

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS - CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO – PPGPV

FELIPE RECK BENATO

EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO

LAGES

2023

FELIPE RECK BENATO

EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Luís Meirelles Coimbra.

Coorientador: Prof Paulo Cezar Cassol.

LAGES

2023

FELIPE RECK BENATO

EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Luís Meirelles Coimbra.

Coorientador: Prof Paulo Cezar Cassol.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. Jefferson Luís Meirelles Coimbra
CAV/UDESC

Membros:

Jefferson Luís Meirelles Coimbra
CAV/UDESC

Altamir Frederico Guidolin
CAV/UDESC

Dediel Rocha
EPAGRI

Lages, 29 de Setembro de 2023

Aos estudantes da Universidade do Estado de
Santa Catarina, pela inspiração de sempre!.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa. A todos os meus professores do curso de da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc pela excelência da qualidade técnica de cada um.

Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória. Sou grato à minha família pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida.

Como disse Snoop Dog: “Eu quero me agradecer por acreditar em mim mesmo, quero me agradecer por todo esse trabalho duro. Quero me agradecer por não tirar folgas. Quero me agradecer por nunca desistir. Quero me agradecer por ser generoso e sempre dar mais do que recebo. Quero me agradecer por tentar sempre fazer mais o certo do que o errado. Quero me agradecer por ser eu mesmo o tempo inteiro”.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador pelo incentivo e pela dedicação do seu escasso tempo ao meu projeto de pesquisa.

“Eu não falhei, encontrei 10 mil soluções que não davam certo.” (Edison, [19--])

RESUMO

Programas de melhoramento genético tem desenvolvido com êxito cultivares de feijão com alto potencial produtivo, preconizando a seleção de constituições genotípicas aprimoradas à variável rendimento de grãos. Porém, dada a importância do desenvolvimento de cultivares com características adaptativas a condições adversas de cultivo como em situações de estresse hídrico ou nutricional, demais características fenotípicas passaram a ser consideradas importantes em programas de melhoramento. O objetivo deste trabalho foi caracterizar genótipos de feijão quanto a eficiência na utilização de fósforo visando a identificação de genótipos superiores para posterior inclusão em blocos de cruzamentos. Adicionalmente, buscou-se verificar a existência de comportamento diferencial entre os grupos comerciais tipo preto e tipo cores à eficiência na utilização de fósforo. Foi utilizado delineamento de blocos casualizados com três repetições, em esquema fatorial genótipo x doses de fósforo (8 x 3). A eficiência na utilização de fósforo foi avaliada por meio da responsividade ao fornecimento de fósforo pelo método de Blair e Cordeiro (1978) que consiste na relação entre a massa seca da parte aérea (g) e a unidade de fósforo aplicado (ppm). A seleção dos genótipos responsivos foi realizada com base na significância do coeficiente de regressão a partir do ajuste de uma curva-resposta entre a massa seca da parte aérea e a unidade de fósforo aplicado, seguida da verificação da heterogeneidade das linhas de regressão linear simples entre os genótipos que revelaram-se responsivos pelo teste t segundo o método de Steel e Torrie (1960). O comportamento diferencial entre grupos comerciais para a eficiência na utilização de fósforo foi avaliada através da realização de contrastes ortogonais. Os acessos BAF 209, BAF 53 e a cultivar PÉROLA foram classificados como responsivos ao fornecimento de fósforo. A análise de heterogeneidade entre as linhas de regressão revelou que os genótipos responsivos não diferem estatisticamente pelo teste t. Portanto, tanto os acessos BAF 209, BAF 53 como a cultivar PÉROLA podem ser indicados em blocos de cruzamentos no intuito de desenvolver genótipos eficientes na utilização de fósforo. Há diferença no comportamento entre grupos comerciais à eficiência na utilização de fósforo. Genótipos do grupo comercial tipo cores tendem a ser mais eficientes na utilização de fósforo que genótipos do grupo comercial preto.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L. Variabilidade genética. Estresses abióticos.

ABSTRACT

Genetic improvement programs have successfully developed bean cultivars with high productive potential, recommending the selection of genotypic constitutions improved to the variable grain yield (SILVA et al., 2013; PERREIRA et al., 2016). However, given the importance of developing cultivars with adaptive characteristics to adverse growing conditions such as in situations of water or nutritional stress, other phenotypic variables have come to be considered important in breeding programs. The objective of this work was to characterize bean accessions and cultivars regarding the efficiency in the use of phosphorus aiming at the identification of superior genotypes for later inclusion in crossing blocks, as well as to characterize the behavior of phosphorus use efficiency in relation with commercial groups. The experimental design was randomized complete blocks with three replications. The efficiency in the use of phosphorus was evaluated by means of the responsiveness to phosphorus supply by the method of Blair and Cordeiro (1978), which consists of the ratio between the dry mass of the aerial part (g) and the unit of applied phosphorus (ppm). The selection of the responsive genotypes was performed based on the significance of the regression coefficient from the adjustment of a response curve between the dry mass of the aerial part and the unit of phosphorus applied, followed by the verification of the heterogeneity of the simple linear regression lines between the genotypes that proved to be responsive by the t-test according to the method of Steel and Torrie (1960). The differential behavior between commercial groups for the efficiency in the use of phosphorus was evaluated by performing orthogonal contrasts. The accessions BAF 209, BAF 53 and the cultivar PÉROLA were classified as responsive to phosphorus supply. The analysis of heterogeneity between the regression lines revealed that the responsive genotypes did not differ statistically by the t-test. Therefore, both the accessions BAF 209, BAF 53 and the cultivar PÉROLA can be indicated in crossbreeding blocks in order to develop efficient genotypes in the use of phosphorus. There is a difference in the behavior between commercial groups in terms of phosphorus utilization efficiency. Genotypes of the commercial group of color type tend to be more efficient in the use of phosphorus than genotypes of the black commercial group.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L. Genetic variability. Abiotic stresses.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	15
2	EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO.....	17
2.1	RESUMO.....	17
2.2	ABSTRACT	18
2.3	INTRODUÇÃO	19
2.4	MATERIAL E MÉTODOS	20
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
2.6	CONCLUSÃO.....	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os estresses abióticos são definidos como qualquer restrição externa e interna não ocasionada por organismos vivos que limita a formação e conversão de energia de uma planta em biomassa (ATAFAZAR *et al.*, 2009) como déficit hídrico, salinidade, temperaturas extremas e estresses nutricionais. (ZHANG *et al.*, 2022). Dentre os estresses abióticos, os estresses nutricionais ocasionados pela infertilidade do solo são um dos principais obstáculos enfrentados pelos produtores de feijão no país (PINOTTI, 2023). Entre os nutrientes envolvidos com este tipo de estresse, o que mais limita o desenvolvimento das principais culturas agrícolas é o fósforo.

Isto acontece devido ao fato de que a quantidade de fósforo disponível em grande parte dos solos ao redor do planeta é baixa (MCDOWELL *et al.*, 2023). A principal causa disto é a alta capacidade de fixação do fósforo no solo em virtude das características físico-químicas que refletem a interação do fosfato com componentes do solo (ELHAISSOUFI *et al.*, 2022). Isto acaba afetando sua disponibilidade, bem como a dinâmica de movimentação deste elemento no solo. Pois, mesmo sendo fornecido através da adubação fosfatada, ele tende a ficar retido nas camadas mais superficiais.

Como consequência, em torno de apenas 10 a 25% do fósforo aplicado no solo é absorvido pelas plantas (TANG *et al.*, 2022). Desta maneira, a sobrecarga do solo com fertilizantes fosfatados torna-se ineficiente, dispendiosa, bem como promove lixiviação do fósforo para sistemas hídricos. Aumentando assim o risco de eutrofização e ocasionando impactos ambientais significativos (GATIBONI, 2020). Estima-se que cerca de 5,7 bilhões de hectares de área cultivada ao redor do planeta são deficientes em fósforo (NIU *et al.*, 2013), afetando em torno de 30% das áreas agrícolas ao redor do planeta (FAN *et al.*, 2022).

