

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

RAFAEL FONSÊCA ZANOTTI

MÉTODOS MULTIVARIADOS APLICADOS AO MELHORAMENTO GENÉTICO
DO FEIJOEIRO VISANDO AO AUMENTO DA TOLERÂNCIA AO ESTRESSE
OSMÓTICO E BIOFORTIFICAÇÃO DE GRÃOS

ALEGRE, ES
AGOSTO, 2015

RAFAEL FONSÊCA ZANOTTI

**MÉTODOS MULTIVARIADOS APLICADOS AO MELHORAMENTO GENÉTICO
DO FEIJOEIRO VISANDO AO AUMENTO DA TOLERÂNCIA AO ESTRESSE
OSMÓTICO E BIOFORTIFICAÇÃO DE GRÃOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Produção Vegetal, na linha de pesquisa em Biotecnologia e Ecofisiologia do Desenvolvimento de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Adésio Ferreira

Coorientadora: Dr^a. Sheila Cristina Prucoli Posse

ALEGRE, ES

AGOSTO, 2015

Z33m Zanotti, Rafael Fonsêca, 1987-
Métodos multivariados aplicados ao melhoramento genético do feijoeiro visando ao aumento da tolerância ao estresse osmótico e biofortificação de grãos / Rafael Fonsêca Zanotti. – 2015.
114 f. : il.

Orientador: José Carlos Lopes.

Coorientador: Adésio Ferreira ; Sheila Cristina Prucoli Posse.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Feijão. 2. Fitomelhoramento. 3. Estresse osmótico.
4. Germinação. 5. Seleção (Genética). I. Lopes, José Carlos.
II. Ferreira, Adésio. III. Posse, Sheila Cristina Prucoli. IV Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. V. Título.

CDU: 63

RAFAEL FONSÊCA ZANOTTI

MÉTODOS MULTIVARIADOS APLICADOS AO MELHORAMENTO
GENÉTICO DO FEIJOEIRO VISANDO AO AUMENTO DA TOLERÂNCIA AO
ESTRESSE OSMÓTICO E BIOFORTIFICAÇÃO DE GRÃOS

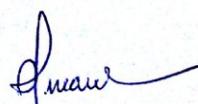
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, do
Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo como
parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Produção Vegetal,
na linha de pesquisa em Biotecnologia e Ecofisiologia do Desenvolvimento de
Plantas

Aprovado em 28 de agosto de 2015.

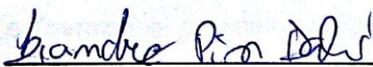
BANCA EXAMINADORA



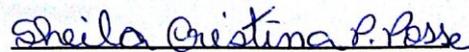
Prof. Dr. Tercio da Silva de Souza



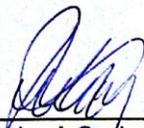
Prof. Dr. Rodrigo Sobreira Alexandre



Prof. Dr. Leandro Pin Dalvi



Profª. Dr. Sheila Cristina Prucoli Posse
(co-orientadora)



Prof. Dr. José Carlos Lopes
(Orientador)

.....

OFEREÇO

Aos meus pais, Adalgisa e Dalton, que me proporcionaram uma infância maravilhosa, mostraram-me o verdadeiro poder do estudo e em quem me espelho para o resto da minha vida.

DEDICO

À minha esposa Ludymila, à minha irmã Tamires e às minhas avós Maria Helena e Therezinha, grandes exemplos de pessoas.

“Vem, chuva mansa, umedecer a terra!

Vem prepará-la para a plantação.

Para que as sementes lançadas nela

saciam a fome da população.”

(Therezinha Juliana Almeida da Fonsêca)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Espírito Santo e ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias pela oportunidade.

À Ludymila Brandão Motta pelo companheirismo, amizade, apoio, ajuda, carinho e amor.

Ao professor José Carlos Lopes pela orientação, confiança e amizade.

Ao professor . Adésio Ferreira pela orientação, desafios e amizade.

Ao Incaper pela disponibilização das sementes, e pelo apoio da pesquisadora Dr^a. Sheila Cristina Prucoli Posse.

À CAPES e ao CNPq pela concessão e pelo financiamento da bolsas.

Aos Engenheiros Agrônomos José Henrique Guilhen e Tiago Souza Marçal pelas discussões e valiosas contribuições nas análises de dados e pela amizade.

Aos amigos do Laboratório de Sementes pelo intercâmbio de informações e pela agradável convivência: Allan, Alice, Arêssa, Carla, Khetrin, Lucimara, Manoel, Nathália, Verônica, Zé Maria e professor Rodrigo Sobreira Alexandre, e especialmente Carlos, Liana, Melissa e Paulinha que participaram mais diretamente dos trabalhos.

À minha família e amigos que sempre ficaram juntos de mim em todos os momentos. Ao Laboratório de Nutrição Mineral do CCA-UFES, e ao técnico Sílvio pelo auxílio nas análises mineralógicas.

À secretaria de Pós-Graduação (PPGPV/CCA-UFES) pelo suporte durante o período.

Enfim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

BIOGRAFIA

Rafael Fonsêca Zanotti, filho de Adalgisa Olinda Fonsêca Zanotti e Dalton de Rezende Zanotti, nasceu em São José do Calçado, estado do Espírito Santo, no dia 20 de agosto de 1987.

Em 2005, ingressou-se na Universidade Federal do Espírito Santo, no *Campus* Goiabeiras, em Vitória-ES, graduando-se em Ciências Biológicas, com Bacharelado e Licenciatura, em 2009.

Em 2009, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal da Universidade Federal de Viçosa, UFV, Brasil, como bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, Brasil, obtendo o título de mestre em Fisiologia Vegetal, em 2011.

Em 2012, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, na Linha de Pesquisa Ecofisiologia da germinação e desenvolvimento de plantas, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, Brasil, com obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal em 28 de agosto de 2015.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
Referências	14
CAPÍTULO I	18
Estresse hídrico e salino na cultura do feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)...	18
CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
Referências	29
CAPÍTULO II	35
Composição mineral e bioquímica de grãos de feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) e suas implicações no melhoramento vegetal	35
CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
Referências	45
CAPÍTULO III	51
Características fisiológicas de sementes de feijão sob multicolinearidade em condições de salinidade	51
RESUMO.....	52
1. Introdução	53
2. Material e métodos	54
3. Resultados e Discussão	56
4. Conclusões.....	62
5. Agradecimentos.....	62
6. Referências	62
CAPÍTULO IV	66
Análise de fatores aplicada à seleção de genótipos de feijão tolerantes ao estresse osmótico	66
1. Introdução	68
2. Material e métodos	69
3. Resultados e discussão.....	74
4. Conclusão	87
5. Referências	88
CAPÍTULO V	94
Diversidade mineralógica e seleção de feijão biofortificado.....	94
1. Introdução	96
2. Material e métodos	96
3. Resultados e discussão.....	99
4. Conclusão	111

5. Referências	111
CONSIDERAÇÕES FINAIS	115

ZANOTTI, Rafael Fonsêca, Universidade Federal do Espírito Santo, Agosto de 2015. MÉTODOS MULTIVARIADOS APLICADOS AO MELHORAMENTO GENÉTICO DO FEIJOEIRO VISANDO AO AUMENTO DA TOLERÂNCIA AO ESTRESSE OSMÓTICO E BIOFORTIFICAÇÃO DE GRÃOS. Orientador: Prof. Dr. José Carlos Lopes. Coorientadores: Dr^a. Sheila Cristina Prucoli Posse e Prof. Dr. Adésio Ferreira.

RESUMO

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma cultura agrícola muito importante economicamente e nutricionalmente para a população brasileira e necessita de metodologias simples e eficazes que auxiliem o processo de melhoramento genético. As técnicas empregadas devem minimizar os efeitos indesejáveis da multicolinearidade entre as características estudadas durante o processo de seleção. A produção de sementes de feijão, normalmente, é limitada pela escassez hídrica e solos salinos. No entanto, devido a grande variabilidade genética, característica da espécie, é possível encontrar materiais genéticos mais tolerantes a esses estresses osmóticos. A germinação e o desenvolvimento inicial da plântula são fases críticas e desta maneira é importante selecionar os materiais genéticos mais tolerantes nestas fases. Além de selecionar genótipos tolerantes é necessário selecionar materiais genéticos que sejam ricos nutricionalmente, principalmente, em relação à composição mineralógica. Os principais objetivos almejados com este trabalho foram reduzir a multicolinearidade e selecionar genótipos para a tolerância ao estresse osmótico e a biofortificação dos grãos do feijoeiro, com base nos valores genéticos. Desta maneira, foram utilizadas duas técnicas para reduzir a influência da multicolinearidade: o descarte de variáveis redundantes pelas variáveis canônicas, e o uso das análises de fatores para reduzir o número de variáveis. As variáveis analisadas foram: porcentagem de germinação e de plântulas normais, tempo médio de germinação, índice de velocidade de germinação, comprimentos de raiz e de hipocótilo, massas seca de raiz e da parte aérea, razão raiz/parte aérea e o produto da porcentagem de plântulas normais pelo comprimento das plântulas. Avaliou-se também a composição mineralógica dos grãos em relação à concentração de cálcio, ferro, zinco, potássio, magnésio, manganês e fósforo. Adicionalmente, para estimar os parâmetros e os valores genéticos realizou-se análise via modelos mistos, utilizando-se a técnica de REML/BLUP. Os genótipos foram selecionados com base da média genética, estabilidade e adaptabilidade, utilizando-se a técnica da média harmônica da performance relativa dos valores genéticos. Os genótipos que apresentaram as maiores tolerâncias, adaptabilidade e estabilidade quanto aos estresses osmóticos foram: CNFC 15466, CNFC 15462, CNFC 15630, BRS Valente, Capixaba Precoce, CNFP 15290, CNFP 15292 e CNFP 15302. Enquanto os genótipos mais ricos e divergentes geneticamente do grupo comercial carioca foram: CNFC 15475 e CNFC 15625, e do grupo comercial preto foram: CNFP 15310 e CNFP 15304. Conclui-se que a utilização de técnicas multivariadas facilita a seleção de genótipos promissores como parentais na formação de linhagens tolerantes ao estresse osmótico e biofortificados.

