez que maiores taxas de crescimento da planta ocorrem nesse estágio. Coelho et al., (2022), também observaram maior comportamento de ICC no estágio R6 em cultivar de feijoeiro de hábito indeterminado, que possui como característica a emissão de estruturas vegetativas até o final do ciclo da cultura. No estágio R8 esse índice apresentou decréscimo, o que ocorreu em função do início da senescência das plantas e queda de folhas.

5.2. Teor e acúmulo de P promovidos por BSF e doses de fertilização fosfatada

O teor de P nas plantas de *Phaseolus vulgaris* foi influenciado pela aplicação de fósforo no solo (Tabela 2). Nas folhas, os teores de P obtidos estão de acordo com a faixa de suficiência para o feijoeiro (2,5 a 4,0 g kg⁻¹) (Ambrosano et al., 1997). O aumento linear de P observado nas folhas é explicado pela maior disponibilidade de P fornecido pelas doses crescentes do fertilizante fosfatado (Bargaz et al., 2021). Entretanto, foi observado redução do teor de P na matéria seca em doses acima de 5,6 kg ha⁻¹ de P₂O₅, sendo isso também observado nos teores de P nos grãos. Esse resultado pode estar relacionado com efeito de diluição dos teores desse nutriente na parte área total, em função do aumento na produção de biomassa vegetal e de grãos em doses maiores do fertilizante fosfatado (Figura 10A e C) (Fageria et al., 2015). Isso pode ser verificado pela análise multivariada de componentes principais (Figura 12), em que o TPG foi inversamente correlacionado com a PROD e MS da parte aérea. Outros estudos também relataram o efeito de diluição de nutrientes em cultivares de feijoeiro que apresentaram maior produção de grãos (Araújo, Teixeira e Almeida, 2000; Nunes et al., 2021).

Nos componentes de nutrição das plantas de *P. vulgaris* a inoculação microbiana afetou positivamente o teor, acúmulo de P na biomassa e nos grãos. As cepas de *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) e *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) foram previamente isoladas e testadas quanto a eficiência na solubilização de fosfato (Oliveira et al., 2009; Abreu et al., 2017). Além do seu efeito no aumento da disponibilidade de P, as espécies de *Bacillus* são multifuncionais, com atividades comprovadas na sintetização de compostos promotores de crescimento (AIA,

sideróforos e biofilme) que melhoram o sistema radicular e exploração de nutrientes (Ribeiro et al., 2018; Velloso et al., 2020; Sousa et al., 2021). Parte da promoção do acúmulo de P na biomassa e grãos de *Phaseolus vulgaris* pode ter sido melhorado por estas atividades promotoras de crescimento das *Bacillus*. O conteúdo médio de P de referência para o feijoeiro é de 3 kg t⁻¹ de grãos (Ambrosano et al., 1997). O maior conteúdo de P observado em nosso estudo foi de 4,4 kg t⁻¹ de grãos quando inoculado com 192 ml de BSF, valores de acúmulo e exportação são diretamente relacionados com ganhos de produtividade (Fageria et al., 2015; Leggett et al., 2015). Isto explica as maiores produtividades alcançadas no nosso estudo quando o feijoeiro foi inoculado.

5.3 Componentes de produção e produtividade de grãos promovidos por BSF e doses de fertilização fosfatada

A inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato individual surtiu efeitos nos componentes de produção e produtividade de grãos do feijoeiro. Parâmetros como número de vagens, número de grãos por vagens e massa de grãos são componentes do feijoeiro comum que em proporção adequada influenciam na produtividade final de grãos da cultura (Karavidas et al., 2022). O componente NVP foi mais sensível às doses de inoculação. Em nosso estudo, a ausência da inoculação resultou em menor produção de NVP, mas promoveu maior NGV, enquanto que na aplicação progressiva de doses de BSF o feijoeiro produziu maior NVP com menor NGV. Tal relação inversa por estar relacionada com a resiliência que plantas com menor número de vagens exercem para compensar a produção, produzindo mais grãos por vagem (Leal et al., 2019), o que foi comprovado pelo CP2 da análise multivariada de componentes principais (Figura 12). No entanto, a maior produção de vagens pode estar associada a função que o fósforo tem na formação de flores e vagens (Araújo, Teixeira e De Almeida, 2000; Fageria et al., 2015). Dentre os componentes de produção, o número de vagens é o componente que tem maior correlação com ganhos de produtividade, podendo ser influenciado pelo fator genótipo e condições de manejo (Fageria e Santos, 2008; Carvalho et al., 2018; Kargiotidou et al., 2019).

A matéria seca respondeu aos efeitos simples de doses de BSF e doses de P_2O_5 , sem interação. A máxima produção de matéria seca foi alcançada nas doses de $49,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 e $186,1 \text{ ml ha}^{-1}$. Esse resultado está relacionado com máximo potencial da planta de conversão de energia em biomassa (Emami et al., 2022), e influencia diretamente em ganhos de produtividade (Fageria et al., 2015).