Além disso, há um crescente número de estudos que apontam um provável esgotamento das reservas mundiais de rochas fosfáticas entre os próximos 50-100 anos. Estes estudos estimam que em meados de 2050, a demanda mundial de fósforo duplique em consequência da necessidade de incremento na produção de alimentos, podendo ocorrer um pico na produção de fertilizantes fosfatados nos próximos 30 anos. Isto levaria a uma possível exaustão a níveis globais das fontes extraíveis de fosfato, afetando significativamente os cultivos de produção agrícola ao redor do planeta (CORDELL; WHITE 2011; BINDRABAN *et al.*, 2020).

À vista disso, o desenvolvimento de novas cultivares eficientes na utilização de fósforo torna-se primordial para o enfrentamento destes desafios (MOGOLLÓN *et al.*, 2021). A eficiência na utilização de fósforo pode ser verificada através da concentração de fósforo nos

tecidos vegetais. No entanto, as análises nutricionais de tecidos vegetais é uma prática onerosa e dispendiosa. Sendo assim, uma estratégia para os melhoristas seria a utilização de seleção indireta através de outro caráter correlacionado, agilizando o processo de seleção (MACHADO; FURLANI, 2004). O potencial de acúmulo de massa seca da parte aérea é um dos caracteres mais determinantes para a verificação da eficiência na utilização de fósforo (PEREIRA *et al.*, 2013). Na cultura do feijão, existe uma alta correlação genética para o caráter massa seca da parte aérea com o conteúdo total de fósforo absorvido (ARAÚJO *et al.*, 2005). Desta maneira, a seleção de genótipos com maior acúmulo de massa seca da parte aérea em feijão resulta indiretamente na seleção de genótipos com maiores teores de fósforo.

Isto se deve em parte pela pleiotropia, onde genes que influenciam um caráter, também atuam na manifestação de outro caráter. Um caráter correlacionado pode, portanto, ser auxílio à seleção visando a mudança do caráter com o qual está correlacionado (FALCONER; MACKAY, 1996). Para a eficácia da seleção indireta, o caráter correlacionado deve possuir alta herdabilidade e pouca influência ambiental para não afetar os ganhos de seleção posteriormente (SANTOS *et al.*, 2018). A herdabilidade do caráter massa seca na cultura do feijão é considerada altamente herdável, com valores variando entre 68,2 a 86 % (FAWOLE *et al.*, 1982). Enquanto a herdabilidade para o conteúdo total de fósforo na cultura do feijão varia entre 42 a 51% (ARAÚJO *et al.*, 2005). Desta maneira, há maior probabilidade de ganhos genéticos com a seleção indireta para eficiência na utilização de fósforo através da seleção para o caráter massa seca da parte aérea.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi caracterizar genótipos de feijão quanto a eficiência na utilização de fósforo visando a identificação de genótipos superiores para posterior inclusão em blocos de cruzamentos, além de verificar a existência de comportamento diferencial entre grupos comerciais em acessos e cultivares de feijão para a eficiência na utilização de fósforo.

2 EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO

2.1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi caracterizar genótipos de feijão quanto a eficiência na utilização de fósforo visando a identificação de genótipos superiores para posterior inclusão em blocos de cruzamentos. Adicionalmente, buscou-se verificar a existência de comportamento diferencial entre os grupos comerciais tipo preto e tipo cores à eficiência na utilização de fósforo. Foi utilizado delineamento de blocos casualizados com três repetições, em esquema fatorial genótipo x doses de fósforo (8 x 3). A eficiência na utilização de fósforo foi avaliada por meio da responsividade ao fornecimento de fósforo pelo método de Blair e Cordeiro (1978) que consiste na relação entre a massa seca da parte aérea (g) e a unidade de fósforo aplicado (ppm). A seleção dos genótipos responsivos foi realizada com base na significância do coeficiente de regressão a partir do ajuste de uma curva-resposta entre a massa seca da parte aérea e a unidade de fósforo aplicado, seguida da verificação da heterogeneidade das linhas de regressão linear simples entre os genótipos que revelaram-se responsivos pelo teste t segundo o método de Steel e Torrie (1960). O comportamento diferencial entre grupos comerciais para a eficiência na utilização de fósforo foi avaliada através da realização de contrastes ortogonais. Os acessos BAF 209, BAF 53 e a cultivar PÉROLA foram classificados como responsivos ao fornecimento de fósforo. A análise de heterogeneidade entre as linhas de regressão revelou que os genótipos responsivos não diferem estatisticamente pelo teste t. Portanto, tanto os acessos BAF 209, BAF 53 como a cultivar PÉROLA podem ser indicados em blocos de cruzamentos no intuito de desenvolver genótipos eficientes na utilização de fósforo. Há diferença no comportamento entre grupos comerciais à eficiência na utilização de fósforo. Genótipos do grupo comercial tipo cores tendem a ser mais eficientes na utilização de fósforo que genótipos do grupo comercial preto.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L. Variabilidade genética. Estresses abióticos.

2.2 ABSTRACT

The objective of this study was to characterize bean genotypes in terms of phosphorus utilization efficiency in order to identify superior genotypes for later inclusion in crossbreeding blocks. In addition, it was sought to verify the existence of differential behavior between the black and color type commercial groups to the efficiency in the use of phosphorus. A randomized block design with three replications was used, in a factorial scheme genotype x phosphorus doses (8 x 3). Efficiency in the use of phosphorus was evaluated by means of the responsiveness to phosphorus supply by the Blair method and Cordeiro (1978) which consists of the relationship between the dry mass of the shoot (g) and the unit of applied phosphorus (ppm). The selection of responsive genotypes was based on the significance of the regression coefficient from the adjustment of a response curve between the mass dry of the shoot and the unit of phosphorus applied, followed by the verification of the simple linear regression's heterogeneity lines between responsive genotypes verified by t test, using Steel & Torrie (1960) method. The differential behavior between commercial groups for the efficiency in the use of phosphorus was evaluated by performing orthogonal contrasts. The accessions BAF 209, BAF 53 and the cultivar PÉROLA were classified as responsive to phosphorus supply. The analysis of heterogeneity between the regression lines revealed that the responsive genotypes did not differ statistically by the t-test. Therefore, both the accessions BAF 209, BAF 53 and the cultivar PÉROLA can be indicated in crossbreeding blocks in order to develop efficient genotypes in the use of phosphorus. There is a difference in the behavior between commercial groups in terms of phosphorus utilization efficiency. Genotypes of the commercial group of color type tend to be more efficient in the use of phosphorus than genotypes of the black commercial group.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L. Genetic variability. Abiotic stresses.

2.3 INTRODUÇÃO

Os estresses abióticos são definidos como qualquer restrição externa e interna não ocasionada por organismos vivos que limita a formação e conversão de energia de uma planta em biomassa (ATAFAZAR et al., 2009) como déficit hídrico, salinidade, temperaturas extremas e estresses nutricionais. (ZHANG et al., 2022). Dentre os estresses abióticos, os estresses nutricionais ocasionados pela infertilidade do solo são um dos principais obstáculos enfrentados pelos produtores de feijão no país (PINOTTI, 2023). Entre os nutrientes envolvidos com este tipo de estresse, o que mais limita o desenvolvimento das principais culturas agrícolas é o fósforo.