Palavras-chave: feijoeiro comum; seleção de genótipos; estresse hídrico e salino; multicolinearidade; composição mineral.

ZANOTTI, Rafael Fonsêca, Universidade Federal do Espírito Santo, Agosto de 2015.
MULTIVARIATE METHODS APPLIED TO THE BREEDING OF THE BEAN
TARGETING THE INCREASED OSMOTIC STRESS TOLERANCE AND GRAIN
BIOFORTIFICATION. Advisor: Prof. Dr. José Carlos Lopes. Co- Advisors: Dr^a. Sheila
Cristina Prucoli Posse e Prof. Dr. Adésio Ferreira.

ABSTRACT

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a very important crop economically and nutritionally for the Brazilian population and needs a simple and effective methodology that help the breeding process. The techniques should minimize the adverse effects of multicollinearity among the characteristics studied during the selection process. The production of bean seeds is usually limited by water shortage and saline soils. However, because of the great genetic variability, characteristic of the species, it can find more tolerant genetic materials to this osmotic stress. The germination and early seedling development are critical stage and thus it is important to select the most tolerant genetic materials in these phases. In addition to selecting tolerant genotypes it is necessary to select genetic material that are nutritionally rich, especially with respect to the mineralogical composition. The main objectives were to reduce multicollinearity and select genotypes for tolerance to osmotic stress and biofortification of bean grains, based on genetics values. Thus, two techniques were used to reduce the influence of multicollinearity: discarding redundant variables by canonical variable analysis and the use of the factors analyses to reduce the number of variables. The variables analyzed were: percentage of germination and normal seedlings, mean germination time, germination velocity index, root length and hypocotyl, dry weight of root and shoot, root / shoot ratio and the product of the percentage of normal seedlings by the length of seedlings. Also evaluated in the mineral composition of grains in relation to the concentration of calcium, iron, zinc, potassium, magnesium, manganese and phosphorus. Additionally, to estimate the parameters and genetic values held via mixed model analysis, using the technique of REML / BLUP. The genotypes were selected based on genetic average, stability and adaptability, using the harmonic mean of the relative performance of the technique of genetic values. Genotypes with the highest tolerances, adaptability and stability as to osmotic stress were CNFC 15466, CNFC 15462, CNFC 15630, BRS Valente, Capixaba precoce, CNFP 15290, CNFP 15292 and CNFP 15302. While the richest and most genetically divergent genotypes of pinto bean commercial group were CNFC 15475 and CNFC 15625, and black trade group were: CNFP 15310 and CNFP 15304. The use of multivariate techniques facilitates the selection of promising genotypes as parents in the formation of lines tolerant to osmotic stress and biofortified.

Keywords: common bean; selection of genotypes; water and salt stress; multicollinearity; mineral composition.

INTRODUÇÃO GERAL

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma espécie importante para alimentação humana por ser uma fonte de aminoácidos (RIBEIRO et al., 2010), potássio, ferro, zinco, cálcio, cobre (RIBEIRO et al., 2012), fibras solúveis e insolúveis (LONDERO et al., 2009). A produção mundial está estimada em 23 milhões de toneladas de grãos, sendo que o Brasil destaca-se como um dos maiores produtores de feijão, com aproximadamente 12% da produção mundial (FAO, 2013).

O estresse osmótico no solo é um dos fatores que causa a redução da produtividade em diversas culturas (MACHADO et al., 2007), sendo o feijoeiro uma das culturas mais sensíveis (BEN-GAL et al, 2009). Os estresses salino e hídrico afetam negativamente a germinação, o crescimento, o desenvolvimento e a produção do feijoeiro (BOURGAULT et al., 2010; TAÏBI et al., 2011; BOURGAULT. et al. , 2013; SAEIDI-SAR et al., 2013). Porém, entre os genótipos de feijoeiro já foram identificados materiais tolerantes ao estresse osmótico (GAMA et al., 2007; AGUIAR et al., 2008), o que pode auxiliar os programas de melhoramento da cultura na utilização desses germoplasmas para o lançamento de novas variedades.

A análise multivariada é uma alternativa para auxiliar os melhoristas de plantas a trabalhar com um conjunto de variáveis e selecionar genótipos tolerantes ao estresse osmótico (MOREIRA et al, 2009; ZILIO et al, 2011). Para a interpretação correta dos dados deve-se avaliar a multicolinearidade entre as variáveis, que pode comprometer a eficiência das técnicas multivariadas que utilizam a matriz de covariância residual (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012; TOEBE; CARGNELUTTI FILHO, 2013).

A retirada de características que apresentam alta multicolinearidade é importante, uma vez que pode alterar o agrupamento dos indivíduos e superestimar a correlação simples e efeitos diretos para as características avaliadas sob multicolinearidade (COIMBRA et al., 2005; CARGNELUTTI FILHO et al., 2009). Com a finalidade de reduzir a multicolinearidade, o melhorista pode utilizar o descarte de variáveis redundantes, o que contribui para reduzir o tempo e a mão de obra em avaliações futuras (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012).

Outra técnica que permite a redução da multicolinearidade é a análise de fatores, que permite identificar combinações de variáveis e compreender as inter-relações entre as mesmas, expressando as covariâncias e facilitando a seleção de

genótipos promissores. Com essa técnica, é possível substituir o conjunto original de características por um conjunto inteiramente novo, com menor número de variáveis criadas (FERREIRA et al., 2010), mantendo todas as relações originais das variáveis. A análise de fatores permite que os pesquisadores selecionem genótipos não só com base de seus valores fenotípicos, mas permite a seleção por co-variação das cargas fatoriais das variáveis latentes, que, portanto, não pode ser observado diretamente na amostra (RENCHE, 2002).

Durante o processo de melhoramento genético do feijoeiro deve-se buscar a tolerância ao estresse osmótico e, além disso, deve-se aumentar a concentração dos nutrientes nas sementes, promovendo a biofortificação que permite o acesso a maior parte de população a uma alimentação mais equilibrada (BOUIS et al., 2011). Há grande diversidade em relação aos teores de minerais nas sementes, sendo possível selecionar materiais genéticos superiores para desenvolver linhagens de feijoeiro biofortificados (RIBEIRO, 2010 ; ROSA et al., 2010).

Os objetivos deste trabalho foram a análise de diferentes metodologias de redução da multicolinearidade e a seleção de genótipos de feijoeiro tolerantes aos estresses osmóticos. Além disso, selecionou-se genótipos de feijoeiro ricos nutricionalmente.

Referências

AGUIAR, R. S., MODA-CIRINO, V., FARIA, R. T., VIDAL, L. H. I. Avaliação de linhagens promissoras de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerantes ao déficit hídrico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 1, p. 1-14, 2008.

BEN-GAL, A.; BOROCHOV-NEORI, H.; YERMIYAHU, U.; SHANI, U. Is osmotic potential a more appropriate property than electrical conductivity for evaluating whole-plant response to salinity? **Environmental and Experimental Botany**, v. 65, n. 2, p. 232-237, 2009.

BOUIS, H. E.; HOTZ, C.; MCCLAFFERTY, B.; MEENAKSHI, J. V.; PFEIFFER, W. H. **Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. Food Nutrition Bulletin**, v. 32, n. Sup. 1, p. 31-40, 2011.

BOURGAULT, M. ; MADRAMOOTOO, C. A.; WEBBER, H. A.; HORST, M. G.; STULINA, G.; SMITH, D. L. Legume Production and Irrigation Strategies in the Aral Sea Basin: Yield, Yield Components, Water Relations and Crop Development of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and Mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek). **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 199, n. 4, p. 241-252, 2013.

BOURGAULT, M.; MADRAMOOTOO, C. A.; WEBBER, H. A.; STULINA, G.; HORST, M. G.; SMITH, D. L. Effects of deficit irrigation and salinity stress on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) grown in a controlled environment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 196, n. 4, p. 262-272, 2010.

CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L.; RIBEIRO, N.D. Agrupamento de cultivares de feijão em presença e em ausência de multicolinearidade. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2409-2418, 2009.

COIMBRA, J. L. M., BENIN, G., VIEIRA, E. A., OLIVEIRA, A. C. D., CARVALHO, F. I. F., GUIDOLIN, A. F., SOARES, A. P. Consequências da multicolinearidade sobre a análise de trilha em canola. **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 347-352, 2005.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3.ed. Viçosa: Ed. UFV, 2004. v.1, 480p.

FERREIRA, F. M.; NEVES, L. G.; BRUCKNER, C. H.; VIANA, A. P.; CRUZ, C. D., BARELLI, M. A. A. Formação de supercaracteres para seleção de famílias de maracujazeiro amarelo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 2, p. 247-254, 2010.

GAMA, P. B. S., INANAGA, S., TANAKA, K., NAKAZAWA, R. Physiological response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings to salinity stress. **African Journal of biotechnology**, v. 6, n. 2, 2007.

LONDERO, P. M. G.; RIBEIRO, N. D.; JOST, E.; MAZIERO, S. M.; CERUTTI, T.; POERSCH, N. L. Genética dos teores de fibras insolúvel e solúvel em grãos de feijão. **Revista Ceres**, v. 56, n. 2, p. 150–155, 2009.