O fósforo fornecido pelo fertilizante fosfatado influenciou na produtividade de grãos. Apesar dos componentes de produção não terem sido afetados por esse fator, outras diferenças obtidas para esse tratamento podem ter influenciado, como o elevado estado nutricional do feijoeiro (Figura 3), aumento linear no índice de conteúdo de clorofila (Figura 7) e desempenho dos pigmentos fotossintéticos nos estádios reprodutivos (Figura 6), bem como a interação entre todos esses componentes. Pela análise multivariada, verifica-se que a PROD foi diretamente correlacionada com o ICC em R6 e R8 e C_{ab} em R8, corroborando com o discutido anteriormente. Coelho et al., (2019) verificaram que em estádios reprodutivos a avaliação do ICC é a que mais se correlaciona com a PROD das culturas, conforme verificado no presente estudo. De acordo com os autores, as avaliações em estádios mais avançados do ciclo permitem que ocorra diferenças significativas no índice de acordo com a aplicação dos tratamentos, uma vez que nessa fase as plantas sob condições menos favoráveis ao crescimento apresentarão estado nutricional e fisiológico inferior às condições mais favoráveis.

Em síntese, os ganhos promovidos na matéria seca e produtividade pela utilização de BSF são semelhantes ao do fertilizante fosfatado, associado ao fato da disponibilização de fósforo seja pela adubação química quanto pela biológica. Os ganhos promovidos pelos tratamentos são em razão da função que o fósforo exerce nas plantas, em especial nas leguminosas, no estímulo na nodulação e fixação biológica de N (Tirfessa, Jalata e Lamessa, 2022). Como importantes parâmetros para a produtividade final, o feijoeiro respondeu com máxima produtividade de 3.489 kg ha^{-1} quando inoculado com a dose de 159 ml ha^{-1} de BSF (Figura 10D). Comparado ao controle (0 ml ha^{-1} de BSF), foi obtido um aumento de 389 kg ha^{-1} na PROD, equivalente a quase 7 sacas de 60 kg de feijão. A máxima produtividade de grãos (3.498 kg ha^{-1}) alcançada neste estudo com BSF está acima da produtividade média nacional ($1,532 \text{ kg ha}^{-1}$) e do estado de São Paulo na safra de outono inverno ($2,474$

kg ha⁻¹) (Conab, 2023). Esses resultados são importantes e nos fornece uma nova abordagem para produção sustentável de feijão comum.

5.4 Qualidade de grãos de feijoeiro comum de grãos promovida por doses de fertilização fosfatada

Por se tratar de uma cultura alimentícia, os manejos devem se preocupar com o produto final que será disponibilizado para o mercado (Nunes et al., 2021). Em síntese, os tratamentos não influenciaram na qualidade dos grãos, exceto no tempo de cozimento. As médias obtidas para cada atributo estão dentro da média para a cultivar e que são exigidas pelo mercado consumidor. O rendimento médio das peneiras ≥ 12 do experimento foi de 85,7%, indicando a formação de grãos graúdos e acima da média de referência exigidas pelas empacotadoras de feijão, que é de 70% (Carbonell et al., 2010).

Para o tempo de cozimento, a dose reduzida de adubação fosfatada (29,7 kg ha⁻¹ de P₂O₅) foi determinante para redução da resistência ao cozimento. Foi observado também que doses superiores a esta promoveram maior tempo de cozimento. Ao relacionar com o teor de P nos grãos é observado que os teores nos grãos foram menores em doses excessivas de adubação fosfatada (Figura 3C). Resultado diferente foi observado por Ribeiro e Kläsener (2020), que constatou que genótipos que apresentaram maiores concentrações de P tiveram maior tempo de cocção.

A qualidade de grãos possui alta variabilidade e está diretamente relacionada com fator genético, condições de manejo da cultura e suas interações. Práticas agrícolas como sucessão de culturas (Mingotte et al., 2021) e estação de cultivo (Perina et al., 2014) podem alterar a qualidade dos grãos de feijão. No geral, os grãos apresentaram muita susceptibilidade ao cozimento (<16 min) de acordo com escala de com resistência ao cozimento de Proctor e Watts (1987). Grãos de feijão com cocção entre 15 e 30 minutos possuem preferência pelo mercado consumidor, devido menor gasto energético em sua preparação (Santos, Ribeiro e Maziero, 2016).

6. CONCLUSÕES

A aplicação de BSF associada às doses de até 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi eficiente para incrementar a área foliar e o teor de clorofila do feijoeiro comum. Embora não tenha ocorrido interação entre doses de P₂O₅ e de BSF para nutrição, componentes de produção e produtividade do feijoeiro comum, os dois fatores de estudo isolados aumentaram o teor foliar de P, acúmulo de P número de vagens por planta, a massa seca e a produtividade da cultura. A inoculação com 192 ml ha⁻¹ de BSF proporcionou 15,28 kg ha⁻¹ de exportação de P. A aplicação de P₂O₅ aumentou a produtividade em 79 kg ha⁻¹ para cada 10 kg ha⁻¹ de P₂O₅ adicionado, enquanto a inoculação com BSF (dose de 159 ml ha⁻¹) aumentou a produtividade em 12% (389 kg ha⁻¹) comparado ao manejo sem inoculação. O índice de conteúdo de clorofila, teor de clorofila total nas folhas, número de vagens por planta, teor de fósforo foliar e matéria seca se correlacionaram diretamente com a produtividade de grãos. As doses de P₂O₅ e BSF pouco afetaram a qualidade dos grãos do feijoeiro comum, que se manteve dentro dos padrões de qualidade exigidos pelo mercado consumidor. A melhoria do crescimento e estado fisiológico e nutricional do feijoeiro comum devido à aplicação de P₂O₅ e inoculação com BSF foi fundamental para o aumento de produtividade, tornando-se alternativas para a produção do feijoeiro comum.