Isto acontece devido ao fato de que a quantidade de fósforo disponível em grande parte dos solos ao redor do planeta é baixa (MCDOWELL et al, 2023). A principal causa disto é a alta capacidade de fixação do fósforo no solo em virtude das características físico-químicas que refletem a interação do fosfato com componentes do solo (ELHAISSOUFI et al., 2022). Isto acaba afetando sua disponibilidade, bem como a dinâmica de movimentação deste elemento no solo. Pois, mesmo sendo fornecido através da adubação fosfatada, ele tende a ficar retido nas camadas mais superficiais.

Como consequência, em torno de apenas 10 a 25% do fósforo aplicado no solo é absorvido pelas plantas (TANG et al., 2022). Desta maneira, a sobrecarga do solo com fertilizantes fosfatados torna-se ineficiente, dispendiosa, bem como promove lixiviação do fósforo para sistemas hídricos. Aumentando assim o risco de eutrofização e ocasionando impactos ambientais significativos (GATIBONI, 2020). Estima-se que cerca de 5,7 bilhões de hectares de área cultivada ao redor do planeta são deficientes em fósforo (NIU et al., 2013), afetando em torno de 30% das áreas agrícolas ao redor do planeta (FAN et al., 2022).

Além disso, há um crescente número de estudos que apontam um provável esgotamento das reservas mundiais de rochas fosfáticas entre os próximos 50-100 anos. Estes estudos 4 estimam que em meados de 2050, a demanda mundial de fósforo duplique em consequência da necessidade de incremento na produção de alimentos, podendo ocorrer um pico na produção de fertilizantes fosfatados nos próximos 30 anos. Isto levaria a uma possível exaustão a níveis globais das fontes extraíveis de fosfato, afetando significativamente os cultivos de produção agrícola ao redor do planeta (CORDELL; WHITE 2011; BINDRABAN et al., 2020).

À vista disso, o desenvolvimento de novas cultivares eficientes na utilização de fósforo torna-se primordial para o enfrentamento destes desafios (MOGOLLÓN et al., 2021). A eficiência na utilização de fósforo pode ser verificada através da concentração de fósforo nos

tecidos vegetais. No entanto, as análises nutricionais de tecidos vegetais é uma prática onerosa e dispendiosa. Sendo assim, uma estratégia para os melhoristas seria a utilização de seleção indireta através de outro caráter correlacionado, agilizando o processo de seleção (MACHADO; FURLANI, 2004). O potencial de acúmulo de massa seca da parte aérea é um dos caracteres mais determinantes para a verificação da eficiência na utilização de fósforo (PEREIRA et al., 2013). Na cultura do feijão, existe uma alta correlação genética para o caráter massa seca da parte aérea com o conteúdo total de fósforo absorvido (ARAÚJO et al., 2005). Desta maneira, a seleção de genótipos com maior capacidade de acúmulo de massa seca da parte aérea em feijão resulta indiretamente na seleção de genótipos com maiores teores de fósforo.

Já foi detectado comportamento diferencial entre grupos comerciais para características como diâmetro do hipocótilo, arquitetura de planta (POSSOBOM, 2018), teor de proteínas e fibras (RIBEIRO et al., 2005). No entanto, devido a natureza recente dos estudos apontando uma possível escassez das rochas fosfáticas, ainda há poucas informações referentes aos componentes de eficiência na utilização de fósforo na cultura do feijão.

Nesse sentido o objetivo deste trabalho foi caracterizar genótipos de feijão quanto a eficiência na utilização de fósforo visando a identificação de genótipos superiores para posterior inclusão em blocos de cruzamentos, além de verificar a existência de comportamento 5 diferencial entre grupos comerciais em acessos e cultivares de feijão para a eficiência na utilização de fósforo

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação pertencente ao Instituto de Melhoramento e Genética Molecular (IMEGEM), nas dependências da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), no município de Lages-SC entre os meses de julho a setembro de 2022. Foram avaliados oito genótipos fixos de feijão, constituídos geneticamente por linhas puras com elevado nível de homozigose. Sendo eles quatro cultivares (CAVIANO, IPR 88 UIRAPURU, PEROLA e BRS EMBAIXADOR) e quatro acessos (BAF 07, BAF 50, BAF 53, BAF 209) oriundos do Banco de Germoplasma do Instituto de Melhoramento e Genética Molecular (Tabela 1), os quais foram submetidos a três níveis de fósforo (31 ppm, 62 ppm e 93 ppm).

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, com três repetições, arranjado em um esquema fatorial 8x3, composto pela combinação dos fatores genótipo (fator qualitativo específico estruturado) e dose de fósforo (fator quantitativo), totalizando 24

tratamentos. Cada unidade experimental foi composta por duas unidades amostrais, totalizando 144 unidades observacionais. As unidades experimentais foram compostas por recipientes plásticos com capacidade para cinco litros, preenchidos com areia de granulometria fina. O fornecimento de macro e micronutrientes foi realizado com base na solução nutritiva de Hoagland (1935). Para o fornecimento do fósforo foram utilizadas as concentrações de 31 ppm (metade da dose recomendada), 62 ppm (dose recomendada) e 93 ppm (dobro da dose recomendada) em forma de fosfato monopotássico (KH_2PO_4).

A solução nutritiva foi fornecida semanalmente a partir do estágio fenológico V1 (cotilédones ao nível do solo) de acordo com escala fenológica proposta por Gepts & Fernández (1982). No primeiro tratamento, as plântulas foram submetidas à metade da concentração recomendada para todos os nutrientes, incluindo para as doses de fósforo citadas acima com o intuito de aclimatar as plântulas, bem como evitar um possível estresse salino e 7 consequentemente danos osmóticos em nível celular. A retirada das plantas para análise foi realizada no estágio V4-4 quando o quarto trifólio demonstrou-se completamente expandido. Considerou-se esse estágio quando o quarto trifólio apresentava-se completamente aberto. Este estágio fenológico foi definido em razão da alta acumulação de macro e micronutrientes na parte aérea durante este estágio (MAMBRIN et al., 2021), bem como neste estágio, independente do hábito de crescimento, ainda não houve diferenciação floral, o que poderia interferir no método utilizado para verificar a eficiência na utilização de fósforo.

A eficiência na utilização de fósforo foi avaliada através da responsividade ao fornecimento de fósforo pelo método de Blair & Cordeiro (1978) que consiste no ajustamento de uma curva resposta entre a massa seca da parte aérea (g) e a unidade de fósforo aplicado (ppm). A indicação dos genótipos responsivos foi realizada com base na significância do coeficiente de regressão polinomial de primeiro grau a partir de análise de regressão linear simples. Posteriormente, foi verificada a heterogeneidade entre as linhas de regressão dos genótipos que revelaram-se responsivos pelo teste t através do método de Steel & Torrie (1960). A verificação de existência de comportamento diferencial entre grupos comerciais à eficiência na utilização de fósforo foi realizada através do desdobramento do efeito principal de genótipo a partir da realização de contrastes ortogonais entre e dentro das cultivares e dos acessos, com o agrupamento dos genótipos a partir dos seus respectivos grupos comerciais; tipo preto e tipo cores.

As análises de massa seca da parte aérea (MSPA) foram realizadas após a secagem das amostras, até peso constante, em estufa, por 72 horas, a 60°C, com circulação forçada de ar com o auxílio de balança digital de precisão, com grau de precisão de 0,001g.

A equação do modelo estatístico utilizada foi $Y = \mu + \text{bloco} + \text{genótipo} + \text{dose} + \text{genótipo} * \text{dose} + \text{erro experimental} + \text{erro observacional}$. O efeito de genótipo foi considerado como fixo, pois este fator foi caracterizado como qualitativo e específico, sendo assim, as inferências são exclusivamente específicas para cada genótipo. O efeito de dose, também foi considerado como fixo, pois as inferências e conclusões foram específicas para o intervalo considerado (31 ppm a 93 ppm). A variabilidade genética (σ_g^2) e a herdabilidade no sentido amplo (h^2) foram estimadas através do método dos mínimos quadrados segundo Cruz et al (2012).