MACHADO, R.; AGUIAR NETTO, A. O., CAMPECHE, L.; BARROS, A. Efeito da Salinidade em Características Físico-Hídricas em Solos Salino-Sodilizados no

Perímetro Irrigado Jabiberi-SE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 1, n. 1, p. 15-19, 2007.

MOREIRA, R. M. P., FERREIRA, J. M., TAKAHASHI, L. S. A., VASCONCELOS, M. E. C., GEUS, L. C., BOTTI, L. Potencial agrônômico e divergência genética entre genótipos de feijão-vagem de crescimento determinado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, n. 4, sup1, p. 1051-1060, 2009.

RENCHER, A. C. (2003). **Methods of multivariate analysis**. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons. 738 p.

RIBEIRO, N. D. Potencial de aumento da qualidade nutricional do feijão por melhoramento genético. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, sup.1, p. 1367-1376, 2010.

RIBEIRO, N. D.; LONDERO, P. M. G.; CARGNELUTTI FILHO, A.; JOST, E. Composição de aminoácidos de gerações precoces de feijão obtidas a partir de cruzamentos com parental de alto teor de metionina. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 57-61, 2010.

RIBEIRO, N. D.; MAZIERO, S. M.; PRIGOL, M.; NOGUEIRA, C. W.; ROSA, D. P.; POSSOBOM, M. T. D. F. Mineral concentrations in the embryo and seed coat of common bean cultivars. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 26, n. 1-2, p. 89–95, 2012.

ROSA, S. S.; RIBEIRO, N. D.; JOST, E.; REINIGER, L. R. S.; ROSA, D. P.; CERUTTI, T.; POSSOBOM, M. T. D. F. Potential for increasing the zinc content in common bean using genetic improvement. **Euphytica**, v. 175, n. 2, p. 207–213, 2010.

SAEIDI-SAR, S.; ABBASPOUR, H.; AFSHARI, H.; YAGHOUBI, S. R. Effects of ascorbic acid and gibberellin GA₃ on alleviation of salt stress in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 3, p. 667-677, 2013.

TOEBE, M.; CARGNELUTTI FILHO, A. Não normalidade multivariada e multicolinearidade na análise de trilha em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 5, p. 466-477, 2013.

ZILIO, M.; COELHO, C. M. M.; SOUZA, C. A.; SANTOS, J. C. P.; MIQUELLUTI, D. J. Contribuição dos componentes de rendimento na produtividade de genótipos crioulos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 429-438, 2011.

CAPÍTULO I

ESTRESSE HÍDRICO E SALINO NA CULTURA DO FEIJOEIRO *(Phaseolus vulgaris L.)*¹

¹ Capítulo publicado no livro “Tópicos Especiais em Produção Vegetal V”, PPGPV, cap.18 p.389-406

ESTRESSE HÍDRICO E SALINO NA CULTURA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa da família Fabaceae, cujo grão é muito apreciado pela população brasileira (MAPA, 2013), destacando-se como uma importante fonte de proteínas, vitaminas e ferro (PLANS et al., 2013), e o Brasil destaca-se como o maior produtor mundial de feijão, cuja safra 2013/2014 foi estimada com uma produtividade de 3,7 milhões de toneladas (CONAB, 2014).

A produtividade de diversas culturas vegetais diminui com a salinização dos solos (MACHADO et al., 2007), sendo o feijoeiro uma das culturas mais sensíveis (MUNNS, 2005; BEN-GAL et al., 2009). Os estresses salino e hídrico são alguns dos fatores que mais afetam negativamente a germinação, o crescimento, o desenvolvimento e a produção do feijoeiro (BOURGAULT et al., 2010; TAÏBI et al., 2011; BOURGAULT et al., 2013; SAEIDI-SAR et al., 2013). Mesmo sendo plantas sensíveis, com a suspensão da irrigação por períodos de até 17 dias elas são capazes de restabelecer o desenvolvimento normal quando reidratadas (ZADRAŽNIK et al., 2013).

O vigor das sementes de feijão reduz mais acentuadamente quando expostas a soluções com potenciais osmóticos menores que -0,9 MPa (COELHO et al., 2010). Enquanto as plantas em campo toleram escassez hídrica, de uma forma geral, com o potencial osmótico das folhas em torno de -1,0 MPa (GUIMARÃES; STONE; BRUNIN, 2006).

1.1 Efeitos dos estresses salino e hídrico no feijoeiro

O feijoeiro é uma planta muito sensível à redução do potencial osmótico e, além disso, é uma planta muito sensível à presença de altas concentrações de sais tanto durante a germinação quanto em todo resto do seu ciclo de vida.

Inúmeros sais podem induzir o estresse salino nas plantas de feijoeiro como, por exemplo: CaCl_2 ; CaSO_4 ; NaCl ; Na_2SO_4 ; MgCl_2 ; MgSO_4 ; KCl e K_2SO_4 . Dentre esses sais, o estresse salino mais severo ocorre nas plantas de feijoeiro quando expostas à salinidade induzida ou produzida por NaCl . Sob condições de estresse salino, a planta apresenta uma absorção de nutrientes desequilibrada, que é um dos motivos da redução do crescimento da planta (AYDIN; KANT; TURAN, 2012).

Os parâmetros de crescimento da raiz e da parte aérea são afetados negativamente na presença de salinidade (KHADRI; TEJERA; LLUCH, 2007;

ROSALES et al., 2012), principalmente, pelo acúmulo dos íons e reduzem a produção de biomassa da raiz e da parte aérea, das concentrações de clorofila, de nitrato e de macronutrientes na planta (AYDIN; KANT; TURAN, 2012). Na presença de NaCl a parte aérea é a mais comprometida (KHADRI; TEJERA; LLUCH, 2007) e a raiz é comprometida por causa da redução da condutividade hídrica nas raízes do feijoeiro (CALVO-POLANCO; SÁNCHEZ-ROMERA; AROCA, 2014) e com isso ocorre uma maior restrição de entrada de água na planta e dificilmente é mantido um balanço hídrico adequado para o desenvolvimento.

O maior dano da parte aérea pode estar relacionado com o maior acúmulo de Cl^- nesta porção da planta, e, além disso, existe maior translocação do Na^+ para parte aérea para ser excluído pelas folhas (SIBOLE et al., 2000), provocando este desbalanço iônico que pode levar as plantas a terem problemas relacionados à menor síntese de proteínas.

Durante a germinação de sementes de feijão sob estresse osmótico ocorrem modificações da expressão de proteínas tanto de alto quanto de baixo peso molecular. Porém, as respostas não são as mesmas quando estão sob estresses hídrico ou salino (COELHO et al., 2010). Sob estresse salino, as sementes de feijão apresentam redução da atividade da enzima amilase, sugerindo uma provável redução da translocação de açúcares para o eixo embrionário durante a germinação e desenvolvimento inicial das plântulas. No entanto, ocorre maior atividade de enzimas proteases (ZEID, 2009), indicando uma elevada necessidade de aminoácidos livres.

Segundo Aydin; Kant; Turan (2012), a clorofila total e os teores de nitrato de plantas diminuem com o aumento das doses de NaCl. Os teores de prolina são aumentados nos tecidos vegetais com o incremento das doses de NaCl. Plantas de feijoeiro desenvolvidas sob estresse salino acumulam prolina em todos os tecidos, porém a menor concentração é encontrada na raiz. Deve-se destacar que os genótipos mais tolerantes apresentam maior acúmulo de prolina (JIMÉNEZ-BREMONT et al., 2006) e com o aumento da severidade do estresse salino, os teores de prolina da planta aumentam proporcionalmente (AYDIN; KANT; TURAN, 2012). Isto, porque a prolina é uma molécula osmoticamente ativa, que pode proporcionar redução do potencial osmótico, e desta maneira proporcionar maior tolerância ao estresse osmótico (SILVEIRA et al., 2010) .

Plantas de feijoeiro que se desenvolvem sob estresse salino apresentam acúmulo de outros osmólitos além da prolina, incluindo a glicina betaína. Estes dois compostos são importantes reguladores do potencial osmótico das células vegetais (NAGESH BABU; DEVARAJ, 2008).

Segundo Calvo-Polanco; Sánchez-Romera; Aroca (2014), as plantas de *P. vulgaris* são capazes de superar estresses salinos moderados por um período relativamente curto. As plantas apresentam modificações capazes de manter o equilíbrio de água por acúmulo de frutose e redistribuição da localização de proteínas intrínsecas da membrana plasmática (PIP) no córtex da raiz. A condutividade hidráulica da raiz é significativamente menor em plantas submetidas ao estresse com NaCl. Isto pode ser uma das respostas para a redução do crescimento, pois nessas condições ocorre uma menor condutância estomática e potencial hídrico foliar. Algumas das proteínas PIP que se modificam durante o estresse salino são relacionadas com as aquaporinas das raízes do feijoeiro. Gaspar (2011) relatou que as aquaporinas são proteínas relacionadas com o transporte de água e de outras substâncias. Elas são capazes de manter a condutividade hidráulica da raiz e em várias espécies já foi demonstrado que as aquaporinas também têm importante papel em condições de estresses ambientais.

Nas situações em que o feijoeiro é exposto ao estresse salino, as proteínas PIP são realocadas para células corticais perto da epiderme e para células circundantes aos vasos xilemáticos do feijoeiro. Isto facilita a entrada de água pela via simplasto, permitindo melhor condução hidráulica das raízes e dificultando a saída da água para o meio exterior da planta (CALVO-POLANCO; SÁNCHEZ-ROMERA; AROCA, 2014).