7. REFERÊNCIAS

- Abreu CS, Figueiredo JEF, Oliveira CA, Santos VL, Gomes EA, Ribeiro VP, Barros BA, Lana UGP and Marriel IE (2017) Maize endophytic bacteria as mineral phosphate solubilizers. **Genetics and Molecular Research** 16:1–13.
- Achat DL, Morel C, Bakker MR, Augusto L, Pellerin S, Gallet-Budynek A and Gonzalez M (2010) Assessing turnover of microbial biomass phosphorus: Combination of an isotopic dilution method with a mass balance model. **Soil Biology and Biochemistry** 42:2231–2240.
- Adnan M, Shah Z, Fahad S, Arif M, Alam M, Khan IA, Mian IA, Basir A, Ullah H, Arshad M, Rehman IU, Saud S, Ihsan MZ, Jamal Y, Amanullah A, Hammad HM and Nasim W (2017) Phosphate-Solubilizing Bacteria Nullify the Antagonistic Effect of Soil Calcification on Bioavailability of Phosphorus in Alkaline Soils. **Scientific Reports** 7:1–13.
- Ahmad M, Ahmad I, Hilger TH, Nadeem SM, Akhtar MF, Jamil M, Hussain A and Zahir ZA (2018) Preliminary study on phosphate solubilizing *Bacillus subtilis* strain Q3 and *Paenibacillus* sp. strain Q6 for improving cotton growth under alkaline conditions. **PeerJ** 2018:1–22.
- Alaylar B, Güllüce M, Karadayi M and Isaoglu M (2019) Rapid Detection of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Agricultural Areas in Erzurum. **Current Microbiology** 76:804–809.
- Ali MA, Ajaz MM, Rizwan M, Qayyum MF, Arshad M, Hussain S, Ahmad N and Qureshi MA (2020) Effect of biochar and phosphate solubilizing bacteria on growth and phosphorus uptake by maize in an Aridisol. **Arabian Journal of Geosciences** 13.
- Almeida CP, Carvalho Paulino JF, Carbonell SAM, Chiorato AF, Song Q, Di Vittori V, Rodriguez M, Papa R and Benchimol-Reis LL (2020) Genetic diversity, population structure, and andean introgression in Brazilian common bean cultivars after half a century of genetic breeding. **Genes** 11:1–22.
- Ambrosano EJ, Tanaka RT, Mascarenhas HAA, van Raij. B, Quaggio JA and Cantarella H (1997) Leguminosas e Oleaginosas. **Recomendações de adubações e calagem para o Estado de São Paulo** 187–203.
- Araújo AP, Teixeira MG and Almeida DL (2000) Growth and yield of common bean cultivars at two soil phosphorus levels under biological nitrogen fixation. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira** 35:809–817.
- Arf O, Lemos LB, Soratto RP and Ferrari S (2015) Aspectos gerais da cultura do feijão *Phaseolus vulgaris* L. **Botucatu, SP: FEPAF** [Preprint].
- Arteaga S, Yabor L, Torres J, Solbes E, Muñoz E, Díez MJ, Vicente O and Boscaiu M (2019) Morphological and agronomic characterization of spanish landraces of *Phaseolus vulgaris* L. **Agriculture (Switzerland)** 9.
- Attar I, Hnini M, Taha K and Aurag J (2022) Phosphorus Availability and its Sustainable Use. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 5036–5048.

Avican O and Bilgen BB (2022) Investigation of the genetic structure of some common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) commercial varieties and genotypes used as a genitor with SSR and SNP markers. **Genetic Resources and Crop Evolution** 69:2755–2768.

Baig KS, Arshad M, Shaharoona B, Khalid A and Ahmed I (2012) Comparative effectiveness of *Bacillus* spp. possessing either dual or single growth-promoting traits for improving phosphorus uptake, growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Annals of Microbiology** 62:1109–1119.

Balemi T and Negisho K (2012) Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 12:547–561.

Bargaz A, Faghire M, Abdi N, Farissi M, Sifi B, Drevon JJ, Ikbali MC and Ghoulam C (2012) Low soil phosphorus availability increases acid phosphatase activities and affects P partitioning in nodules, seeds and rhizosphere of *Phaseolus vulgaris*. **Agriculture (Switzerland)** 2:139–153.

Bargaz A, Elhaissofi W, Khourchi S, Benmrid B, Borden KA and Rchiad Z (2021) Benefits of phosphate solubilizing bacteria on belowground crop performance for improved crop acquisition of phosphorus. **Microbiological Research** 252:126842.

Barros RLN, Oliveira LB, Magalhães WB, Médici LO and Pimentel C (2018) Interaction of biological nitrogen fixation with sowing nitrogen fertilization on common bean in the two seasons of cultivation in Brazil. **Journal of Plant Nutrition** 41:774–781.

Beebe S, Rao IM, Blair MW and Butare L (2009) Breeding for abiotic stress tolerance in common bean: Present and future challenges. **Australasian Plant Breeding, SABRAO Conference** 14:1–12.

Beebe SE, Rao IM, Cajiao C and Grajales M (2008) Selection for Drought Resistance in Common Bean Also Improves Yield in Phosphorus Limited and Favorable Environments. **Crop Science** 48:582–592.

Beebe SE, Rao IM, Blair MW and Acosta-Gallegos JA (2013) Phenotyping common beans for adaptation to drought. **Frontiers in Physiology** 4 MAR:1–20.