Para a realização da análise de variância foi utilizado o Modelo Linear Geral (GLM) com o auxílio do programa SAS OnDemand For Academics. As hipóteses foram testadas pela análise de variância univariada (univariate analysis of variance) a 5% de probabilidade de erro. Para verificar o atendimento às pressuposições da análise de variância referente a normalidade dos resíduos, os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk. Enquanto que a homogeneidade de variância foi verificada através do teste de Obrien.

Tabela 1 - Genótipos utilizados no experimento com suas respectivas características

Genótipo	Pool gênico	Grupo comercial	Classificação
BAF 07	Mesoamericano	Tipo Preto	Acesso
BAF 50	Mesoamericano	Tipo Cores	Acesso
BAF 209	Mesoamericano	Tipo Preto	Acesso
BAF 53	Andino	Tipo Cores	Acesso
CAVIANO	Mesoamericano	Tipo Preto	Cultivar
IPR UIRAPURU	Mesoamericano	Tipo Preto	Cultivar
PÉROLA	Mesoamericano	Tipo Cores	Cultivar
BRS			
EMBAIXADOR	Andino	Tipo Cores	Cultivar

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de análise de variância para o caráter massa seca da parte aérea (MSPA) são apresentados na Tabela 2. Esses resultados apontam que houve diferenças estatísticas para os efeitos de genótipo e dose, bem como para a interação genótipo x dose. Desta maneira, verifica-se que há uma relação de dependência entre os genótipos com as doses empregadas. O coeficiente de variação experimental apresentou valores dentro do aceitável para esse tipo de estudo, o que indica boa precisão experimental e confiabilidade nas estimativas.

Tabela 2 - Análise de variância com os quadrados médios e significância do teste F para o caráter massa seca da parte aérea (MSPA), com o desdobramento dos graus de liberdade para as fontes de variação de tratamento conforme esquema fatorial. Também são apresentados o coeficiente de variação (CV), coeficiente de determinação (R^2), média geral (\bar{X}), variância genética (σ_g^2) e herdabilidade no sentido amplo (h^2)

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio
Bloco	2	0,009
Tratamento	23	0,077*
Genótipo(G)	7	0,125*
Dose (D)	2	0,273*
G X D	14	0,024*
Erro experimental	46	0,007
Erro observacional	72	0,006
CV (%) = 25,84% $R^2= 0,81$ $\bar{X}= 0,33$ $\sigma_g^2 = 0,0056$ $h^2 = 0,46$		

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F
 Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A estimativa de herdabilidade no sentido amplo mostra que em torno de 46% da variação fenotípica observada para o caráter massa seca da parte aérea foi decorrente de variação genética (Tabela 2). Desta maneira, percebe-se que menos da metade do valor fenotípico total é oriundo de variação genética. As causas destes baixos valores de herdabilidade são em decorrência do efeito de ambiente, bem como da interação genótipo x dose, a qual resultou na diminuição nos valores de variância genética e consequentemente baixando os valores de herdabilidade no sentido amplo.

Desta maneira, programas de melhoramento envolvendo a utilização do caráter massa seca da parte aérea como componente de eficiência na utilização de fósforo requer cuidados quanto a intensidade na pressão de seleção devido ao efeito pronunciado de ambiente para este caráter. Para o desdobramento da interação genótipo x dose, prosseguiu-se para o estudo da variação atribuível ao fator dose de fósforo para cada um dos níveis do fator genótipo, por uma decomposição alternativa dos 16 graus de liberdade atribuíveis ao esquema fatorial. Como o fator dose de fósforo no presente estudo possui três níveis, foram testadas as significâncias dos componentes polinomiais linear e quadrático para cada genótipo (Tabela 3).

Os resultados indicam que para os genótipos BAF 07, BAF 50, IPR 88 UIRAPURU e CAVIANO, não houve adequação da função resposta linear-quadrática, 10 indicando baixa relação de grandeza entre o quadrado médio da regressão sobre o quadrado médio do resíduo correspondente ao modelo de regressão polinomial utilizado (Tabela 3). Sendo assim, o efeito de dose para os genótipos BAF 07, BAF 50, IPR 88 UIRAPURU e CAVIANO correspondeu a uma reta de declividade nula, o que caracteriza estes genótipos em não responsivos ao incremento na dose de fósforo. Já para o genótipo BRS EMBAIXADOR, o componente polinomial de segundo grau revelou-se significativo estatisticamente indicando um ponto máximo de absorção a partir do qual ocorre decréscimo no acúmulo de massa seca da parte aérea. Isto pode ser explicado devido a uma maior sensibilidade deste genótipo ao estresse osmótico ocasionado por um possível estresse salino resultante do incremento da dose, visto que a fonte de fósforo utilizada é caracterizada como um composto salino. Enquanto que para os genótipos BAF 53, BAF 209 e PÉROLA, o componente polinomial de primeiro grau revelou-se significativo estatisticamente. Indicando que para o caráter massa seca da parte aérea (MSPA), as variações significativas atribuíveis à dose para os genótipos BAF 53, BAF 209 e PÉROLA são eminentemente do tipo linear. Desta maneira, para estes genótipos, dentro do intervalo estudado (31 ppm a 93 ppm), o caráter massa seca da parte aérea aumenta linearmente com aumento da dose de fósforo. Sendo assim, estes genótipos foram classificados como responsivos ao fornecimento de fósforo.

Tabela 3 - Análise de variação para os testes de significância dos componentes linear e quadrático da variação atribuível à dose para cada genótipo através da decomposição dos graus de liberdade referentes a dose e à interação genótipo x dose segundo o esquema fatorial

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio
Dose (G)	(16)	0,0550*
BAF 53 – Linear	1	0,1026*
BAF 53 Quadrático	1	0,0200 ^{ns}
BAF 50 Linear	1	0,0216 ^{ns}
BAF 50 Quadrático	1	0,0148 ^{ns}
IPRUIRAPURU Linear	1	0,0168 ^{ns}
IPRUIRAPURU Quadrático	1	0,0272 ^{ns}
BAF 209 Linear	1	0,0833*
BAF 209 Quadrático	1	0,0005 ^{ns}
BAF 07 Linear	1	0,0075 ^{ns}
BAF 07 Quadrático	1	0,0081 ^{ns}
BRSEMBAIXADOR Linear	1	0,0630*
BRSEMBAIXADOR Quadrático	1	0,1750*
CAVIANO Linear	1	0,0243 ^{ns}
CAVIANO Quadrático	1	0,0025 ^{ns}
PÉROLA Linear	1	0,3267*
PÉROLA Quadrático	1	0,0007 ^{ns}
Erro Experimental	46	0,0072

