

Eficiência na utilização de fósforo em genótipos de feijão

Efficiency in the use of phosphorus in bean genotypes

Felipe Reck Benato¹, Luan Tiago dos Santos Carbonari², Paulo Henrique Cerutti³, Rita Carolina Melo⁴, Altamir Frederico Guidolin⁵, Jefferson Luís Meirelles Coimbra⁶

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi caracterizar genótipos de feijão quanto a eficiência na utilização de fósforo visando a identificação de genótipos superiores para fins de melhoramento, além de verificar o comportamento entre grupos comerciais para acessos e cultivares. Utilizou-se o 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, que consiste na relação entre a massa seca da parte aérea (g) e a unidade de fósforo aplicado (ppm). A identificação dos genótipos responsivos foi realizada com base na significância do coeficiente de regressão a partir do ajuste da curva de 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 se revelaram responsivos. O comportamento entre grupos comerciais para a eficiência na utilização de fósforo foi avaliado através da realização de contrastes ortogonais. Os acessos BAF209, BAF53 e a cultivar Pérola foram responsivos ao fornecimento de fósforo e podem ser utilizados em cruzamentos para desenvolver cultivares mais eficientes. A variabilidade genética entre os grupos comerciais revelou maior eficiência no uso de fósforo entre os genótipos do grupo Tipo Cores comparativamente ao grupo Preto, indicando a presença de alelos favoráveis. Assim, cruzamentos com genótipos do grupo Tipo Cores podem contribuir para a obtenção de cultivares eficientes na utilização de fósforo.

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

ABSTRACT: The objective of this study was to characterize bean genotypes regarding phosphorus use efficiency to identify superior genotypes for breeding purposes, as well as to evaluate the behavior of commercial groups for accessions and cultivars. A randomized block design with three replications was employed, using a genotype x phosphorus doses factorial scheme (8 x 3). Phosphorus use efficiency was assessed through responsiveness to phosphorus supply using the Blair and Cordeiro method, which involves the ratio of dry mass of the shoot (g) to the phosphorus unit applied (ppm). Genotype responsiveness was identified based on the significance of the regression coefficient from the adjustment of the response curve between the dry mass of the shoot and the phosphorus unit applied, followed by checking the heterogeneity of simple linear regression lines among the genotypes that proved to be responsive. The behavior between commercial groups for phosphorus use efficiency was evaluated through orthogonal contrasts. The accessions BAF209, BAF53, and the cultivar Pérola were responsive to phosphorus supply and can be used in crosses to develop more efficient cultivars. Genetic variability among commercial groups revealed greater phosphorus use efficiency in the Tipo Cores group compared to the Preto group, indicating the presence of favorable alleles. Thus, crosses involving genotypes from the Tipo Cores group may contribute to the development of cultivars efficient in phosphorus utilization.

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

Autor correspondente: Luan Tiago dos Santos Carbonari

E-mail: carbonari.luan@gmail.com

Recebido em: 2025-03-06

Aceito em: 2024-05-16

¹ Mestre em Produção Vegetal pela Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Brasil.

² Mestre em Produção Vegetal pela Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Brasil.

³ Doutor em Produção Vegetal pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Docente da UDESC, Santa Catarina, Brasil.

⁴ Doutora em Produção Vegetal pela Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC. Docente na Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina, Brasil.

⁵ Doutor em Ciência pela Universidade de São Paulo, USP, Brasil. Docente na Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Brasil.

⁶ Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas, UFPel. Docente na Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os estresses abióticos são definidos como qualquer restrição externa e interna, não ocasionada por organismos vivos, que limita a formação e a conversão de energia de uma planta em biomassa, como déficit hídrico, salinidade, temperaturas extremas e estresses nutricionais (Zhang *et al.*, 2022). Dentre os estresses abióticos, os nutricionais, ocasionados pela infertilidade do solo, são um dos principais obstáculos enfrentados pelos produtores no Brasil (Pinotti, 2023). Nesse contexto, o elemento que mais limita o desenvolvimento das principais culturas agrícolas é o fósforo. Isso ocorre porque a quantidade de fósforo disponível em grande parte dos solos ao redor do planeta é baixa. O principal fator responsável por essa limitação é a alta capacidade de fixação do fósforo no solo, devido às suas características físico-químicas, que refletem a interação do fosfato com os componentes do solo (Elhaissofi *et al.*, 2022). Esse processo afeta sua disponibilidade e a dinâmica de movimentação no solo, e apesar de o fósforo ser fornecido por meio de adubação fosfatada, tende a ficar retido nas camadas superficiais.