Bitocchi E, Rau D, Bellucci E, Rodriguez M, Murgia ML, Gioia T, Santo D, Nanni L, Attene G and Papa R (2017) Beans (*Phaseolus* spp.) as a model for understanding crop evolution. **Frontiers in Plant Science** 8:1–21.

Boitt G, Schmitt DE, Gatiboni LC, Wakelin SA, Black A, Sacomori W, Cassol PC and Condron LM (2018) Fate of phosphorus applied to soil in pig slurry under cropping in southern Brazil. **Geoderma** 321:164–172.

Boix YF, Dubois AF, Quintero YP, Alemán EI, Victório CP, Aguilera JG, Betancourt MN and Morales-Aranibar L (2023) Magnetically Treated Water in *Phaseolus vulgaris* L.: An Alternative to Develop Organic Farming in Cuba. **Plants** 12:340.

Bouras H, Bouaziz A, Choukr-Allah R, Hirich A, Devkota KP and Bouazzama B (2021) Phosphorus fertilization enhances productivity of forage corn (*Zea mays* L.) irrigated with saline water. **Plants** 10.

Bünemann EK (2015) Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus - A review. **Soil Biology and Biochemistry** 89:82–98.

Carbas B, Machado N, Oppolzer D, Ferreira L, Queiroz M, Brites C, Rosa EAS and Barros AIRNA (2020) Nutrients, antinutrients, phenolic composition, and antioxidant activity of common bean cultivars and their potential for food applications. **Antioxidants** 9.

Carbonell SAM, Chiorato AF, Gonçalves JGR, Perina EF and Carvalho CRL (2010) Tamanho de grão comercial em cultivares de feijoeiro. **Ciência Rural** 40:2067–2073.

Carbonell SAM, Chiorato AF, Bezerra LMC, Gonçalves JGR, Rovaris SRS, Gonçalves G de MC and Paulino JF de C (2021) IAC 2051: Common bean cultivar of carioca type with slow seed coat darkening. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 21:1–4.

Carstensen A, Herdean A, Schmidt SB, Sharma A, Spetea C, Pribil M and Husted S (2018) The impacts of phosphorus deficiency on the photosynthetic electron transport chain1[OPEN]. **Plant Physiology** 177:271–284.

Carvalho M da CS, Nascente AS, Ferreira GB, Mutadiua CAP and Denardin JE (2018) Phosphorus and potassium fertilization increase common bean grain yield in Mozambique. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 22:308–314.

Castro-Guerrero NA, Isidra-Arellano MC, Mendoza-Cozatl DG and Valdés-López O (2016) Common Bean: A Legume Model on the Rise for Unraveling Responses and Adaptations to Iron, Zinc, and Phosphate Deficiencies. **Frontiers in Plant Science** 7:391–417.

Chen Q and Liu S (2019) Identification and Characterization of the Phosphate-Solubilizing Bacterium *Pantoea* sp. S32 in Reclamation Soil in Shanxi, China. **Frontiers in Microbiology** 10:1–12.

Chiorato AF, Carbonell SAM, Bezerra LMC, Esteves JAF, Gonçalves JGR, Silva DA, Rovaris SRS, Souza Spitti AMD, Benchimol-Reis LL, Carvalho CRL, Barros VLNP, Freitas RS, Ticelli M and Gallo PB (2020) Iac 1849 polaco: Carioca common bean cultivar with an early maturity and tolerance to seed darkening. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 20:1–4.

Coelho AP, Faria RT, Leal FT, Arruda Barbosa J, Dalri AB and Rosalen DL (2019) Estimation of irrigated oats yield using spectral indices. **Agricultural Water Management** 223:105700.

Coelho AP, Faria RT de, Lemos LB, Rosalen DL and Dalri AB (2022) Yield predict and physiological state evaluation of irrigated common bean cultivars with contrasting growth habits by learning algorithms using spectral indices. **Geocarto International** 0:1–23.

Conab (2023) *Safra - Estimativa de Evolução de Grãos*. Available at: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-estimativa-de-evolucao-graos.html> (Accessed: January 10, 2023).

Degryse F and McLaughlin MJ (2014) Phosphorus Diffusion from Fertilizer: Visualization, Chemical Measurements, and Modeling. **Soil Science Society of America Journal** 78:832–842.

Demay J, Ringeval B, Pellerin S and Nesme T (2023) Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources. **Nature Geoscience** 16.

Dey G, Banerjee P, Sharma RK, Maity JP, Etesami H, Shaw AK, Huang YH, Huang H Bin and Chen CY (2021) Management of phosphorus in salinity-stressed agriculture for sustainable crop production by salt-tolerant phosphate-solubilizing bacteria—a review. **Agronomy** 11.

Dokwal D, Romsdahl TB, Kunz DA, Alonso AP and Dickstein R (2021) Phosphorus deprivation affects composition and spatial distribution of membrane lipids in legume nodules. **Plant Physiology** 185:1847–1859.

Elkoca E, Turan M and Donmez MF (2010) Effects of single, dual and triple inoculations with *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium* and *Rhizobium leguminosarum* bv. phaseoli on nodulation, nutrient uptake, yield and yield parameters of common bean (*phaseolus vulgaris* L. cv. 'Elkoca-05'). **Journal of Plant Nutrition** 33:2104–2119.

Emami S, Alikhani HA, Pourbabaee AA, Etesami H, Sarmadian F, Motesharezadeh B and Taghizadeh–Mehrdadi R (2022) Performance Evaluation of Phosphate-Solubilizing Fluorescent Pseudomonads in Minimizing Phosphorus Fertilizer Use and Improving Wheat Productivity: a Two-Year Field Study. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 22:1224–1237.