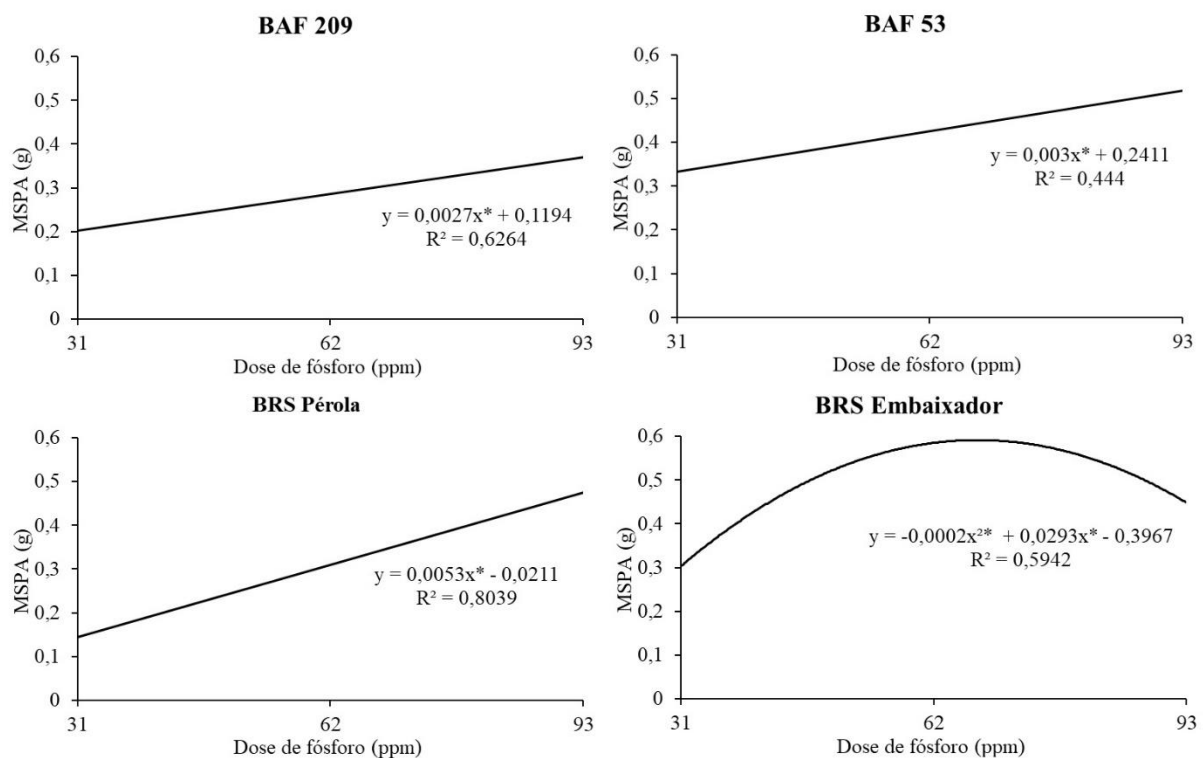
* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste *F*
 Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As causas deste comportamento diferencial entre os genótipos são atribuídas a fatores fisiológicos e bioquímicos próprios de cada genótipo em resposta às variações ambientais (CRUZ et al., 2012), neste caso representadas pelos níveis de fósforo. Estes fatores fisiológicos e bioquímicos refletem em alterações morfológicas. Dentre os principais componentes associados à eficiência na utilização de fósforo na cultura do feijão estão o desenvolvimento

radicular (HERNANDEZ et al., 2007, CAMILO et al., 2021, KASCHIGUMA et al., 2022), a biossíntese de proteínas de membrana do tipo alta afinidade (TIAN et al., 2007) e capacidade 11 de inter-conversão do fósforo retido no solo em fósforo solúvel (MARSCHNER et al., 1986; SCHACHTMAN, 1998).

Na Figura 1, são apresentadas as regressões ajustadas para o caráter massa seca da parte aérea (MSPA). Observando os gráficos dos genótipos BAF 53, BAF 209 e PÉROLA, pode ser verificado que o comportamento do caráter massa seca da parte aérea apontou efeito linear, indicando que dentro do intervalo estudado esse caráter aumenta linearmente com aumento da dose. Para o genótipo BAF 53, a equação de regressão obtida indica um incremento de 0,0030 g de massa seca da parte aérea com o acréscimo de uma unidade em ppm nos níveis de fósforo. Já para o genótipo BAF 209, observou-se uma taxa de incremento de 0,0027g, enquanto para o genótipo PÉROLA, o incremento foi de 0,0053g de massa seca da parte aérea com o incremento nos níveis de fósforo.

Figura 1 - Curva-resposta entre o acúmulo de massa seca da parte aérea (MSPA) e o incremento nas concentrações de fósforo entre 31 a 93 ppm para dois acessos (BAF 209 e BAF 53) e duas cultivares (BRS Embaixador e Pérola)



* Indicam que houve diferença significativa a 5% de probabilidade pelo teste *F*

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com base nos valores dos coeficientes de regressão dos genótipos responsivos (BAF 53, BAF 209 e PÉROLA) apresentados na Figura 1, foi realizado um procedimento de verificação da heterogeneidade entre as linhas de regressão, a partir do teste t segundo o método de Steel e Torrie (1960). Este procedimento contrasta os coeficientes de regressão par a par, o que permite inferir se há diferenças genótípicas entre os genótipos classificados como responsivos ao fornecimento de fósforo. No entanto, não foram verificadas diferenças significativas entre os coeficientes de regressão. Sendo assim, apesar de os valores dos coeficientes de regressão revelarem-se aparentemente divergentes (Figura 1), os pontos que compõem os valores observados estão dispersos em razão de uma expressiva variância em relação à regressão (WEISBERG, 2014). Portanto, a variação de acréscimo na massa seca de parte aérea com o incremento nos níveis de fósforo não pode ser atribuída inerentemente a diferença de desempenho genotípico entre os genótipos caracterizados como responsivos. Desta maneira, ambos os três genótipos podem ser indicados em blocos de cruzamentos a partir de seu potencial responsivo ao fornecimento de fósforo.

A partir dos valores observados para o intercepto nas equações de regressões ajustadas, pode ser verificado uma tendência de superioridade nas médias de genótipos oriundos grupo comercial tipo cores em comparação a genótipos do grupo comercial tipo preto. A existência de diferença nas médias entre grupos revela que há maior chance de concentração de alelos favoráveis fixados para a característica de interesse em um grupo do que em outro. Com isso, a chance de ganho esperado com a seleção de genótipos dentro daquele grupo aumenta. A vista disso, realizou-se um procedimento adicional conferindo uma extensão da análise de variância onde foi realizado o desdobramento dos graus de liberdade referentes ao efeito principal de genótipo, em que foi subdividida a soma de quadrados em componentes ortogonais correspondentes a graus de liberdade individuais através da realização de contrastes onde os acessos e cultivares foram agrupados com base nos seus respectivos grupos comerciais representados pelos grupos tipo preto e tipo cores (Tabela 4).

Tabela 4 - Contrastes referentes à decomposição do efeito principal de genótipo em graus de liberdade individuais correspondentes a grupos comerciais (tipo preto e tipo cores) em acessos e cultivares de feijão

Fonte de Variação	GL	SQ	QM
Genótipo	(7)	0.876	0.125*
Acessos <i>vs</i> Cultivares	(1)	0.035	0.035*
Acessos	(3)	0.342	0.114*
Tipo Cores <i>vs</i> Tipo Preto	1	0.334	0.334*
Tipo Preto <i>vs</i> Tipo Preto	1	0.002	0.002 ^{ns}
Tipo Cores <i>vs</i> Tipo Cores	1	0.005	0.005 ^{ns}
Cultivares	(3)	0.498	0.166*
Tipo Cores <i>vs</i> Tipo Preto	1	0.280	0.280*
Tipo Preto <i>vs</i> Tipo Preto	1	0.050	0.050*
Tipo Cores <i>vs</i> Tipo Cores	1	0.168	0.168*
Erro experimental	46	0.335	0.007

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste *F*; GL: grau de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4, a partir da decomposição da soma de quadrados do efeito principal de genótipo, observou-se que grande parte da variação genética foi captada nos contrastes envolvendo a comparação entre os grupos comerciais tipo preto *vs* tipo cores. Dentro dos acessos, detectou-se em torno de 37,9% da variação total. Enquanto que dentro das cultivares foi captou-se em torno de 32% da variação genética total atribuída a estes dois grupos. Sendo que os genótipos do grupo comercial tipo cores obtiveram médias superiores

em relação a genótipos do grupo comercial tipo preto (Tabela 5). Sendo assim, infere-se que há uma maior probabilidade de aumentar o ganho de seleção através de cruzamentos envolvendo parentais oriundos do grupo comercial tipo cores no intuito de desenvolver genótipos eficientes na utilização de fósforo. Estes resultados corroboram com Da Silva et al (2014), trabalhando com cultivares de feijão do grupo comercial tipo preto vs tipo cores em que os genótipos oriundos do grupo tipo cores foram superiores para a característica de eficiência na utilização de fósforo.