Como consequência, em torno de 10 a 25%, apenas, do fósforo aplicado no solo é absorvido pelas plantas (Chen *et al.*, 2022). Assim, a sobrecarga do solo com fertilizantes fosfatados torna-se ineficiente, dispendiosa, bem como promove lixiviação do fósforo para sistemas hídricos, aumentando o risco de eutrofização e ocasionando impactos ambientais (Gatiboni, 2020). Neste contexto, estima-se que cerca de 5,7 bilhões de hectares de área cultivada ao redor do planeta são deficientes em fósforo, afetando cerca de 30% das áreas agrícolas 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 para 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. Essa fato levaria a uma possível exaustão a níveis globais das fontes extraíveis de fósforo, afetando, significativamente, os cultivos agrícolas ao redor do planeta (Bindraban; Dimkpa; Pandey, 2020).

Considerando as diferentes espécies cultivadas nas áreas agrícolas, o feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das culturas mais sensíveis ao estresse nutricional ocasionado pela deficiência de fósforo (Araújo; Antunes; Teixeira, 2005). Diante disso, o desenvolvimento de novas cultivares de feijão eficientes na utilização desse nutriente torna-se fundamental para enfrentar esse desafio (Mogollón *et al.*, 2021).

A eficiência na utilização de fósforo pode ser avaliada por meio da sua concentração nos tecidos vegetais ou pelo potencial de acúmulo de massa seca da parte aérea, sendo este um dos principais caracteres para determinar essa eficiência (Pereira *et al.*, 2013). Além disso, na cultura do feijão, há uma alta correlação genética entre a massa seca da parte aérea e o conteúdo total de fósforo absorvido.

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 fins de melhoramento, além de verificar o comportamento entre grupos comerciais para acessos e cultivares.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, 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 (Tabela 1), constituídos geneticamente por linhas puras com elevado nível de homozigose. Sendo eles quatro cultivares (Caviano, IPR88 Uirapuru, Pérola e BRS Embaixador)

e quatro acessos (BAF07, BAF50, BAF53, BAF209), 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).

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 88 UIRAPURU	Mesoamericano	Tipo Preto	Cultivar
PÉROLA	Mesoamericano	Tipo Cores	Cultivar
BRS EMBAIXADOR	Andino	Tipo Cores	Cultivar

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 em solução nutritiva. 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). No primeiro tratamento, as plântulas foram submetidas à metade da concentração recomendada para todos os nutrientes, incluindo as doses de fósforo mencionadas anteriormente, com o objetivo de aclimatá-las e evitar um possível estresse salino, reduzindo assim o risco de danos osmóticos em nível celular. A retirada das plantas para análise ocorreu no estágio V4-4, quando o quarto trifólio estava completamente expandido. Esse estágio fenológico foi escolhido devido à alta acumulação de macro e micronutrientes na parte aérea durante esse período (Mambrin et al., 2021). Além disso, independentemente do hábito de crescimento, ainda não havia diferenciação floral nesse estágio, o que poderia interferir no método utilizado para avaliar 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 se revelaram 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 e com o auxílio de balança digital de precisão, com grau de precisão de 0,001g.

A equação do modelo estatístico utilizada foi: $Y_{ijkl} = \mu + B_i + G_j + D_k + (G \times D)_{jk} + \varepsilon_{ijk} + \delta_{ijkl}$, onde, Y_{ijkl} é a variável resposta observada; μ é a média geral; B_i é o efeito do bloco i ; G_j é o efeito do genótipo j ; D_k é o efeito da dose k ; $(G \times D)_{jk}$ representa a interação entre genótipo e dose; ε_{ijk} é o erro experimental; e δ_{ijkl} é o erro observacional.

O efeito de genótipo foi considerado como fixo, pois este fator foi caracterizado como qualitativo específico e, 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.

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 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 a homogeneidade de variância foi verificada através do teste de Obrien.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de variância para o caráter massa seca da parte aérea são apresentados na Tabela 2. A análise de variância indica diferenças estatísticas a 5% de probabilidade de erro pelo teste F para os efeitos de genótipo e dose, bem como para a interação genótipo x dose. Dessa forma, verifica-se uma relação de dependência entre os genótipos e as doses empregadas. O coeficiente de variação experimental apresentou valores dentro do aceitável para esse tipo de estudo, indicando boa precisão experimental e confiabilidade nas estimativas (Pimentel-Gomes, 2000). Além disso, a estimativa de herdabilidade no sentido amplo, revela que aproximadamente 46% da variação fenotípica observada para o caráter massa seca da parte aérea é decorrente da variabilidade genética entre os genótipos de feijão.