Segundo Bayuelo-Jimenez; Jasso-Plata; Ochoa (2012), plantas de feijão sob estresse salino apresentam decréscimos no crescimento vegetativo por causa da redução da atividade fotossintética das folhas. As espécies sensíveis ao sal reduzem a taxa fotossintética, devido à menor condutância estomática foliar, o que acarreta em reduções da pressão de vapor e, conseqüentemente, da transpiração, da taxa fotossintética e do acúmulo de biomassa.

O ajustamento osmótico, de uma forma geral, ocorre em todas as espécies de *Phaseolus* sp.. As espécies tolerantes ao sal acumulam maior quantidade de carboidratos solúveis nas folhas, enquanto, as espécies sensíveis à salinidade mantêm o turgor celular acumulando Cl^- , entretanto, o acúmulo deste íon reduz a

biomassa da planta por causa da sua toxicidade (BAYUELO-JIMENEZ; JASSO-PLATA; OCHOA, 2012).

As análises proteômicas revelam que 77% da expressão total das proteínas estão relacionadas com as modificações nos metabolismos de carboidratos e aminoácidos nas pontas das raízes de feijoeiro, quando submetido ao estresse osmótico (YANG et al., 2013).

As proteínas hidrolíticas desidrininas são importantes moduladores da proteção da estrutura da parede celular, podendo participar nas alterações da porosidade da parede celular e manutenção da integridade e reversibilidade das propriedades de extensão da parede celular durante o estresse osmótico (YANG et al., 2013). Elas são consideradas moléculas importantes na tolerância à dessecação para os vegetais (CHEN; FESSEHAIE; ARORA, 2012). As desidrininas estão localizadas principalmente na região central da raiz, mas quando o feijoeiro é submetido ao estresse hídrico, as desidrininas se localizam mais intensamente na epiderme e córtex da parte apical da raiz (YANG et al., 2013). Assim, essas modificações permitem a manutenção das membranas celulares e a capacidade de condutância hídrica das raízes.

Durante o estresse osmótico, ocorre a redução do potencial osmótico das células em menos de 24 horas, sugerindo um ajustamento osmótico com o acúmulo de osmólitos que facilitam a entrada de água nas células. Desse modo, há uma maior adaptação ao estresse osmótico, permitindo que isso ocorra de forma muito rápida (YANG et al., 2013). Os genótipos de *P. vulgaris* mais tolerantes ao estresse osmótico e hídrico, provavelmente, apresentam respostas mais rápidas às modificações hídricas do ambiente.

O feijoeiro é sensível ao estresse hídrico, e seu aparato fotossintético é comprometido, fazendo com que a fotossíntese líquida máxima seja reduzida quando apresenta escassez de água no ambiente, induzindo a um menor acúmulo de açúcares. A menor taxa fotossintética ocorre também pela redução da atividade nas cadeias transportadoras de elétrons tanto no fotossistema I quanto no fotossistema II nos cloroplastos. Ocorre redução da máxima eficiência de conversão de energia luminosa quando as plantas de feijão estão sob escassez hídrica. Além disso, ocorre redução da taxa fotossintética líquida acompanhada da redução da condutância estomática e taxa transpiratória. Ocorre aumento da concentração de carotenoides fotoprotetores/ antioxidativos (zeaxantina, luteína e beta-caroteno),

quando as plantas de feijão são submetidas à falta de água (RAMALHO et al., 2013).

Segundo Sibole et al. (2000), a área foliar e a assimilação de CO₂ são inibidas pela alta concentração do sal. A salinidade e a escassez de água reduzem o índice de colheita do feijoeiro, e estimulam o aumento da proporção da massa da raiz em relação à massa total da planta. O desenvolvimento dos frutos e da parte aérea é mais afetado do que o crescimento da raiz. Desta maneira, existe uma relação inversa do aumento da massa seca da raiz com redução do índice de colheita, provavelmente, por que a planta investe mais no aumento da raiz e como existe uma menor taxa fotossintética, os fotoassimilados são translocados, prioritariamente, para a raiz ao invés de irem para a parte aérea e frutos (SIBOLE et al., 2000; BOURGAULT et al., 2013).

O Na⁺ é excluído prioritariamente em folhas e frutos e é acumulado nas raízes e caules, enquanto o Cl⁻ é acumulado nas folhas e frutos. O acúmulo de Cl⁻ na parte aérea da planta pode ser um dos responsáveis pela redução do seu crescimento, pois, este ânion é muito reativo, e desta maneira compromete o metabolismo da planta e reduz o teor de proteínas nas folhas de plantas desenvolvidas sob estresse salino (SIBOLE et al., 2000).

Segundo Saeidi-Sar et al. (2013), planta de feijão na presença de estresse com NaCl apresenta alta concentração de Na⁺ e uma baixa concentração do K⁺ na raiz e no caule, provocando um desbalanço da relação de K/Na, o que pode estar associado com problemas relacionados ao estresse osmótico e falta de cofatores para as enzimas. Por causa deste desbalanço iônico no interior das células pode ocorrer o comprometimento das atividades metabólicas e redução na concentração de proteínas no caule e raiz, ocasionando um menor desenvolvimento, e muitas vezes com plântulas anormais.

Durante o estresse salino as plantas de feijão apresentam aumento na concentração de ácido abscísico (ABA) em raízes, caules, folhas e frutos (SIBOLE et al., 2000). O ABA é um regulador de crescimento que se destaca na capacidade fotossintética das plantas por reduzir a condutância estomática e a transpiração e, conseqüentemente, a assimilação líquida de CO₂ (PACHECO; CAMARGO; SOUZA, 2011). Esses decréscimos nas taxas fotossintéticas em condições de escassez de água permitem que a planta sobreviva com a perda mínima de água e possa ser

restabelecido seu crescimento quando a condição hídrica for favorável (ROSALES et al., 2012).

Sob condição de estresse salino ocorre aumento na concentração de ABA. No entanto, em algumas variedades de feijão a presença de ABA permite aumentar a razão K/Na e desta maneira ocorre menor efeito deletério do estresse salino, por causa do menor acúmulo de Na^+ na parte aérea da planta (KHADRI; TEJERA; LLUCH, 2007). O aumento das concentrações de ABA resulta no aumento da concentração de Na^+ nas folhas devido à baixa exclusão de Na^+ ou incremento da translocação no sentido raiz-parte aérea (CABOT et al., 2009).

Os genótipos de feijão tolerantes à seca apresentam como características modificações rápidas no metabolismo, ajuste da condutância estomática, melhor difusão e fixação de CO_2 , aumento da eficiência do uso da água e evita o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ERO). Sob estresse hídrico severo, as plantas de feijão apresentam redução significativa da fotossíntese, condutância estomática e transpiração, porém aumenta-se a eficiência do uso da água (ROSALES et al., 2012).

Genótipos de feijão mais tolerantes ao estresse salino apresentam redução do teor relativo de água. A redução do teor de água possibilita o ajustamento de alguns osmólitos, e desta maneira reduz o potencial osmótico da planta permitindo um melhor desempenho mesmo sob condições de restrição hídrica (ROSALES et al., 2012). O teor relativo de água nas folhas demonstra ter pouca relação com o baixo crescimento de espécies de *Phaseolus* sp., pois, pouca diferença foi observada entre os genótipos desenvolvidos sob salinidade em relação ao conteúdo hídrico (BAYUELO-JIMENEZ; JASSO-PLATA; OCHOA, 2012). No entanto, para o *Phaseolus vulgaris* o teor relativo de água das folhas de plantas submetidas ao estresse hídrico pode reduzir para menos de 50%, enquanto as folhas de feijoeiro sob irrigação adequada se mantêm em torno de 80% do teor relativo de água (ZADRAŽNIK et al., 2013).

Genótipo de feijão susceptível ao estresse hídrico apresenta redução da atividade de enzima oxidase do glicolato (enzima associada com a fotorrespiração). Entretanto, genótipos de feijão tolerantes ao estresse hídrico apresentam maior expressão dessa enzima, quando está submetido ao estresse hídrico (ROSALES et al., 2012).

Genótipos de feijão susceptíveis ao estresse hídrico em condição de restrição hídrica apresentam maiores concentrações de indicadores de estresses oxidativos, como a concentração de malondialdeído (MDA), que está relacionada à degradação da membrana plasmática celular, e aumento de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) nas folhas. Em contraste, genótipos de cultivares tolerantes apresentam mecanismos para não alterar a concentração destes compostos durante o estresse hídrico (ROSALES et al., 2012). Genótipos de feijoeiro submetidos ao estresse hídrico apresentam incrementos nas atividades das enzimas antioxidativas como: dismutase do superóxido (SOD), catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX), mas o aumento da atividade é maior nas plantas susceptíveis à seca. Genótipo tolerante apresenta aumento significativo de ácido ascórbico nas folhas em situação de seca moderada e severa, porém o genótipo susceptível apresenta incremento apenas quando a seca é severa. Além disso, ocorre acúmulo de compostos fenólicos e flavonoides em resposta à seca, funcionando como um indicativo de mecanismos que promovem a proteção do sistema fotossintético das plantas de feijão sob condições de estresse hídrico (ROSALES et al., 2012).

Cultivares de feijão com crescimento indeterminado apresentam melhores adaptações às condições de seca do que cultivares com crescimento determinado. O maior acúmulo de biomassa na parte aérea pode indicar uma das adaptações do feijoeiro ao estresse hídrico. Durante a seca o feijoeiro apresenta redução do número de dias para alcançar a maturidade, e os genótipos de feijoeiro tolerantes à seca apresentam uma maior aceleração da maturidade e uma alta taxa de enchimento de grãos, que diminuem o impacto da seca (ROSALES-SERNA et al., 2004).