Elevada variação genética também foi detectada nas cultivares dentro do grupo comercial tipo cores. Cerca de 18,3% da variação genética total está representada neste contraste. No entanto, nos acessos não foi detectado variação dentro do grupo comercial tipo cores. Uma possível explicação para a elevada variação genética dentro do grupo comercial tipo cores nas cultivares pode ser referente ao grupo gênico de entre as cultivares comparadas ser divergente. O contraste foi realizado através da comparação entre a cultivar PÉROLA, do grupo gênico mesoamericano e a cultivar BRS EMBAIXADOR, do grupo gênico andino. Desta maneira há um indicativo que grupos gênicos apresentam variação genética à eficiência na utilização de fósforo. O genótipo BRS EMBAIXADOR obteve média superior a cultivar BRS EMBAIXADOR (Tabela 6). Isto pode ser atribuído ao fato de que há diferenças contrastantes quanto a aspectos morfológicos como maior número de raízes basais em grupos andinos em comparação com genótipos oriundos do pool gênico mesoamericano, sendo assim, mais facilmente consegue explorar a superfície do solo, onde maior parte do fósforo é encontrado. Os solos da região dos Andes são geralmente baixos em disponibilidade de fósforo devido a textura do solo desta região proporcionar alto potencial de fixação de fósforo no solo. Por conta disso, acredita-se que genótipos que evoluíram nestas áreas passaram pelo processo de pressão de seleção para adaptação à baixa disponibilidade de fósforo (SINGH et al., 1989; YAN et al., 1995).

Além do sistema radicular, a capacidade de acidificação da rizosfera através da exsudação de ácidos orgânicos resulta na liberação do fósforo retido por fixação no solo, tornando-o solúvel e assimilável pelas plantas. MARSCHNER et al (1986) detectou variabilidade genética entre os grupos gênicos andino e mesoamericano, relatando superioridade de genótipos andinos em relação a mesoamericanos para esta característica. Dentro do grupo comercial preto não foi detectado variação a partir da comparação entre os acessos. No entanto, nas cultivares uma pequena porção da variação genética, em torno de 14 5,7%, foi captada entre as cultivares CAVIANO e IPR 88 UIRAPURU, sendo que a cultivar IPR 88 UIRAPURU obteve média superior a cultivar CAVIANO (Tabela 5).

Tabela 5 - Médias para o caráter massa seca da parte aérea (g) em acessos e cultivares dos grupos comerciais tipo preto e tipo cores de feijão submetidos a três concentrações de fósforo

Genótipo	Classificação	Grupo Comercial	Média (g)
BAF 53	Acesso	Tipo Cores	0,426
BAF 50	Acesso	Tipo Cores	0,402
BAF 209	Acesso	Tipo Preto	0,286
BAF 07	Acesso	Tipo Preto	0,270
BRS EMBAIXADOR	Cultivar	Tipo Cores	0,445
PÉROLA	Cultivar	Tipo Cores	0,308
IPR 88 UIRAPURU	Cultivar	Tipo Preto	0,290
CAVIANO	Cultivar	Tipo Preto	0,215

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na comparação entre acessos vs cultivares também foi detectada uma pequena parte da variação genética total, captando em torno de 3,5%. Sendo que as médias dos acessos foram superiores as médias das cultivares. Isto pode ser explicado devido ao fato de que os acessos são excelentes fontes de variabilidade (BORÉM; MIRANDA, 2013). Os acessos possuem vários ciclos de seleção natural e artificial em locais de baixa entrada de insumos, podendo assim, ser uma excelente fonte de genes úteis (BERTOLDO, 2011). Por outro lado, a maior parte do melhoramento das culturas nos últimos anos tem focado em genótipos com características de rendimento de grãos em ambiente sob alta fertilidade, restringindo a variabilidade genética para características associadas a estresses abióticos como a eficiência na utilização de fósforo.

2.6 CONCLUSÃO

A cultivar PÉROLA e os acessos BAF 53 e BAF 209 demonstraram-se responsivos ao fornecimento de fósforo e podem ser indicados em blocos de cruzamentos para o desenvolvimento de cultivares eficientes na utilização de fósforo. Há variabilidade genética para a eficiência na utilização de fósforo entre grupos comerciais. Cruzamentos envolvendo genitores do grupo comercial tipo cores aumentam a probabilidade de obtenção de genótipos superiores para a característica eficiência na utilização de fósforo.

REFERÊNCIAS

- ATAFAR, Z.; MESDAGHINIA, A.; NOURI, J.; HOMAEI, M.; YUNESIAN, M.; AHMADI, M.; Effect of Fertilizer Application on Soil Heavy Metal Concentration. **Environmental Monitoring and Assessment** 160(1-4):83-9 DOI:10.1007/s10661-008-0659-x. 2010.
- ASCENCIO, J.; MEDINA, E. Root Morphology and Phosphorus Efficiency in Three Pigeonpea Genotypes Grown in Low-Phosphorus Soils. 1997.
- ARAI, Y.; LIVI, K. J. (). Underassessed Phosphorus Fixation Mechanisms in Soil Sand Fraction. **Geoderma**, 192, 422–429. doi:10.1016/j.geoderma. 2013.
- ARAÚJO, A.P.; ANTUNES, I.F.; TEIXEIRA, M.G. Inheritance of Root Traits and Phosphorus Uptake in Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Under Limited Soil Phosphorus Supply. **Euphytica** 145, 33–40. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-8772-1>. 2005.
- ARAÚJO, A.P.; PLASSARD, C.; DREVON, J.J. Phosphatase and Phytase Activities in Nodules of Common Bean Genotypes at Different Levels of Phosphorus Supply. **Plant Soil** 312, 129–138. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9595-3>. 2008.
- BINDRABAN, P. S.; DIMKPA, C.O.; PANDEY, R. Exploring Phosphorus Fertilizers and Fertilization Strategies for Improved Human and Environmental Health. **Biol. Fert. Soils**, 56, 299–317.3. 2020.
- BISOGNIN, D.A.; ALMEIDA, M.L.; GUIDOLIN, A.F.; NASCIMENTO, J.A. Desempenho de Cultivares de Feijão em Semeadura Tardia no Planalto Catarinense. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.2, p.93:199,1997.
- BLAIR, G. J.; CORDEIRO, S. The Phosphorus Efficiency of Three Annual Legumes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 50, n. 2, p. 387-398, 1978.
- BORÉM, A. Melhoramento de Plantas. Universidade Federal de Viçosa (UFV), 1997.
- BORÉM, A., MIRANDA, G. Melhoramento de Plantas. 6ª edição. Universidade Federal de Viçosa (UFV). 2013.
- COIMBRA, J.L.M.; BARILI, L.D.; VALE, N.M.; GUIDOLIN, A.F.; BERTOLDO, J.G.; ROCHA, F.; TOALDO, D. Seleção Para Caracteres Adaptativos em Acessos de Feijão Usando REML/BLUP. **Magistra, Cruz das Almas**, v.20, n.2, p.177-185, 2008.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22, 2021.
- CORDELL, D.; WHITE, S. Peak Phosphorus: Clarifying the Key Issues of a Vigorous Debate about Long-Term Phosphorus Security. **Sustainability** 3, 2027-2049. 2011. <https://doi.org/10.3390/su3102027>.
- DE OLIVEIRA, T. C.; CRUZ, J. S.; SALGADO, F. H. M.; DE SOUSA, S. A.; FIDELIS, R. R. Eficiência e Resposta à Aplicação de Fósforo em Feijão Comum em Solos de Cerrado. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, 7(1), 11. 2012.
- DE SOUSA, G. M.; CABRAL FILHO, F. R.; DE ANDRADE, C. L. L.; VENTURA, M. V. A. Análise Econômica do Uso de Bioestimulantes na Cultura do Feijão em Diferentes Métodos de Aplicação. **Brazilian Journal of Science**, 2(2), 24-31. 2023.
- DO VALE, J. C.; FRITSCHÉ-NETO, R. Genetic Control of Traits Associated with Phosphorus Use Efficiency in Maize by REML/BLUP. **Revista Ciência Agrônômica**, 44(3), 554–563. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000300018>. 2013.