Etesami H and Maheshwari DK (2018) Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 156:225–246.

Fageria NK, Stone LF, Santos AB and Carvalho MCS (2015) *Nutrição mineral do feijoeiro*. Brasília: Embrapa Arroz e Feijão.

Fageria NK and Santos AB (2008) Yield physiology of dry bean. **Journal of Plant Nutrition** 31:983–1004.

Faostat (2022) *Crops and livestock products*. Available at: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (Accessed: September 28, 2022).

Fischer P, Pöthig R, Gücker B and Venohr M (2018) Phosphorus saturation and superficial fertilizer application as key parameters to assess the risk of diffuse phosphorus losses from agricultural soils in Brazil. **Science of the Total Environment** 630:1515–1527.

Fiuza DAF, Vitorino LC, Soucie EL, Neto MR, Bessa LA, Silva CF and Trombela NT (2022) Effect of Rhizobacteria Inoculation via Soil and Seeds on *Glycine max* L. Plants Grown on Soils with Different Cropping History. **Microorganisms** 10.

Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE and Tatham RL (2009) *Análise multivariada de dados*. Bookman editora.

- Hakim S, Naqqash T, Nawaz MS, Laraib I, Siddique MJ, Zia R, Mirza MS and Imran A (2021) Rhizosphere Engineering With Plant Growth-Promoting Microorganisms for Agriculture and Ecological Sustainability. **Frontiers in Sustainable Food Systems** 5:1–23.
- Haling RE, Yang Z, Shadwell N, Culvenor RA, Stefanski A, Ryan MH, Sandral GA, Kidd DR, Lambers H and Simpson RJ (2016) Growth and root dry matter allocation by pasture legumes and a grass with contrasting external critical phosphorus requirements. **Plant and Soil** 407:67–79.
- Hegyi A, Nguyen TBK and Posta K (2021) Metagenomic analysis of bacterial communities in agricultural soils from vietnam with special attention to phosphate solubilizing bacteria. **Microorganisms** 9.
- Huang LM, Jia XX, Zhang GL and Shao MA (2017) Soil organic phosphorus transformation during ecosystem development: A review. **Plant and Soil** 417:17–42.
- Kaiser HF (1958) Psychometrika. **Springer The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis** 23:187.
- Kang SM, Radhakrishnan R, You YH, Joo GJ, Lee IJ, Lee KE and Kim JH (2014) Phosphate Solubilizing *Bacillus megaterium* mj1212 Regulates Endogenous Plant Carbohydrates and Amino Acids Contents to Promote Mustard Plant Growth. **Indian Journal of Microbiology** 54:427–433.
- Karavidas I, Ntatsi G, Vougeleka V, Karkanis A, Ntanasi T, Saitanis C, Agathokleous E, Ropokis A, Sabatino L, Tran F, Iannetta PPM and Savvas D (2022) Agronomic Practices to Increase the Yield and Quality of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A Systematic Review. **Agronomy** 12.
- Kargiotidou A, Papathanasiou F, Baxevas D, Vlachostergios DN, Stefanou S and Papadopoulos I (2019) Yield and stability for agronomic and seed quality traits of common bean genotypes under Mediterranean conditions. **Legume Research** 42:308–313.
- Kaschuk G, Auler AC, Vieira CE, Dakora FD, Jaiswal SK and da Cruz SP (2022) 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** 53:2027–2037.
- Korir H, Mungai NW, Thuita M, Hamba Y and Masso C (2017) Co-inoculation effect of rhizobia and plant growth promoting rhizobacteria on common bean growth in a low phosphorus soil. **Frontiers in Plant Science** 8:1–10.
- Kumar R and Shastri B (2017a) Role of Phosphate-Solubilising Microorganisms in Sustainable Agricultural Development. in J.S. Singh and G. Seneviratne (eds.) **Agro-Environmental Sustainability**. Cham: Springer International Publishing 271–303.
- Langhans C, Beusen AHW, Mogollón JM and Bouwman AF (2022) Phosphorus for Sustainable Development Goal target of doubling smallholder productivity. **Nature Sustainability** 5:57–63.

Leal FT, Filla VA, Bettiol JVT, De Sandrini FOT, Mingotte FLC and Lemos LB (2019) Use efficiency and responsivity to nitrogen of common bean cultivars. **Ciencia e Agrotecnologia** 43.

Leggett M, Newlands NK, Greenshields D, West L, Inman S and Koivunen ME (2015) Maize yield response to a phosphorus-solubilizing microbial inoculant in field trials. **Journal of Agricultural Science** 153:1464–1478.

Lichtenthaler HK (1987) Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. **Methods in Enzymology** 148:350–382.

Liu A, Contador CA, Fan K and Lam HM (2018) Interaction and regulation of carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in root nodules of legumes. **Frontiers in Plant Science** 871:1–18.

Losa A, Vorster J, Cominelli E, Sparvoli F, Paolo D, Sala T, Ferrari M, Carbonaro M, Marconi S, Camilli E, Reboul E, Waswa B, Ekesa B, Aragão F and Kunert K (2022) Drought and heat affect common bean minerals and human diet—What we know and where to go. **Food and Energy Security** 11:1–28.

Makoudi B, Kabbadj A, Mouradi M, Amenc L, Domergue O, Blair M, Drevon JJ and Ghoulam C (2018) Phosphorus deficiency increases nodule phytase activity of faba bean–rhizobia symbiosis. **Acta Physiologiae Plantarum** 40:1–10.