O estresse salino pode causar danos nas células por induzir a morte celular atribuído à peroxidação de lipídios da membrana celular, à oxidação de proteínas, à inibição de enzimas, e danos no DNA e RNA, induzidos pelas espécies reativas de oxigênio (NAGESH BABU; DEVARAJ, 2008; SILVEIRA et al., 2010).

Quando plantas de feijoeiro estão sob condições estressantes como a presença de elevada concentração salina, ocorre aumento do estresse oxidativo e uma tendência de aumento do acúmulo de EROs, H_2O_2 e substâncias indicadoras de dano na membrana celular. No entanto, o feijoeiro apresenta mecanismos fisiológicos para reduzir estes efeitos deletérios, com o aumento de enzimas antioxidativas, como peroxidase (POX), redutase da glutatona (GR) e CAT e por

meio de antioxidantes não enzimáticos, como glutatona e ácido ascórbico e o incremento do aminoácido prolina. Enzimas importantes no consumo de amido (beta-amilase) e aumento do conteúdo de fosfato inorgânico (fosfatase ácida) apresentam um moderado aumento de suas atividades, quando as plantas de feijão estão sob estresse salino (NAGESH BABU; DEVARAJ, 2008).

Os efeitos deletérios da salinidade na parte aérea do feijoeiro podem ser observados na redução dos teores de clorofilas *a* e *b*, carotenoides e antocianina, demonstrando o comprometimento dos pigmentos importantes para a realização da fotossíntese e fotoproteção. Essa evidência aliada à redução da fotorrespiração (RADY, 2011; ROSALES et al., 2012) proporcionam aumento da concentração de EROs, o que intensifica os danos na parte aérea das plantas em comparação com o sistema radicular.

Durante o desenvolvimento do feijoeiro sob estresse salino existe um comprometimento do desenvolvimento de nódulos de bactéria *Rhizobium* nas raízes. Estas bactérias apresentam papel fundamental na fixação de nitrogênio em simbiose com leguminosas. Quando as plantas estão sob estresse salino existe uma menor absorção de nitrogênio e como reflexo existe maior clorose das folhas e secamento das mesmas. É observado que o uso de linhagens de *Rhizobium* tolerantes ao estresse salino em genótipos de feijoeiro susceptíveis permite melhor o desenvolvimento, mesmo sob condições adversas (BOUHMOUCH et al., 2005).

Plantas de feijoeiro com presença simbiótica de fungos micorrízicos, quando submetidas aos estresses hídrico e salino apresentam maior condutividade hídrica das raízes e maior expressão de proteínas aquaporinas do que as plantas sem presença desses fungos (AROCA; PORCEL; RUIZ-LOZANO, 2007), demonstrando mecanismos claros das plantas para maior tolerância a esses estresses.

1.2 Métodos abióticos para superação do estresse salino e hídrico

Segundo Saeidi-Sar et al. (2013), o uso de ácido ascórbico e ácido giberélico (GA₃), isolados ou combinados, permite aumento da concentração de antocianina. A utilização desses compostos ocasiona uma redução considerável da concentração de Na⁺ tanto na raiz quanto na parte aérea de plântulas de feijão que se desenvolveram na presença de NaCl. O NaCl ocasiona uma menor concentração de proteínas nas plântulas de feijão, mas, com a aplicação de ácido ascórbico e GA₃, a concentração de proteínas é aumentada (SAEIDI-SAR et al., 2013). A aplicação

conjunta de GA₃ e ácido ascórbico promove uma redução dos efeitos deletérios do estresse salino, como a redução da concentração de MDA na parte aérea do feijoeiro (SAEIDI-SAR et al., 2013).

Os resultados obtidos por Palma et al. (2009), trabalhando com feijoeiro sob estresse indicam que o ácido salicílico proporciona melhores desenvolvimentos da planta sob estresse salino. Este fato é suportado pela diminuição de solutos orgânicos (prolina e açúcar solúvel total) e atividades enzimáticas antioxidativas de POX, APX e redutase do monodehidroascorbato (MDHAR), bem como pela menor quantidade de danos das membranas. O tratamento de sementes de feijão com ácido salicílico permite a mitigação dos efeitos do déficit hídrico, determinando o aumento da expressão de várias proteínas relacionadas à “proteína de choque térmico” (Hsp) e aumenta a concentração do aminoácido prolina (permite um ajustamento osmótico das plântulas) (AGOSTINI; MACHADO-NETO; CUSTÓDIO, 2013). A família de proteínas Hsp apresenta expressão diferenciada em relação à presença de estresses ambientais, servindo como mecanismo de defesa das células vegetais (FEDER; HOFMANN, 1999).

A imersão das sementes de feijão em extrato de folhas de *Moringa oleifera* melhora a resposta das plantas ao estresse salino pelo aumento da concentração de K⁺ e redução da concentração de Na⁺ e Cl⁻ nas folhas. Um dos maiores problemas do estresse salino não é apenas o aumento da concentração dos íons Na⁺ e Cl⁻ e sim a modificação da relação de K/Na, pois cada planta apresenta os seus valores ideais. Além disso, o extrato de *Moringa oleifera* ativa o sistema antioxidativo, principalmente as enzimas: SOD, CAT, POX e GR e aumenta a concentração dos compostos orgânicos como carotenoides e prolina, sendo que estas respostas ocorrem tanto em condições normais de desenvolvimento da planta quanto em condições de estresse salino. Além disso, protege a maquinaria fotossintética e mantém o crescimento saudável das plantas, mesmo sob condições de excesso de sais (RADY; VARMA; HOWLADAR, 2013; HOWLADAR, 2014).

A suplementação com Ca²⁺ permite a superação dos efeitos negativos do estresse salino em plantas do feijoeiro, permitindo uma germinação mais rápida, além do aumento do comprimento da raiz. Um dos problemas associadas à alta salinidade é o aumento da concentração de Na⁺ nas folhas e, provavelmente, a redução de Ca²⁺. Todavia, a suplementação com Ca²⁺ torna possível a redução da absorção de Na⁺ e uma maior absorção de Ca²⁺, reduzindo assim os efeitos tóxicos

do Na^+ . A presença de Ca^{2+} permite a manutenção da integridade das membranas que foram danificadas pelo excesso de NaCl , evitando a saída de NO_3^- e H_2PO_4^- . A maior concentração dos ânions nitrato e fosfato permite a redução do potencial osmótico e com isso permite o ajustamento osmótico das células (CACHORRO; ORTIZ; CERDÁ, 1994).

A utilização do silício reduz os efeitos do estresse salino em plantas de feijão, especialmente, com a redução do teor de Na^+ , em sua maior parte, nas folhas, e reduz os efeitos deletérios do NaCl sobre as trocas gasosas. Plantas tratadas com silício apresentam maiores teores relativos de água, induzindo uma maior condutância estomática e taxa fotossintética líquida sob estresse salino e como efeito positivo, um aumento da produção de biomassa. A queda no teor de K^+ causada pela salinidade foi parcialmente revertida com a aplicação de silício, especialmente nas raízes (ZUCCARINI, 2008).

A redução da porcentagem de germinação de sementes de feijão sob estresse induzido pela salinidade pode ser parcialmente atribuída ao declínio do conteúdo de poliaminas. Sementes tratadas com arginina e ureia aumentaram a porcentagem de germinação tanto do controle quanto em sementes sob salinidade, com o aumento do teor das poliaminas Put (putrescina), espermidina (Spd) e espermina (Spm). Com isso houve aumento nas atividades de enzimas hidrolíticas como amilase e protease durante a germinação, promovendo maior disponibilidade de açúcares e aminoácidos para o embrião em desenvolvimento (ZEID, 2009).

Tratamentos com arginina e ureia estimulam o crescimento da planta, como reflexo do maior teor de clorofila e da atividade fotossintética nas folhas das plântulas, atribuído ao aumento de Spd e Spm na presença ou ausência de estresse. Estes resultados sugerem que Spd e Spm apresentam um papel importante na redução dos efeitos adversos da salinidade durante a germinação e no crescimento inicial de mudas, aumentando a disponibilidade de nutrientes e melhoria na capacidade fotossintética (ZEID, 2009).

A maior tolerância ao estresse salino do feijoeiro com a aplicação da arginina e ureia está relacionada também com a redução do conteúdo de Na^+ nas folhas. Tratamentos de arginina e ureia também aumentam o acúmulo dos açúcares solúveis, particularmente, nas raízes e isso possibilita uma osmorregulação celular contra o estresse osmótico causado pelos sais (ZEID, 2009). O acúmulo de

açúcares solúveis nas raízes permite que a planta reduza o potencial osmótico e mantenha a entrada de água na planta, mesmo sob condições adversas no campo.

Segundo Aydin; Kant; Turan (2012), na presença do estresse salino os teores de clorofila total e de nitrato diminuem, assim como os teores de nitrogênio e de fósforo nas plantas de feijoeiro. Contudo, a adição de ácido húmico no solo salino melhora significativamente as variáveis afetadas pela alta salinidade, permitindo maior desenvolvimento radicular. Também ocorre aumento na concentração de nitrato, nitrogênio e fósforo nas plantas de feijoeiro, e redução na concentração de prolina e vazamento de eletrólitos nas células vegetais (demonstrando redução de danos na membrana plasmática).