- DUBROVSKY, J.G.; CONTRERAS-BURCIAGA, L.; IVANOV, V.B. Cell Cycle Duration in the Root Meristem of Sonoran Desert Cactaceae as Estimated by Cell-Flow and Rate-of-Cell Production Methods. **Annals of Botany**. 81:619–624. 1998.
- DOTANIYA, L. M.; APARNA, K.; DOTANIYA, K.C.; SINGH, M.; REGAR, L.K. Role of Soil Enzymes in Sustainable Crop Production. **Enzymes in Food Biotechnology Production, Applications, and Future Prospects**. Pages 569-589. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813280-7.00033-5>. 2019.
- DELMELLE, P.; MATERS, E.; OPPENHEIMER, C. Volcanic Influences on the Carbon, Sulfur, and Halogen Biogeochemical Cycles, Editor(s): Haraldur Sigurdsson, **The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)**, Academic Press, Pages 881-893, ISBN 9780123859389, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00050-X>. 2015.
- ELHAISSOUFI, C. G.; BARAKAT, A.; ZEROUNAL, Y.; BARGAZ, A. Phosphate Bacterial Solubilization: A Key Rhizosphere Driving Force Enabling Higher P Use Efficiency and Crop Productivity, 8, 23. 2021.
- FALCONER, D.S.; MACKAY, T.F.C. Introduction to Quantitative Genetics. 4 ed. England: Longman, 463 p. 1996.
- FAN, B.; DING, J.; FENTON, O.; DALY, K.; CHEN, S.; ZHANG, S.; CHEN, Q. Investigation of Differential Levels of Phosphorus Fixation in Dolomite and Calcium Carbonate Amended Red Soil. **J Sci Food Agric**, 102: 740-749. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11405>. 2022.
- FAWOLE, I.; GABELMAN, G.; GERLOFF, C.; NORDHEIM, V. Heritability of Efficiency in Phosphorus Utilization In Beans (*Phaseolus Vulgaris* L.) Grown Under Phosphorus Stress. **J. Amer. Soc. Hort. Sci.** 107 (1): 94-97. University of Wisconsin, Madison, WI 53706. 1982.
- FUSCALDI, K, C.; PRADO, G. R. Análise Econômica da Cultura do Feijão. **Revista de Política Agrícola**. V. 14, n. 1. 2005.
- GATIBONI, L.C.; NICOLOSO, R.; MUMBACH, G.L.; SOUZA JUNIOR, A.; DALL'ORSOLETTA, D.J.; SCHMITT, D. Establishing Environmental Soil Phosphorus Thresholds to Decrease the Risk of Losses to Water in Soils From Rio Grande do Sul, Brazil. **Rev Bras Ciênc Solo** Available from: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200018>. 2020.
- GERLOFF, S. Plant efficiencies in the use of N, P and K. ed. **Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils**. Cornell University Press, New York. pp. 161-174.1977.
- JHA, U.C., NAYYAR, H., PARIDA, S. K., BEENA, R., PANG, J., KADAMBOT, A., SIDDIQUE, H.M. Breeding and genomics approaches for improving phosphorus-use efficiency in grain legumes, **Environmental and Experimental Botany**, doi:<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105120>. 2022.
- HAMMOND, J.P., BROADLEY, M.R., WHITE, P.J., Genetic responses to phosphorus deficiency. **Ann Bot**. Sep;94(3):323-32. doi: 10.1093/aob/mch156. Epub. PMID: 15292042; PMCID: PMC4242181. 2004.
- HAN, Y., WHITE, P. J., CHENG, L., Mechanisms for improving phosphorus utilization efficiency in plants. **Ann Bot**. doi: 10.1093/aob/mcab145. PMID: 34864840; PMCID: PMC8835619. 2022.
- HEUER, S., GAXIOLA, R., SCHILLING, R., HERRERA-ESTRELLA, L., LÓPEZ-ARREDONDO, D., WISSUWA, M., DELHAIZE, E., ROUACHED, H., Improving phosphorus use efficiency: a complex trait with emerging opportunities. **Plant J**. Jun;90(5):868-885. doi: 10.1111/tpj.13423. Epub 2017 Feb 3. PMID: 27859875. 2017

- HOLLAND, J., NYQUIST, W.E., MARTINEZ, C.T. Estimating and interpreting heritability for plant breeding: An update. **Plant breeding reviews** V.22. 2003.
- HOUMANI, H., RABHI, M., ABDELLEY, C., DEBEZ, A. Implication of Rhizosphere Acidification in Nutrient Uptake by Plants: Cases of Potassium (K), Phosphorus (P), and Iron (Fe). **Crop Production and Global Environmental Issues**, 103–122. doi:10.1007/978-3-319-23162-4_4. 2015.
- KIMANI, J. M., GITHIRI, S. M., KIMANI, P. M. Mode of inheritance of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) traits for tolerance to low soil phosphorus (P). **Euphytica**.155:225–234, 2007.
- MYOUNGHAI, K. Multiple origins of the determinate growth habit in domesticated common bean (*Phaseolus vulgaris*), **Annals of Botany**, Volume 110, Issue 8, Pages 1573–1580, <https://doi.org/10.1093/aob/mcs207>. 2012.
- KASHYAP, Physiological, biochemical, and morphological approaches to mitigate the effects of abiotic stress in plants.
- KYADA, A.D. B. H. KALE, JWALA PRANATI, G. M. PATEL, D. P. PATEL, M. R. PRAJAPATI, K. G. MODHA AND R. K. PATEL Genetic variability, character association and path coefficient analysis in determinate F5 progenies of Indian bean [*Lablab purpureus* L. Sweet]. **Electronic Journal of Plant Breeding**, 13 2, 319-324. Retrieved from <https://ejplantbreeding.org/index.php/EJPB/article/view/4309>. 2022.
- LANA, R. M. Q., ZANÃO JÚNIOR, L. A., CORREIA, N. M., & LANA, Â. M. Q. Variabilidade entre genótipos de feijoeiro na eficiência no uso do fósforo. **Ciência Rural**, 36, 778-784. 2006.
- LI Y., ZENG, H., XU F., YAN, F., XU, W. H+-ATPases in Plant Growth and Stress Responses. **Rev Plant Biol**. May 20;73:495-521. doi: 10.1146/annurev-arplant-102820-114551. Epub 2022 Mar 1. PMID: 35231180. 2022.
- LU, H., WANG, F., LIN, R., WANG, Z., MAO, C. Molecular Mechanisms and genetic improvement of low-phosphorus tolerance in rice. **Plant, Cell & Environment / Volume 46, Issue 4 / p. 110**. 2022.
- LYNCH, J.; BEEM, J.J. Growth and architecture of seedling root of common bean genotypes. **Crop Science**, v. 33, n. 6, p. 1253-1257, 4-1119. 1993.
- MAMBRIN, R. B. SAUSEN, D. MOURA, D.S. CARVALHO, I.S. SZRARESKI, V.J. LAUTENCHLEGER, Selection of bean lineages regarding the use and response to phosphorus available in nutrient solution F. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, e3999118850,(CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i11.88501> . 2020.
- MAMBRIN, R. B. SAUSEN, D. MOURA, D.S. CARVALHO, I.S. SZRARESKI, V.J. Phosphorus partition, phytic acid concentration and grains productivity of beans cultivars as a response to phosphate nutrition. **Communication in plant sciences**. vol.11. p.046-056 DOI: 10.26814/cps2021006. 2021.
- MCGECHAN, M.B. LEWIS, D.R. SW—Soil and Water: Sorption of Phosphorus by Soil, Part 1: Principles, Equations and Models. **Biosystems Engineering** Volume 82, Issue 1, Pages 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0054>. 2002.
- MARSCHNER, H. HOMHELD, V. HORST, J.W. MARTIN,P. Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. Institut fir Pflanzenernahrung, Universitlt Hohenheim, Postfach 70 05 62, D-7000 Stuttgart 70, 1986.
- MOGOLLON, J., BOUWMAN, J., BEUSEN, A., LASSALETTA, L., GRINSVEN, H., WESTHOEAK, H. More efficient phosphorus use can avoid cropland expansion. **Nature Food**. 2. 1-10. 10.1038/s43016-021-00303-y. 2021.