Malavolta E, Vitti GC and Oliveira SA (1997) *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2nd ed. Piracicaba: Potafos.

Malhotra H, Vandana, Sharma S and Pandey R (2018) Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess BT - Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance. in M. Hasanuzzaman et al. (eds.). Singapore: Springer Singapore 171–190.

Massucato LR, Almeida SRA, Silva MB, Mosela M, Zeffa DM, Nogueira AF, de Lima Filho RB, Mian S, Higashi AY, Teixeira GM, Shimizu GD, Giacomini RM, Fendrich RC, Faria MV, Scapim CA and Gonçalves LSA (2022) Efficiency of Combining Strains Ag87 (*Bacillus megaterium*) and Ag94 (*Lysinibacillus* sp.) as Phosphate Solubilizers and Growth Promoters in Maize. **Microorganisms** 10:1401.

Meena VS, Maurya BR, Meena SK, Meena RK, Kumar A, Verma JP and Singh NP (2016) Can Bacillus Species Enhance Nutrient Availability in Agricultural Soils? in M.T. Islam et al. (eds.) **Bacilli and Agrobiotechnology**. Cham: Springer International Publishing 367–395.

Menezes-Blackburn D, Jorquera MA, Gianfreda L, Greiner R and Luz Mora M (2014) A novel phosphorus biofertilization strategy using cattle manure treated with phytase-nanoclay complexes. **Biology and Fertility of Soils** 50:583–592.

Mingotte FLC, Jardim CA, Coelho AP, Yada MM, Leal FT, Lemos LB and Fornasier Filho D (2021) Does crop succession and nitrogen splitting fertilization change the technological quality of common bean? **Bragantia** 80:1–10.

Mitrani T, Meena RS, Lal R, Layek J, Kumar S and Datta R (2018) Role of Soil Phosphorus on Legume Production BT - Legumes for Soil Health and Sustainable Management. in R.S. Meena et al. (eds.). Singapore: Springer Singapore 487–510.

Moreira BRA, Viana R da S, Favato VL, de Figueiredo PAM, Lisboa LAM, Miasaki CT, Magalhães AC, Ramos SB, Viana CR de A, Trindade VDR and May A (2020) *Azospirillum brasilense* can impressively improve growth and development of urochloa brizantha under irrigation. **Agriculture (Switzerland)** 10:1–13.

Mortinho ES, Jalal A, Oliveira CES, Fernandes GC, Pereira NCM, Rosa PAL, Do Nascimento V, de Sá ME and Teixeira Filho MCM (2022) Co-Inoculations with Plant Growth-Promoting Bacteria in the Common Bean to Increase Efficiency of NPK Fertilization. **Agronomy** 12:1–15.

Moura AD and Brito LM (2015) Apectos Socioeconômicos. in J.E. Carneiro and T.J.P. Junior (eds.) **Feijão do plantio à colheita**. Viçosa, MG 16–36.

Nunes HD, Leal FT, Mingotte FLC, Damião VD, Junior PAC and Lemos LB (2021) Agronomic performance, quality and nitrogen use efficiency by common bean cultivars. **Journal of Plant Nutrition** 44:995–1009.

Oliveira CA, Alves VMC, Marriel IE, Gomes EA, Scotti MR, Carneiro NP, Guimarães CT, Schaffert RE and Sá NMH (2009) Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado Biome. **Soil Biology and Biochemistry** 41:1782–1787.

Pang J, Ryan MH, Lambers H and Siddique KH (2018) Phosphorus acquisition and utilisation in crop legumes under global change. **Current Opinion in Plant Biology** 45:248–254.

Pereira NCM, Galindo FS, Gazola RPD, Dupas E, Rosa PAL, Mortinho ES and Filho MCMT (2020) Corn Yield and Phosphorus Use Efficiency Response to Phosphorus Rates Associated With Plant Growth Promoting Bacteria. **Frontiers in Environmental Science** 8:1–12.

Perina EF, Carvalho CRL, Chiorato AF, Lopes RLT, Gonçalves JGR and Carbonell SAM (2014) Technological quality of common bean grains obtained in different growing seasons. **Bragantia** 73:14–22.

Prado RM (2021) *Nutrição de plantas*. Unesp.

Proctor JR and Watts BM (1987) Development of a Modified Mattson Bean Cooker Procedure Based on Sensory Panel Cookability Evaluation. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal** 20:9–14.

Rady MM, El-Shewy AA, El-Yazal MAS and El-Gawwad IFMA (2020) Integrative Application of Soil P-Solubilizing Bacteria and Foliar Nano P Improves Phaseolus vulgaris Plant Performance and Antioxidative Defense System Components under Calcareous Soil Conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 20:820–839.

Van Raij B. (2001) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Edited by B. V. Raij et al. Campinas: Instituto Agrônômico.

Van Raij B. (2011) *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. International Plant Nutrition Institute.

Rainey KM and Griffiths PD (2005) Differential response of common bean genotypes to high temperature. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 130:18–23.

Ramírez CA and Kloepper JW (2010) Plant growth promotion by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB45 depends on inoculum rate and P-related soil properties. **Biology and Fertility of Soils** 46:835–844.

Rawat P, Das S, Shankhdhar D and Shankhdhar SC (2021) Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 21:49–68.