Segundo Rady (2011), o estresse gerado por NaCl resulta em significativa redução de clorofila e carotenoides. Porém, a aplicação de 24-epibrassinolídio (regulador de crescimento do grupo dos brasinosteroides) aumenta o nível de atividade do sistema antioxidativo das enzimas SOD, CAT, POX e GR, e acúmulo de prolina sob condições de estresse, permitindo a proteção do aparato fotossintético e a manutenção do crescimento das plantas, mesmo sob condições adversas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estresses salino e hídrico prejudicam a germinação das sementes, o desenvolvimento e o crescimento de plântulas de *Phaseolus vulgaris*, afetando, principalmente a parte aérea. A fotossíntese é afetada negativamente, devido à redução da condutância estomática, à degradação de pigmentos acessórios e fotossintetizantes, e aos problemas nos fotossistemas. Mas, as plantas apresentam estratégias para a superação do estresse como o ajustamento osmótico, aumento da capacidade hidráulica das raízes e redução dos radicais livres com antioxidantes enzimáticos ou não. A aplicação de substâncias como ácido ascórbico, ácido salicílico, poliaminas, ácido húmico, silício, cálcio, extrato de folha de *Moringa oleifera* e brasinosteroides é importante para a superação do estresses hídrico e salino em *Phaseolus vulgaris*.

Referências

AGOSTINI, E. A. T.; MACHADO-NETO, N. B.; CUSTÓDIO, C. C. Induction of water deficit tolerance by cold shock and salicylic acid during germination in the common bean. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 2, p. 209-219, 2013.

AROCA, R.; PORCEL, R.; RUIZ-LOZANO, J. M.. How does arbuscular mycorrhizal symbiosis regulate root hydraulic properties and plasma membrane aquaporins in *Phaseolus vulgaris* under drought, cold or salinity stresses? **New Phytologist**, v. 173, n. 4, p. 808-816, 2007.

AYDIN, A.; KANT, C.; TURAN, M. Humic acid application alleviate salinity stress of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants decreasing membrane leakage. **African Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 7, p. 1073-1086, 2012.

BAYUELO-JIMENEZ, J. S.; JASSO-PLATA, N.; OCHOA, I. Growth and physiological responses of *Phaseolus* species to salinity stress. **International Journal of Agronomy**, v. 2012, p.1-13, 2012.

BEN-GAL, A.; BOROCHOV-NEORI, H.; YERMIYAHU, U.; SHANI, U. Is osmotic potential a more appropriate property than electrical conductivity for evaluating whole-plant response to salinity? **Environmental and experimental botany**, v. 65, n. 2, p. 232-237, 2009.

BOUHMOUCH, I. ; SOUAD-MOUHSINE, B.; BRHADA, F.; AURAG, J. Influence of host cultivars and *Rhizobium* species on the growth and symbiotic performance of *Phaseolus vulgaris* under salt stress. **Journal of plant physiology**, v. 162, n. 10, p. 1103-1113, 2005.

BOURGAULT, M.; MADRAMOOTOO, C. A.; WEBBER, H. A.; STULINA, G.; HORST, M. G.; SMITH, D. L. Effects of deficit irrigation and salinity stress on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) grown in a controlled environment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 196, n. 4, p. 262-272, 2010.

BOURGAULT, M. ; MADRAMOOTOO, C. A.; WEBBER, H. A.; HORST, M. G.; STULINA, G.; SMITH, D. L. Legume Production and Irrigation Strategies in the Aral Sea Basin: Yield, Yield Components, Water Relations and Crop Development of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and Mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek). **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 199, n. 4, p. 241-252, 2013.

CABOT, C.; SIBOLE, J. V.; BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Abscisic Acid Decreases Leaf Na⁺ Exclusion in Salt-Treated *Phaseolus vulgaris* L. **Journal of plant growth regulation**, v. 28, n. 2, p. 187-192, 2009.

CACHORRO, P.; ORTIZ, A.; CERDÁ, A. Implications of calcium nutrition on the response of *Phaseolus vulgaris* L. to salinity. **Plant and Soil**, v. 159, n. 2, p. 205-212, 1994.

CALVO-POLANCO, M.; SÁNCHEZ-ROMERA, B.; AROCA, R. Mild Salt Stress Conditions Induce Different Responses in Root Hydraulic Conductivity of *Phaseolus vulgaris* Over-Time. **PloS one**, v. 9, n. 3, p. 1-13, 2014.

CHEN, K.; FESSEHAIE, A.; ARORA, R. Dehydrin metabolism is altered during seed osmopriming and subsequent germination under chilling and desiccation in *Spinacia oleracea* L. cv. Bloomsdale: Possible role in stress tolerance. **Plant Science**, v. 183, p. 27-36, 2012.

COELHO, D. L. M.; AGOSTINI, E. A. T. D.; GUABERTO, L. M.; MACHADO-NETO, N. B.; CUSTÓDIO, C. C. Estresse hídrico com diferentes osmóticos em sementes de feijão e expressão diferencial de proteínas durante a germinação. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 3, p. 491-499, 2010.

Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Acompanhamento de safra brasileira: grãos, nono levantamento, junho 2014 / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab, 2014.

FEDER, M. E.; HOFMANN, G. E. Heat-shock proteins, molecular chaperones, and the stress response: evolutionary and ecological physiology. **Annual Review of Physiology**, v. 61, n. 1, p. 243-282, 1999.

GASPAR, M. Aquaporinas: de canais de água a transportadores multifuncionais em plantas. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 34, n. 4, p. 481-491, 2011.

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L. F.; BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 70-75, 2006.

HOWLADAR, S.M. A novel *Moringa oleifera* leaf extract can mitigate the stress effects of salinity and cadmium in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 100, p. 69-75, 2014.

JIMÉNEZ-BREMONT, J. F. ; BECERRA-FLORA, A.; HERNÁNDEZ-LUCERO, E.; RODRÍGUEZ-KESSLER, M.; ACOSTA-GALLEGOS, J. A.; RAMÍREZ-PIMENTEL, J. G. Proline accumulation in two bean cultivars under salt stress and the effect of polyamines and ornithine. **Biologia Plantarum**, v. 50, n. 4, p. 763-766, 2006.

KHADRI, M.; TEJERA, N. A.; LLUCH, C. Sodium chloride–ABA interaction in two common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars differing in salinity tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 60, n. 2, p. 211–218, jun. 2007.

MACHADO, R.; AGUIAR NETTO, A. O., CAMPECHE, L.; BARROS, A. Efeito da Salinidade em Características Físico-Hídricas em Solos Salino-Sodilizados no Perímetro Irrigado Jabiberi-SE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 1, n. 1, p. 15-19, 2007.

MAPA (Ministério da Agricultura Agropecuária e Abastecimento) . Perfil do feijão no Brasil. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/feijao/saiba-mais>>. Acesso em: 25 de junho de 2014.

MUNNS, R. Genes and salt tolerance: bringing them together. **New Phytologist**, v. 167, n. 3, p. 645-663, 2005.

NAGESH BABU, R.; DEVARAJ, V. R. High temperature and salt stress response in French bean (*Phaseolus vulgaris*). **Australian Journal of Crop Science**, v. 2, n. 2, p. 40-48, 2008.

PACHECO, A. C.; CAMARGO, P. R.; SOUZA, G. M. Deficiência hídrica e aplicação de ABA nas trocas gasosas e no acúmulo de flavonoides em calêndula (*Calendula officinalis* L.). **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 275-281, 2011.

PALMA, F.; LLUCH, C.; IRIBARNE, C.; GARCÍA-GARRIDO, J. M.; GARCÍA, N. A. T. Combined effect of salicylic acid and salinity on some antioxidant activities, oxidative stress and metabolite accumulation in *Phaseolus vulgaris*. **Plant Growth Regulation**, v. 58, n. 3, p. 307-316, 2009.

PLANS, M.; SIMÓ, J.; CASAÑAS, F.; SABATÉ, J.; RODRIGUEZ-SAONA, L. Characterization of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by infrared spectroscopy: Comparison of MIR, FT-NIR and dispersive NIR using portable and benchtop instruments. **Food Research International**, v. 54, n. 2, p. 1643–1651, dez. 2013.

RADY, M. M. Effect of 24-epibrassinolide on growth, yield, antioxidant system and cadmium content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity and cadmium stress. **Scientia Horticulturae**, v. 129, n. 2, p. 232-237, 2011.

RADY, M. M.; VARMA C, B.; HOWLADAR, S. M. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings overcome NaCl stress as a result of presoaking in *Moringa oleifera* leaf extract. **Scientia Horticulturae**, v. 162, p. 63-70, 2013.

RAMALHO, J. C. ; ZLATEV, Z. S.; LEITÃO, A. E.; PAIS, I. P.; FORTUNATO, A. S.; LIDON, F. C. Moderate water stress causes different stomatal and non-stomatal changes in the photosynthetic functioning of *Phaseolus vulgaris* L. genotypes. **Plant Biology** (Stuttgart, Germany), v. 16, n.1, p. 133–146, 2013.

ROSALES, M. A.; OCAMPO, E.; RODRÍGUEZ-VALENTÍN, R.; OLVERA-CARRILLO, Y.; ACOSTA-GALLEGOS, J.; COVARRUBIAS, A. A. Physiological analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. *Plant physiology and biochemistry*, v. 56, p. 24–34, 2012.

ROSALES-SERNA, R.; KOHASHI-SHIBATA, J.; ACOSTA-GALLEGOS, J. A.; TREJO-LÓPEZ, C.; ORTIZ-CERECERES, J.; KELLY, J. D. Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought-stressed common bean cultivars. **Field Crops Research**, v. 85, n. 2, p. 203-211, 2004.

SAEIDI-SAR, S.; ABBASPOUR, H.; AFSHARI, H.; YAGHOUBI, S. R. Effects of ascorbic acid and gibberellin GA₃ on alleviation of salt stress in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 3, p. 667-677, 2013.

SIBOLE, J. V. ; MONTERO, E.; CABOT, C.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Relationship between carbon partitioning and Na⁺, Cl⁻ and ABA allocation in fruits of salt-stressed bean. **Journal of Plant Physiology**, v. 157, n. 6, p. 637–642, 2000.