Tabela 2. Análise de variância com os quadrados médios e significância do teste F para o caráter massa seca da parte aérea, com as respectivas fontes de variação, graus de liberdade e quadrados médios

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

CV: coeficiente de variação; R²: coeficiente de determinação; X: média geral; σ_g^2 : variância genética; e h^2 : herdabilidade no sentido amplo.

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Com isso, observa-se que menos da metade da variação fenotípica total é inerente a variabilidade genética. As causas destes baixos valores de herdabilidade demonstram acentuado efeito do ambiente na expressão fenotípica deste caráter, e da interação genótipo x dose, a qual resultou na diminuição nos valores do componente de variância genética e consequentemente, reduzindo os valores de herdabilidade no sentido amplo.

Visando estudar a variação atribuível ao fator dose de fósforo para cada um dos níveis do fator genótipo, prosseguiu-se com o desdobramento da interação genótipo \times dose, por meio da decomposição dos 16 graus de liberdade atribuídos ao esquema fatorial. Como o fator dose de fósforo no presente estudo é composto por três níveis, testaram-se as significâncias dos componentes polinomiais linear e quadrático para cada genótipo.

Os resultados, apresentados na Tabela 3, indicam que, para os genótipos BAF07, BAF50, IPR88 Uirapuru e Caviano, não houve adequação à função resposta linear-quadrática, o que sugere uma baixa relação de grandeza entre o quadrado médio da regressão e o quadrado médio do resíduo correspondente ao modelo de regressão polinomial utilizado. Assim, o efeito da dose para esses genótipos (BAF07, BAF50, IPR88 Uirapuru e Caviano) resultou em uma reta de declividade nula, caracterizando-os como não responsivos ao incremento na dose de fósforo.

Tabela 3. Decomposição dos graus de liberdade referentes a interação genótipo x dose segundo o esquema fatorial, representando os testes de significância dos componentes linear e quadrático inerente as doses de fósforo para cada genótipo

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}
IPR 88 UIRAPURU – Linear	1	0,0168 ^{ns}
IPR 88 UIRAPURU – 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}
BRS EMBAIXADOR – Linear	1	0,0630*
BRS EMBAIXADOR – 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.

O genótipo BRS Embaixador apresentou o componente polinomial de segundo grau significativo estatisticamente, indicando um ponto máximo de absorção, a partir do qual ocorre decréscimo no acúmulo de massa seca da parte aérea (Tabela 3). Este fato pode ser explicado devido a uma maior sensibilidade deste genótipo ao estresse osmótico, ocasionado pela salinidade resultante do incremento da dose fósforo, visto que a fonte utilizada é caracterizada como um composto salino, apresentando capacidade de redução do potencial osmótico da solução. Em complemento, para os genótipos BAF53, BAF209 e Pérola, apenas o componente polinomial de primeiro grau foi significativo, estatisticamente. Indicando que, para esses genótipos no caráter massa seca da parte aérea, as variações atribuíveis à dose são do tipo linear. Desta maneira, estes genótipos (BAF53, BAF209 e Pérola) apresentam resposta linear as doses de fósforo, no intervalo estudado (31 ppm a 93 ppm), sendo classificados como responsivos ao fornecimento de fósforo.

As causas deste comportamento diferencial entre os genótipos são atribuídas a fatores fisiológicos e bioquímicos intrínsecos a cada genótipo em resposta às variações ambientais, 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, destacam-se o desenvolvimento radicular (Camilo *et al.*, 2021; Kaschiguma *et al.*, 2022) e a biossíntese de proteínas de membrana com alta afinidade, as quais possuem a capacidade de inter-converter o fósforo retido no solo em fósforo solúvel (Schachtman, 1998).

Adicionalmente, na Figura 1, são apresentadas as regressões ajustadas para o caráter massa seca da parte aérea. Observando os gráficos dos genótipos BAF53, BAF209 e Pérola, pode ser verificado graficamente o comportamento linear indicado nos contrastes ortogonais, para o intervalo estudado nas doses de fósforo. No genótipo BAF53, a equação de regressão obtida indica um incremento de 0,0030g de massa seca da parte aérea com o acréscimo de uma unidade em ppm, nos níveis de fósforo. Já para o genótipo BAF209, observou-se uma taxa de incremento de 0,0027g, enquanto no genótipo Pérola, este incremento foi de 0,0053g.