Rawat P, Shankhdhar D and Shankhdhar SC (2022) Synergistic Impact of Phosphate Solubilizing Bacteria and Phosphorus Rates on Growth, Antioxidative Defense System, and Yield Characteristics of Upland Rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Plant Growth Regulation** 41:2449–2461.

Raymond NS, Gómez-Muñoz B, Bom FJT van der, Nybroe O, Jensen LS, Müller-Stöver DS, Oberson A and Richardson AE (2021) Phosphate-solubilising microorganisms for improved crop productivity: a critical assessment. **New Phytologist** 229:1268–1277.

Reinprecht Y, Schram L, Marsolais F, Smith TH, Hill B and Pauls KP (2020) Effects of Nitrogen Application on Nitrogen Fixation in Common Bean Production. **Frontiers in Plant Science** 11:1–19.

Reis MNO, Vitorino LC, Lourenço LL and Bessa LA (2022) Microbial Inoculation Improves Growth, Nutritional and Physiological Aspects of Glycine max (L.) Merr. **Microorganisms** 10.

Rheinheimer DS, Fornari MR, Bastos MC, Fernandes G, Santanna MA, Calegari A, Canalli LBS, Caner L, Labanowski J and Tiecher T (2019) Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. **Soil and Tillage Research** 192:33–41.

Ribeiro ND and Kläsener GR (2020) Physical quality and mineral composition of new Mesoamerican bean lines developed for cultivation in Brazil. **Journal of Food Composition and Analysis** 89:103479.

Ribeiro VP, Marriel IE, Sousa SM, Lana UG de P, Mattos BB, Oliveira CA and Gomes EA (2018) Endophytic *Bacillus strains* enhance pearl millet growth and nutrient uptake under low-P. **Brazilian Journal of Microbiology** 49:40–46.

Ribeiro VP, Gomes EA, Sousa SM, Paula Lana UG, Coelho AM, Marriel IE and Paiva CAO (2022) Co-inoculation with tropical strains of *Azospirillum* and *Bacillus* is more efficient than single inoculation for improving plant growth and nutrient uptake in maize. **Archives of Microbiology** 204:1–13.

Richardson AE, Lynch JP, Ryan PR, Delhaize E, Smith FA, Smith SE, Harvey PR, Ryan MH, Veneklaas EJ, Lambers H, Oberson A, Culvenor RA and Simpson RJ (2011) Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant and Soil** 349:121–156.

Ringeval B, Augusto L, Monod H, van Apeldoorn D, Bouwman L, Yang X, Achat DL, Chini LP, Van Oost K, Guenet B, Wang R, Decharme B, Nesme T and Pellerin S (2017) Phosphorus in agricultural soils: drivers of its distribution at the global scale. **Global Change Biology** 23:3418–3432.

Roberts TL and Johnston AE (2015) Phosphorus use efficiency and management in agriculture. **Resources, Conservation and Recycling** 105:275–281.

Rosa PAL, Mortinho ES, Jalal A, Galindo FS, Buzetti S, Fernandes GC, Barco Neto M, Pavinato PS and Filho MCMT (2020) Inoculation With Growth-Promoting Bacteria Associated With the Reduction of Phosphate Fertilization in Sugarcane. **Frontiers in Environmental Science** 8.

Rosa PAL, Mortinho ES, Jalal A, Galindo FS, Buzetti S, Fernandes GC, Neto MB, Pavinato PS and Teixeira Filho MCM (2020) Inoculation With Growth-Promoting Bacteria Associated With the Reduction of Phosphate Fertilization in Sugarcane. **Frontiers in Environmental Science** 8.

Rose TJ, Hardiputra B and Rengel Z (2010) Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. **Plant and Soil** 326:159–170.

Roy ED, Richards PD, Martinelli LA, Coletta L Della, Lins SRM, Vazquez FF, Willig E, Spera SA, VanWey LK and Porder S (2016) The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants** 2:2–7.

Saeid A, Prochownik E and Dobrowolska-Iwanek J (2018) Phosphorus solubilization by *Bacillus* species. **Molecules** 23:1–18.

Santos GG dos, Ribeiro ND and Maziero SM (2016) Evaluation of common bean morphological traits identifies grain thickness directly correlated with cooking time. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 46:35–42.

Shamseldin A and Velázquez E (2020) The promiscuity of *Phaseolus vulgaris* L. (common bean) for nodulation with rhizobia: a review. **World Journal of Microbiology and Biotechnology** 36:1–12.

Sharma SB, Sayyed RZ, Trivedi MH and Gobi TA (2013) Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus** 2:1–14.

Sheng M, Tang M, Chen H, Yang B, Zhang F and Huang Y (2008) Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. **Mycorrhiza** 18:287–296.

Shirmohammadi E, Alikhani HA, Pourbabaei AA and Etesami H (2020) Improved Phosphorus (P) Uptake and Yield of Rainfed Wheat Fed with P Fertilizer by Drought-Tolerant Phosphate-Solubilizing Fluorescent *Pseudomonads* Strains: a Field Study in Drylands. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 20:2195–2211.

Shome S, Barman A and Solaiman ZM (2022) *Rhizobium* and Phosphate Solubilizing Bacteria Influence the Soil Nutrient Availability, Growth, Yield, and Quality of Soybean. **Agriculture** 12:1136.

Sousa SM, Oliveira CA, Andrade DL, Carvalho CG, Ribeiro VP, Pastina MM, Marriel IE, Paula Lana UG and Gomes EA (2021) Tropical *Bacillus* Strains Inoculation Enhances Maize Root Surface Area, Dry Weight, Nutrient Uptake and Grain Yield. **Journal of Plant Growth Regulation** 40:867–877.