SILVA, E.N.; SILVEIRA, J. D.; RODRIGUES, C. R. F.; LIMA, C. D.; VIÉGAS, R. A. Contribuição de solutos orgânicos e inorgânicos no ajustamento osmótico de pinhão-manso submetido à salinidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 5, p. 437-445, 2009.

SILVEIRA, J. A.G.; SILVA, S. L.; SILVA, E. N.; VIÉGAS, R. A. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**, v. 1, p. 161-18, 2010.

TAÏBI, M.; BOUSSAID, M.; ACHIR, M.; TAIBI, F.; BELKHODJA, M. Evaluation of growth response and water relations of two bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.) from Algerian semi-arid regions grown under salt stress. **Genetics and Plant Physiology**, v. 1, n.3–4, pp. 176–185, 2011.

YANG, Z.B.; ETICHA, D.; FÜHRS, H.; HEINTZ, D.; AYOUB, D.; VAN DORSSELAER, A.; HORST, W. J. Proteomic and phosphoproteomic analysis of polyethylene glycol-induced osmotic stress in root tips of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 18, p. 5569–86, 2013.

ZADRAŽNIK, T. ; HOLLUNG, K.; EGGE-JACOBSEN, W.; MEGLIČ, V.; ŠUŠTAR-VOZLIČ, J. Differential proteomic analysis of drought stress response in leaves of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of proteomics**, v. 78, p. 254-272, 2013.

ZEID, I. M. Effect of arginine and urea on polyamines content and growth of bean under salinity stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 31, n. 1, p. 65-70, 2009.

ZUCCARINI, P. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biologia Plantarum**, v. 52, n. 1, p. 157-160, 2008.

CAPÍTULO II

Composição mineral e bioquímica de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e suas implicações no melhoramento vegetal²

² Capítulo publicado no livro “Tópicos Especiais em Produção Vegetal V”, PPGPV, cap.3, p.76-91.

Composição mineral e bioquímica de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e suas implicações no melhoramento vegetal

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um alimento muito rico nutricionalmente, os seus grãos contêm quantidades significativas de proteínas, carboidratos, fibra alimentar, calorias, cálcio (Ca), ferro (Fe), fósforo (P), cobre (Cu), potássio (K), manganês (Mn) e magnésio (Mg), além disso, em alguns genótipos estes participam da constituição de vitaminas como a tiamina, piridoxina e niacina (Tabela 1). Mesmo sendo considerado um alimento rico na parte nutricional, apresenta grande variabilidade genética nas concentrações destes elementos e outros compostos bioquímicos nos grãos do feijão. Estas concentrações podem aumentar muito por meio de programas de melhoramento genético pelos cruzamentos entre os diferentes genótipos de feijoeiro (RIBEIRO, 2010).

Os grãos de feijão, além de apresentarem altas quantidades de compostos de importância para alimentação humana e animal, apresentam outros elementos que dificultam a absorção de nutrientes e que podem levar animais à morte, destacando-se os polifenóis, que são inibidores de tripsina e alguns alergênicos (SOARES et al., 1995; KUMAR et al., 2014).

O feijão é um alimento de grande importância nutricional, portanto, esta revisão foi direcionada para seus principais compostos minerais e bioquímicos, além de mostrar como o melhoramento genético vegetal está sendo trabalhado nesta cultura, buscando aumentar seu valor nutricional e diminuir a concentração de compostos que podem prejudicar os indivíduos que ingerem este grão.

Tabela 1. Valores nutricionais de grupos comerciais de feijão cozido e cru em 100 g de feijão (TACO, 2014).

Genótipos	Valores nutricionais					
	Energia (kcal)	Proteína (g)	Lipídios (g)	Carboidratos (g)	Fibra alimentar (g)	Ca (mg)
Carioca (cozido)	76,4	4,7	0,5	13,6	8,5	26,6
Carioca (cru)	329,0	19,9	1,2	61,2	18,4	122,6
Jalo (cozido)	92,7	6,1	0,5	16,5	13,9	29,4
Jalo (cru)	327,9	20,1	0,9	61,5	30,3	97,9
Preto (cozido)	77,0	4,4	0,5	14,0	8,4	29,0
Preto (cru)	323,5	21,3	1,2	58,7	21,8	110,9

continua...

continuação...

Rosinha (cozido)	67,8	4,5	0,5	11,8	4,8	19,2
Rosinha (cru)	336,9	20,9	1,3	62,2	20,6	67,6
Genótipos	Mg	P	Fe	K	Cu	Zn
	(mg)	(mg)	(mg)	(mg)	(mg)	(mg)
Carioca (cozido)	42,3	86,8	1,3	254,6	0,2	0,7
Carioca (cru)	209,9	385,4	7,9	1352,4	0,8	2,9
Jalo (cozido)	44,1	121,0	1,9	347,7	0,2	1,0
Jalo (cru)	169,9	427,1	7,0	1275,9	0,9	3,0
Preto (cozido)	40,4	88,0	1,5	256,3	0,2	0,7
Preto (cru)	188,1	471,1	6,4	1415,7	0,8	2,8
Rosinha (cozido)	42,9	89,5	1,2	240,6	0,1	1,3
Rosinha (cru)	184,5	393,6	5,3	1108,7	0,6	3,9
Genótipos	Mn	Tiamina	Piridoxina	Niacina		
	(mg)	(mg)	(mg)	(mg)		
Carioca (cozido)	0,3	0,04	Tr	Tr		
Carioca (cru)	1,0	0,17	0,65	4,0		
Jalo (cozido)	0,3	0,13	0,04	Tr		
Jalo (cru)	1,0	0,1	0,12	Tr		
Preto (cozido)	0,4	0,06	0,03	Tr		
Preto (cru)	1,3	0,12	0,59	4,6		
Rosinha (cozido)	0,5	Tr	Tr	3,7		
Rosinha (cru)	1,1	0,16	Tr	3,9		

Fonte: Tabela Brasileira de Composição de Alimentos 4a. edição revisada e ampliada.

A época do plantio do feijoeiro apresenta relação com os conteúdos de proteínas e carboidratos, além de modificar o tempo de cozimento. Os grãos apresentam correlação negativa entre os teores de proteína e óleo, desta maneira, quanto maior a concentração de proteínas menor será a concentração de lipídios (LAM-SANCHEZ et al., 1990).

Há grande diversidade genética na composição de minerais e proteínas em sementes de feijão (CEYHAN; HARMANKAYA; KAHRAMAN, 2014). Alguns genótipos são mais ricos em Ca, Cu, K e Mg (feijão rajado), Cu (jalo), Fe (preto) e P (rosinha). As diferenças nos teores de minerais estão relacionadas com a fisiologia da planta, o local de crescimento e as condições ambientais (FERREIRA et al., 2014). Há correlações positivas e significativas entre os teores de minerais: Ca, B, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo e P. Sendo que o teor de proteína apresenta correlação

positiva com o Cu e P (KAHRAMAN; ÖNDER, 2013) e correlação negativa com o Fe (DORIA et al., 2012). A coloração do tegumento das sementes não apresenta correlação com a composição nutricional do feijão (KAHRAMAN; ÖNDER, 2013), e há correlação positiva apenas entre a coloração do tegumento e as concentrações de antocianina e polifenóis (AKOND et al., 2011).

Durante o processo de melhoramento é importante buscar o enriquecimento nutricional dos grãos, aumentando a concentração mineral nos grãos acima da média, promovendo a biofortificação que permite o acesso da maior parte da população a uma alimentação mais equilibrada (BOUIS et al., 2011).

Há grande diversidade em relação aos teores de minerais nas sementes, sendo possível selecionar materiais genéticos superiores para desenvolver linhagens de feijoeiro biofortificadas. Atualmente é possível aumentar em 37,3% o teor de Zn nas sementes de feijão utilizando apenas três progenitores masculinos para a formação de linhagens mais ricas em Zn (ROSA et al., 2010).

O Ca é um íon que se concentra mais no tegumento, que pode conter de 67 a 81% do total de Ca nas sementes, o que demonstra a baixa mobilidade deste íon do tegumento para o embrião (MORAGHAN; ETCHEVERS; PADILLA, 2006). Mesmo com alta concentração de Ca, este íon não se encontra totalmente biodisponível, pois, grande parte está na forma de oxalato de cálcio no tegumento das sementes (WEAVER et al., 1993).

A variabilidade para o teor de Ca é constatada em diferentes cruzamentos, com maior influência dos efeitos gênicos aditivos, além da expressão do efeito materno, o que apresenta implicações diretas na seleção e na condução de populações segregantes em programas de melhoramento. Há estimativas de herdabilidade, no sentido amplo, com média de 0,707 e, no sentido restrito, com média de 0,553. A seleção realizada em gerações precoces poderá ser efetiva no desenvolvimento de genótipos de feijão com grãos biofortificados com Ca (JOST et al., 2009).

Há interação entre a época da semeadura x tipo de cultivar x porção da semente (tegumento ou embrião) em relação à concentração de Ca, K, Fe e Cu, o que sugere que as concentrações desses minerais no embrião e no tegumento das sementes variam entre as cultivares e as épocas de cultivo. A existência de variabilidade entre cultivares de feijão em relação à concentração de minerais permite a identificação de cultivares com maior qualidade nutricional para uso em

alimentos (RIBEIRO et al., 2012), e a interação genótipo x ambiente é importante para aumentar ainda mais a concentração destes minerais nos grãos.

Sementes de feijão apresentam maior concentração de Ca, Cu e Zn no tegumento, enquanto o K encontra-se em maior quantidade nos embriões. As concentrações de Fe, Zn e Cu variam muito entre o embrião e o tegumento, dependendo da cultivar (RIBEIRO et al., 2012). É possível elevar o teor de cobre em até 46,78% em sementes com o uso de parentais promissores (POERSCH et al., 2013).