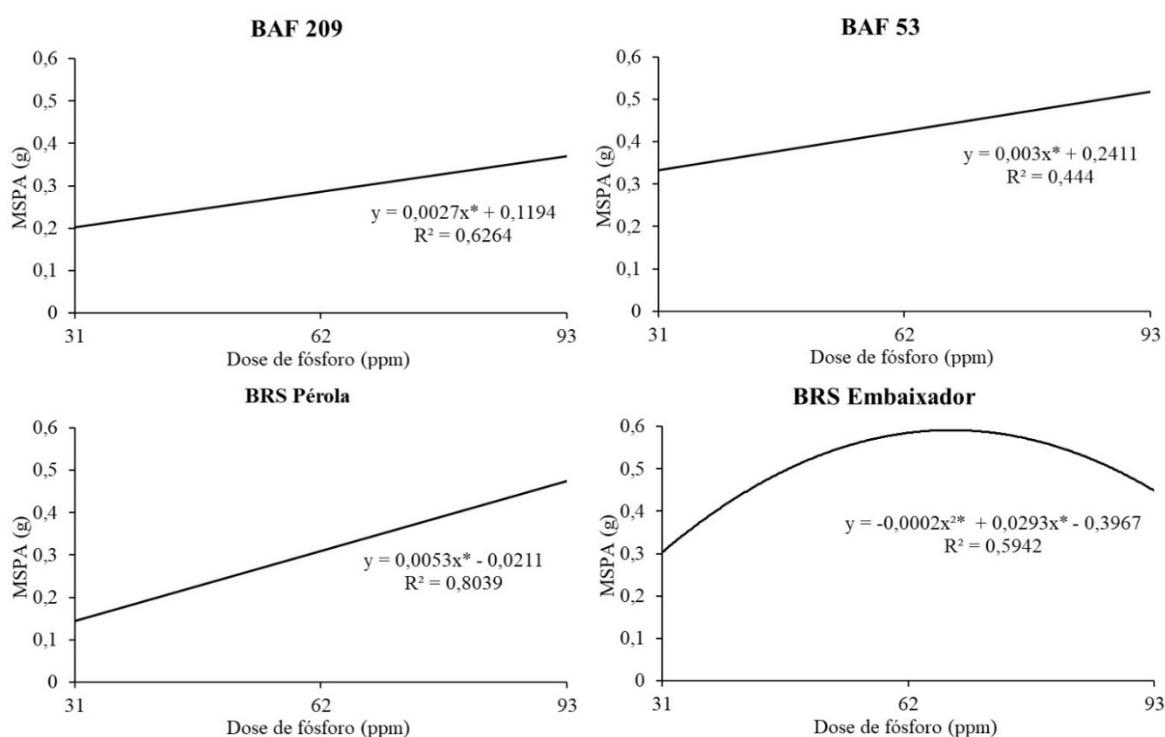


Figura 1. Gráficos do acúmulo de massa seca da parte aérea (MSPA) em função do incremento nas concentrações de fósforo para os genótipos BAF209, BAF53, BRS Embaixador e Pérola.

* Indica que houve diferença significativa a 5% de probabilidade pelo teste t.

A partir dos valores dos coeficientes de regressão dos genótipos responsivos (BAF53, BAF209 e Pérola) apresentados na Figura 1, foi realizado o 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 genotípicas entre os genótipos classificados como responsivos ao fornecimento de fósforo. Contudo, não foram verificadas diferenças significativas entre os coeficientes de regressão, apesar dos valores dos coeficientes de regressão serem aparentemente divergentes.

Neste sentido, 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. Podendo os três genótipos serem indicados em blocos de cruzamentos, com base no seu potencial responsivo ao fornecimento de fósforo.

Com base nos valores do intercepto das equações de regressão ajustadas (Figura 1), verifica-se uma tendência de superioridade nas médias dos genótipos pertencentes ao grupo comercial tipo cores, em comparação aos genótipos do grupo comercial tipo preto. A existência de diferenças nas médias entre os grupos revela uma maior concentração de alelos favoráveis fixados para a característica de interesse em um grupo em relação ao outro. Dessa forma, a expectativa de ganho com a seleção aumenta ao se utilizar genótipos desse grupo em cruzamentos dirigidos, visando a formação de uma população segregante e a posterior aplicação de um método de melhoramento. À vista disso, realizou-se o desdobramento dos graus de liberdade referentes ao efeito principal de genótipo, fracionando a soma de quadrados em contrastes ortogonais inerentes aos graus de liberdade do grupo de acessos e cultivares. Dentro de cada grupo, foram realizadas comparações relacionadas à classificação dos genótipos quanto ao tipo de grão (Tabela 4).