Sousa WS, Soratto RP, Peixoto DS, Campos TS, Silva MB, Souza AGV, Teixeira IR and Gitari HI (2022) Effects of Rhizobium inoculum compared with mineral nitrogen fertilizer on nodulation and seed yield of common bean. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development** 42.

Sousa WS, Teixeira IR, Souza Campos T, Silva GC, Silva MB and Moreira SG (2022) Supplementary reinoculation in topdressing of *Rhizobium tropici* in common bean crop: effects on nodulation, morphology, and grain yield. **Journal of Plant Nutrition** 45:3094–3108.

Souza JEB and Ferreira EPB (2017) Improving sustainability of common bean production systems by co-inoculating rhizobia and azospirilla. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 237:250–257.

Sözer Bahadır P, Liaqat F and Eltem R (2018) Plant growth promoting properties of phosphate solubilizing *Bacillus* species isolated from the Aegean Region of Turkey. **Turkish Journal of Botany** 42:183–196.

Spaepen S, Vanderleyden J and Remans R (2007) Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. **FEMS Microbiology Reviews** 31:425–448.

Sulieman S and Tran LSP (2015) Phosphorus homeostasis in legume nodules as an adaptive strategy to phosphorus deficiency. **Plant Science** 239:36–43.

Tesfaye M, Liu J, Allan DL and Vance CP (2007) Genomic and genetic control of phosphate stress in legumes. **Plant Physiology** 144:594–603.

Tiecher TL, Lourenzi CR, Girotto E, Tiecher T, Conti L, Marques ACR, Silva LOS, Marchezan C, Brunetto G and Ceretta CA (2020) Phosphorus forms leached in a sandy Typic Hapludalf soil under no-tillage with successive pig slurry applications. **Agricultural Water Management** 242:106406.

Timofeeva A, Galyamova M and Sedykh S (2022) Prospects for Using Phosphate-Solubilizing Microorganisms as Natural Fertilizers in Agriculture. **Plants** 11:1–23.

Tirfessa T, Jalata Z and Lamessa K (2022) Influence of blended NPSB fertilizer on nodulation and yield performance of Rhizobium inoculated common bean varieties in acidic soil, western Ethiopia. **All Life** 15:1290–1303.

Tsavkelova EA, Klimova SY, Cherdyntseva TA and Netrusov AI (2006) Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: A review. **Applied Biochemistry and Microbiology** 42:117–126.

Velloso CCV, Oliveira CA, Gomes EA, Paula Lana UG, Carvalho CG, Guimaraes LJM, Pastina MM and Sousa SM (2020) Genome-guided insights of tropical *Bacillus* strains efficient in maize growth promotion. **FEMS Microbiology Ecology** 96:1–16.

Vougeleka V, Savvas D, Ntatsi G, Ellinas G, Zacharis A, Iannetta PPM, Mylona P and Saitanis CJ (2023) Impact of the rootstock genotype on the performance of grafted common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. **Scientia Horticulturae** 311:111821.

Wang J, Chen Y, Wang P, Li YS, Wang G, Liu P and Khan A (2018) Leaf gas exchange, phosphorus uptake, growth and yield responses of cotton cultivars to different phosphorus rates. **Photosynthetica** 56:1414–1421.

Weller JL, Vander Schoor JK, Perez-Wright EC, Hecht V, González AM, Capel C, Yuste-Lisbona FJ, Lozano R and Santalla M (2019) Parallel origins of photoperiod adaptation following dual domestications of common bean. **Journal of Experimental Botany** 70:1209–1219.

Wilker J, Navabi A, Rajcan I, Marsolais F, Hill B, Torkamaneh D and Pauls KP (2019) Agronomic Performance and Nitrogen Fixation of Heirloom and Conventional Dry Bean Varieties Under Low-Nitrogen Field Conditions. **Frontiers in Plant Science** 10:1–21.

Wyciszkievicz M, Saeid A, Dobrowolska-Iwanek J and Chojnacka K (2016) Utilization of microorganisms in the solubilization of low-quality phosphorus raw material. **Ecological Engineering** 89:109–113.

Yang P, Zhou XF, Wang LL, Li QS, Zhou T, Chen YK, Zhao ZY and He BY (2018) Effect of phosphate-solubilizing bacteria on the mobility of insoluble cadmium and metabolic analysis. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 15:1–12.

Zhang Z, Zhu L, Li D, Wang N, Sun H, Zhang Y, Zhang K, Li A, Bai Z, Li C and Liu L (2021) In situ Root Phenotypes of Cotton Seedlings Under Phosphorus Stress Revealed Through RhizoPot. **Frontiers in Plant Science** 12:1–15.

Zhu J, Li M and Whelan M (2018) Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of the Total Environment** 612:522–537.

Zutter N, Ameye M, Vermeir P, Verwaeren J, De Gelder L and Audenaert K (2022) Innovative Rhizosphere-Based Enrichment under P-Limitation Selects for Bacterial Isolates with High-Performance P-Solubilizing Traits. **Microbiology Spectrum** [Preprint].

Zutter N, Ameye M, Bekaert B, Verwaeren J, De Gelder L and Audenaert K (2022) Uncovering New Insights and Misconceptions on the Effectiveness of Phosphate Solubilizing Rhizobacteria in Plants: A Meta-Analysis. **Frontiers in Plant Science** 13:1–14.