- NIU, Y.F.; CHAI, R.S.; JIN, G.L.; WANG, H.; TANG, C.X.; ZHANG, Y.S. Responses of Root Architecture Development to Low Phosphorus Availability: A Review. **Ann. Bot.**, 112, 391–408. 2013.
- NUSSAUME L, MARÉCHAL E, THIBAUD MC, BLOCK MA. Plant plasma membrane and phosphate deprivation. **Plant Cell Monogr.**;19:237–51. 2010.
- PANG, J.; BANSAL, R.; ZHAO, H.; BOHUON, E.; LAMBERS, H.; RYAN, M.H.; RANATHUNGE, K.; SIDDIQUE, K.H.M. The Carboxylate-releasing Phosphorus-mobilizing Strategy Can Be Proxied by Foliar Manganese Concentration in a Large Set of Chickpea Germplasm under Low Phosphorus Supply. **New Phytol.** 219, 518–529. 2018.
- PETRY, N.; BOY, E; WIRTH, J. P.; HURREL, R. F. The potential of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as a Vehicle for Iron Biofortification. **Nutrients**, Basel, Switzerland, v. 7, p. 1144-1173. <https://doi.org/10.3390/nu7021144>. 2015.
- PINOTTI, C.R. Rice and bean yields related to physical and chemical attributes of an oxisol treated with organic compost in the cerrado Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. **Repositório Institucional UNESP**. 2023.
- PIZZIO, G., KAMESH, R., GAXIOLA, R. Rhizosphere Acidification Assay. bio-protocol. 5. e1676. 10.21769/BioProtoc.1676. 2015.
- POSSOBOM, M, T, D, F. Diversidade genética de linhagens de feijão preto e “carioca” recomendadas no Brasil nos últimos 50 anos. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de Doctor Scientiae. 2018.
- RAMALHO, M. A. P., SANTOS, J. D., PINTO, C. A. B. P., SOUZA, E. D., GONÇALVES, F. M. A., & SOUZA, J. D. **Genética na agropecuária**. rev. Lavras: UFLA. 2004.
- RAMÍREZ, M.; FLORES-PACHECO, G.; REYES, J.L.; LUZ ALVAREZ, A.; DREVON, J.J.; GIRARD, L.; HERNÁNDEZ, G. Two Common Bean Genotypes with Contrasting Response to Phosphorus Deficiency Show Variations in the microRNA 399-Mediated PvPHO2 Regulation within the PvPHR1 Signaling Pathway. **Int. J. Mol. Sci.** 14, 8328-8344. <https://doi.org/10.3390/ijms14048328>. 2013.
- RAMTEKEY, V.; BANSAL, R.; ASKI, M.S.; KOTHARI, D.; SINGH, A.; PANDEY, R.; TRIPATHI, K.; MISHRA, G.P.; KUMAR, S.; DIKSHIT, H.K. Genetic Variation for Traits Related to Phosphorus Use Efficiency in Lens Species at the Seedling Stage. **Plants** 10, 2711. 2021.
- REZENDE, G, A. Queda no Consumo Domiciliar de Arroz e Feijão no Brasil entre 2002 e 2008. 85 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2020.
- ROSADO, R. D. S. Caracterização do Sistema Radical do Feijoeiro e seu Uso no Melhoramento Genético. 92 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2012.
- REZENDE, G. A. COELHO, A. B. TRAVASSOS, G. F. Consumo domiciliar de arroz e feijão no Brasil. **Revista de Política Agrícola**. V. 31, N. 2. 2022.
- SANTOS, I. G., CRUZ, C. D., NASCIMENTO, M., ROSADO, R. D. S., FERREIRA. Direct, indirect and simultaneous selection as strategies for alfalfa breeding on forage yield and nutritive value. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 48(2), 178–189. <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4851950>. 2018.
- SANTOS, M., BISPO, R. B. AZEVEDO, V.C.; KAMPHORST, S. H. JÚNIOR, A.T., LIMA, V.J. Heterose para características morfofisiológicas para maior eficiência no uso do fósforo em milho-pipoca. In: Anais do XIV Congresso Fluminense de Iniciação Científica e Tecnológica / VII Congresso Fluminense de Pós-Graduação,

- Campos dos Goytacazes. Campinas, Galoá, 2022. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2022.
- SHEN, J., YUAN, L., ZHANG, J., LI, H., BAI, Z., CHEN, X., ZHANG, W., ZHANG, F. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant, **Plant Physiology**, Volume 156, Issue 3, July 2011, Pages 997–1005, <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>. 2011.
- SCHACHTMAN, D.; Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. **Plant Physiology**. 116. 447-453. 10.1104/pp.116.2.447. 1998.
- SHISHKOVA, S.; ROST, T.; DUBROVSKI, J. Determinate root growth and meristem maintenance in angiosperms. **Ann Bot**. Feb;101(3):319-40. doi: 10.1093/aob/mcm251. Epub 2007 Oct 21. PMID: 17954472; PMCID: PMC2701811. 2008.
- TAIZ, L. ZEIGER, E., MOLLER, I.M. and MURPHY, A. **Plant Physiology and Development. 6th Edition**, Sinauer Associates, Sunderland, CT. 2015.
- TANG.; Chen, W.; Tang, L.; Wang, J.; Zhu, H.; Jin, J.; Yang, J.; Fan, W. Research Advances in the Mutual Mechanisms Regulating Response of Plant Roots to Phosphate Deficiency and Aluminum Toxicity. **Int. J. Mol. Sci.**, 23, 1137. <https://doi.org/10.3390/ijms23031137>. 2022.
- TIAN, J.; VENKATACHALAM, P.; LIAO, H.; YAN, X.; RAGHTOHAMA, K. Molecular cloning and characterization of phosphorus starvation responsive genes in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Planta**. Dec;227(1):151-65. doi: 10.1007/s00425-007-0603-2. Epub Aug 14. PMID: 17701202. 2007.
- WHITEAKER, G., GERLOFF, G. C., GABELMAN, W. LINDREGEN, H. Intraspecific Differences in Growth of Beans at Stress Levels of Phosphorus1. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, 101(4), 472-475. 1976.
- YAN, X., LYNCH, J.P. and BEEBE, S.E. Genetic variation for phosphorus efficiency of common bean in contrasting soil types: I. Vegetative response. **Crop Sci**. 35, 1086– 1093. 1995.
- ZHANG, H., ZHU, J., GONG, Z. Abiotic stress responses in plants. **Nat Rev Genet** 23, 104–119. <https://doi.org/10.1038/s41576-021-00413-0>. 2022.