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4, observou-se diferenças significativas pelo teste F a 5% de probabilidade, no grupo de genótipos Acessos (BAF53, BAF50, BAF209 e BAF07) e no grupo Cultivares (BRS Embaixador, Pérola, IPR88 Uirapuru e Caviano). Além disso, a comparação entre estes grupos (Acessos *vs.* Cultivares) também apresentou significância. Considerando apenas o grupo de acessos, a única comparação entre os tipos de grãos com significância foi entre os Tipos Cores *vs.* Tipo Preto (BAF53 e BAF50 *vs.* BAF209 e BAF07), detectando-se em torno de 38% da variação total dos genótipos. Dentro das cultivares essa comparação também foi significativa (Tipos Cores *vs.* Tipo Preto), entre as cultivares BRS Embaixador e Pérola *vs.* IPR88 Uirapuru e Caviano, captando em torno de 32% da variação atribuída ao efeito principal de genótipos.

Tabela 4. Contrastes ortogonais referentes à decomposição do efeito principal de genótipo em acessos e cultivares de feijão, com as respectivas comparações dos grupos comerciais Tipo Cores e Tipo Preto dentro de acessos e cultivares

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}

Fonte de Variação	GL	SQ	QM
Cultivares	(3)	0.498	0.166*
Tipo Cores vs. Tipo Preto	1	0.280	0.280*
Tipo Preto vs. Tipo Preto	1	0.050	0.050*
Tipo Cores vs. 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.

Em complemento, observando as médias gerais dos genótipos (Tabela 5), verifica-se que o grupo comercial tipo cores apresentou desempenho superiores em relação ao grupo de grãos tipo preto, tanto nas classificações de acessos e cultivares (Tabela 5). Estes resultados corroboram com Da Silva *et al.* (2016), no qual, trabalhando com cultivares de feijão do grupo comercial tipo preto e tipo cores, os genótipos superiores para a característica de eficiência na utilização de fósforo foram do tipo cores.

Além disso, o contraste realizado na comparação dentro das cultivares, entre o genótipo Pérola, do grupo gênico mesoamericano e o genótipo BRS Embaixador do grupo gênico andino (Tipo Cores vs. Tipo Cores), também apresentou significância (Tabela 4). Uma possível explicação para essa diferença dentro do grupo comercial tipo cores pode estar relacionado à divergência genética entre as cultivares comparadas. Esse fator pode indicar que diferentes grupos gênicos apresentam variação na eficiência da utilização de fósforo.

O genótipo BRS Embaixador apresentou média superior à da cultivar Pérola (Tabela 5), o que pode ser atribuído a diferenças morfológicas contrastantes, como um maior número de raízes basais no genótipo de origem andina em comparação com genótipos do pool gênico mesoamericano. Esse fator possibilita uma melhor exploração da superfície do solo, onde a maior parte do fósforo está disponível. Acredita-se que essa característica esteja relacionada ao fato de que os solos da região dos Andes geralmente apresentam baixa disponibilidade de fósforo, devido à sua textura, que favorece a fixação desse elemento e, conseqüentemente, reduz sua disponibilidade para as plantas. Assim, presume-se que os genótipos que evoluíram nessa região desenvolveram mecanismos adaptativos para melhor utilização do fósforo disponível. (Singh *et al.*, 1991).

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

Além do sistema radicular, a capacidade de acidificação da rizosfera, por meio 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. Sendo assim, em suma, os resultados deste estudo demonstram que acessos e cultivares são excelentes fontes de variabilidade genética para o caráter eficiência na absorção de fósforo. Contudo, a maior parte do melhoramento das culturas, nos últimos anos, tem focado em genótipos com características de rendimento de grãos, preponderantemente em ambientes com alta fertilidade, restringindo a expressão de características associadas a estresses nutricionais como a eficiência na utilização de fósforo.

4 CONCLUSÃO

A cultivar Pérola e os acessos BAF53 e BAF209 demonstraram-se responsivos ao fornecimento de fósforo e podem ser considerados em blocos de cruzamentos para o desenvolvimento de cultivares mais eficientes na utilização desse nutriente. Além disso, a variabilidade genética observada entre os grupos comerciais indica um potencial para o desenvolvimento de genótipos superiores. Cruzamentos envolvendo genótipos do grupo comercial Tipo Cores podem ser particularmente promissores para a obtenção de cultivares com maior eficiência na utilização de fósforo, visto o indicativo de uma concentração de alelos favoráveis a expressão positiva desse caráter.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UEDESC).

REFERÊNCIAS

- 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, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-005-8772-1>.
- BINDRABAN, P. S.; DIMKPA, C. O.; PANDEY, R. Exploring Phosphorus Fertilizers and Fertilization Strategies for Improved Human and Environmental Health. *Biol. Fert. Soils*, v. 56, p. 299–317, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01430-2>
- BLAIR, G. J.; CORDEIRO, S. The Phosphorus Efficiency of Three Annual Legumes. *Plant and Soil*, **Dordrecht**, v. 50, n. 2, p. 387-398, 1978.
- CAMILO, S., ODINDO, A. O., KONDWAKWENDA, A.; SIBIYA, J. Root traits related with drought and phosphorus tolerance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agronomy*, v. 11, n. 3, p. 552, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11030552>

ELHAISSOUFI, C. G.; GHOULAM, C.; BARAKAT, A.; ZEROUAL, Y.; BARGAZ, A. Phosphate Bacterial Solubilization: A Key Rhizosphere Driving Force Enabling Higher P Use Efficiency and Crop Productivity. **Journal of Advanced Research**, v. 38, p. 13-28, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.08.014>

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**, n. 102, p. 740-749, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11405>

GATIBONI, L. C.; NICOLOSO, R. S.; MUMBACH, G. L.; SOUZA JUNIOR, A. A.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; SCHMITT, D. E.; SMYTH, T. J. 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**, n. 44, e0200018, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbcS20200018>

KACHIGUMA, N. A.; IFIE, B. E.; ELEBLU, J. S. Y.; MALIRO, M. F. A.; OFORI, K.; TONGOONA, P. B. Variability of root traits, seed size and tolerance to low soil phosphorus in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **J. Crop Sci. Biotechnol**, n. 25, p. 349–358, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12892-021-00136-y>

MAMBRIN, R. B. SAUSEN, D.; MOURA, D.; CARVALHO, I. R.; SZARESKI, V. J.; CONTE, G. G. Phosphorus partition, phytic acid concentration and grains productivity of beans cultivars as a response to phosphate nutrition. **Communication in plant sciences**, v.11, p. 46-56, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.26814/cps2021006>

MARSCHNER, H.; RÖMHELD, V.; HORST, W. J.; MARTIN, P. Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. Institut für Pflanzenernährung, Universität Hohenheim, Postfach 70 05 62, D-7000 Stuttgart 70, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.19861490408>

MOGOLLON, J.; BOUWMAN, A. F.; BEUSEN, A. H. W.; LASSALETTA, L.; GRINSVEN, H. J.; WESTHOEK, H. More efficient phosphorus use can avoid cropland expansion. **Nature Food**, v. 2, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00303-y>

PEREIRA, F. B. VALE, J. C.; CARNEIRO, P. C. S.; FRITSCHÉ-NETO, R. Relação entre os caracteres determinantes das eficiências no uso de nitrogênio e fósforo em milho. **Revista Ceres**, v. 60, p. 636-645, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2013000500006>

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. Editora Fealq, v. 15, 2000.

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.

SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. **Plant Physiology**, v. 116, p. 447-453, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>

SILVA, D. A. D.; ESTEVES, J. A. F.; GONÇALVES, J. G. R.; AZEVEDO, C. V. G.; RIBEIRO, T.; CHIORATO, A. F.; CARBONELL, S. A. M. Avaliação de genótipos de feijoeiro quanto à eficiência do uso do fósforo em Latossolo Vermelho Eutrófico. **Bragantia**, v. 75, p. 152-163, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.454>

SINGH, Shree P.; GEPTS, Paul; DEBOUCK, Daniel G. Races of common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae). **Economic Botany**, n. 45, v. 3, p. 379-396, 1991.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**. New York: Publishing Company, 1960.

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**, v. 23, p. 11-37, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23031137>

WEISBERG, S. **Applied linear regression**. 4^a ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

ZHANG, H., ZHU, J., GONG, Z; ZHU, J. K. Abiotic stress responses in plants. **Nat Rev Genet**, v. 23, p. 104–119, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41576-021-00413-0>