Há alta herdabilidade nos teores de nutrientes em feijão demonstrando ser eficiente a seleção e formação de linhagens de genótipos superiores. De uma forma geral, os genótipos de feijão do grupo preto apresentam valores maiores para proteínas, Fe e Zn; os genótipos de grupo carioca apresentam maiores teores de Mg e Mn, enquanto os do tipo cores, apresentam maior teor de Ca. Há correlação positiva entre muitos nutrientes do feijão, sendo esta uma situação favorável para o melhoramento da qualidade nutricional desta cultura (SILVA et al., 2012).

As sementes de feijão apresentam em sua composição muitos açúcares, destacando-se em maior quantidade: sacarose, galactose, estaquiose, rafinose, ciceritol e inositol fosfato, sendo que as maiores proporções são dos três primeiros compostos. As sementes de feijão apresentam também antocianina, flavonóis, éster tartárico, fenóis e antioxidantes (PEDROSA et al., 2015).

Feijão do grupo preto e o de cor apresentam valores similares quanto ao teor de proteína e fibra bruta. Entretanto, mesmo com valores similares entre os dois grupos comerciais, há alta variabilidade para teores de proteína e de fibra bruta em grãos de feijão preto e de cor. Populações segregantes com teores de proteína e fibra acima da média poderão ser obtidas e permitir o desenvolvimento de genótipos elite para estas características (RIBEIRO et al., 2005). O teor de fibra insolúvel pode variar de 13,86 a 23,51%, e há predominância de efeitos ambientais em relação aos genéticos para a fibra insolúvel (LONDERO et al., 2009).

As características dos grânulos de amido em grãos de feijão são muito influenciadas pela irrigação. A quantidade de amido em grãos de feijão desenvolvidos em locais com irrigação é menor do que em locais sem irrigação. A digestibilidade do amido é afetada tanto pelo genótipo do feijão, quanto pelas condições de crescimento, e de uma forma geral, o feijoeiro desenvolvido sem irrigação apresenta grãos com maiores índices de hidrólise e de glicemia. Essa

tendência pode ser atribuída ao tamanho do grânulo, pois grânulos de amido em plantas de feijão sem irrigação são menores, e isso pode aumentar a digestibilidade (grânulos pequenos têm uma superfície de contato maior e são mais susceptíveis à hidrólise por enzimas digestivas) (OVANDO-MARTÍNEZ et al., 2011a).

Os teores de amilose e amilopectina (as diferentes estruturas do amido), e as propriedades de digestibilidade do grão do feijão são afetados pelo genótipo de feijão e pela ausência/presença de irrigação. A concentração de proteína e amido total é menor e tem maior digestibilidade nos grãos quando cultivados sob irrigação. Alguns genótipos de feijão apresentam o teor de amido elevado em comparação com os cereais, demonstrando que essa espécie apresenta alto valor nutricional (OVANDO-MARTÍNEZ et al., 2011b), e pode ser uma importante fonte de carboidratos na alimentação.

O teor de proteína dos grãos de feijão varia em função das doses e épocas de aplicação do nitrogênio de cobertura. Aumentando-se a dose de nitrogênio promove-se o incremento nos teores de proteína bruta e solúvel em grãos de feijão. A aplicação da dose de 40 kg ha⁻¹ proporciona um maior teor de proteína bruta, principalmente, em aplicações realizadas mais tardiamente (GOMES JUNIOR et al., 2005).

A variabilidade encontrada em bancos de germoplasma permite ao melhorista selecionar genótipos, que podem servir como fonte de variação para programas de melhoramento genético e formação de novas variedades, com aumento dos teores nutricionais para serem utilizados para alimentação diária (GOUVEIA et al., 2014). Há correlação positiva entre P, Fe, Zn, Cu e proteína, e correlação positiva entre Ca e Mn. A alta variabilidade mineral observada nos grãos destas coleções de feijão é útil para a seleção de cultivares com maior valor nutricional e para a melhoria das características de qualidade nutricional do grão (PINHEIRO et al., 2010). Porém, em alguns casos, a seleção de alguns minerais implica na redução de outros compostos de interesse nutricional, como se pode observar com o Fe, pois este íon apresenta correlação positiva com taninos e fenóis, enquanto sua correlação é negativa com o teor de proteínas (DORIA et al., 2012). No entanto, a correlação entre os nutrientes pode variar de um banco de germoplasma para outro principalmente por causa dos diferentes genótipos, os locais de cultivo e a interação genótipo x ambiente.

Como alimento básico, o feijão é considerado um alimento proteico, embora, seus conteúdos calórico, mineral e vitamínico não possam ser desprezados. O valor

nutritivo da proteína do feijão é baixo, quando utilizado como única fonte, entretanto, quando combinado com arroz, por exemplo, forma uma mistura de proteínas mais nutritiva. Isto ocorre porque o feijão é pobre em aminoácidos sulfurados e rico em lisina; e o arroz é pobre em lisina e relativamente rico em aminoácidos sulfurados (MESQUITA et al., 2007).

Entre os inúmeros genótipos de feijoeiro há alguns que são excelentes fontes de proteína, pois com 100 g de grãos de feijão é possível suprir de 53 a 65% das necessidades diárias de proteínas de alta qualidade (com alto teor de aminoácidos essenciais, exemplo: lisina). Todavia, outros genótipos apresentam altos teores de amido (42%), enquanto alguns apresentam baixos índices glicêmicos, podendo ser utilizados em dietas diet (para pessoas diabéticas) (GOUVEIA et al., 2014).

Os grãos de muitos cultivares de feijão apresentam teores de aminoácidos essenciais e não-essenciais, adequados às necessidades diárias de um indivíduo adulto, o que indica alta qualidade da proteína. Os cultivares de feijão contêm em seus grãos, em ordem decrescente, os aminoácidos essenciais: leucina, lisina, fenilalanina, valina, isoleucina, treonina, histidina e metionina; e os aminoácidos não-essenciais: ácido glutâmico, ácido aspártico, arginina, serina, alanina, glicina, tirosina, prolina e cisteína (RIBEIRO et al., 2007).

As sementes de feijão em geral apresentam baixa concentração de metionina e alta concentração de lisina e leucina (RIBEIRO et al., 2007; TOLEDO; CANNIATTI-BRAZACA, 2008), isso demonstra a importância de selecionar genótipos mais ricos em metionina. Os teores de leucina, isoleucina, histidina, valina, treonina, glicina e alanina são afetados pela interação genótipos x ambiente. Há cultivares que apresentam composição adequada de aminoácidos e são indicados para a composição de dietas e podem ser utilizadas como parentais em programas de melhoramento (RIBEIRO et al., 2007).

O teor de metionina apresenta correlação positiva com os teores de outros aminoácidos como: lisina, serina, glicina, alanina e tirosina. Dessa maneira, a seleção para aumentar o teor de metionina será eficiente também para o incremento destes aminoácidos, e os cultivares com maiores valores proteicos agregados poderão ser obtidos pelo melhoramento genético. Nenhuma correlação negativa é obtida entre pares de aminoácidos, o que sugere que a seleção para maiores teores de um determinado aminoácido não comprometerá o teor de outro, o que possibilita

desenvolver genótipos de feijoeiro com teores de aminoácidos adequados para satisfazer as necessidades nutricionais humanas (RIBEIRO et al., 2007).

O uso de feijão biofortificado com Fe na dieta aumenta a concentração de hemoglobina no sangue e a eficiência na manutenção das hemoglobinas. Entretanto, a concentração de polifenóis é maior em feijões biofortificados com Fe, e esta maior concentração de fenóis reduz a biodisponibilidade deste mineral para o organismo. Por isso, o benefício nutricional dos grãos biofortificados é reduzido pela presença de polifenóis. Desta maneira, é importante no processo de melhoramento genético vegetal de feijoeiro, trabalhar com o melhoramento em conjunto para obter linhagens, com alto teor de Fe biodisponível, ou seja, com menor concentração de polifenóis (TAKO et al., 2014).

Há grande diversidade na concentração de proteínas entre os genótipos de feijão, podendo variar de 18,22 a 28,32%, como observado no banco de germoplasma de Camarões (NOUBISSIE; BELL; YADJI, 2012) e 18,55 a 29,69%, verificado no banco de germoplasma das Ilhas Madeira (Portugal) (GOUVEIA et al., 2014), estes valores são considerados baixos comparados com valores obtidos em outros bancos de germoplasmas, pois no Brasil, no banco de germoplasma da Universidade Federal de Lavras, o teor de proteína bruta de sementes de feijão varia de 22,34 a 36,28 % (MESQUITA et al., 2007).

No banco de germoplasma de feijão de Camarões, no sentido amplo de herdabilidade, foi de moderado (0,46) a alto (0,72), valor e efeito maternos detectados em F1 para teor de proteína, demonstrando que durante o melhoramento vegetal deve-se observar qual o genótipo que vai receber ou doar o polén. Herdabilidade no sentido restrito (0,16-0,41) e análise de efeitos gênicos sugerem que o teor de proteína seja controlado por genes aditivos e não-aditivos, sendo que um mínimo de 4 a 10 genes afetam o acúmulo de proteínas em sementes de feijão. É possível selecionar genótipos superiores para teor de proteína, entretanto, os ganhos são relativamente baixos em cada ciclo de seleção. As interações não-alélicas são significativas em todos os cruzamentos e a presença de epistasia dominante duplicada é observada na expressão do teor de proteína (NOUBISSIE; BELL; YADJI, 2012).

Os teores de proteínas nos grãos de feijão podem variar em razão do local de cultivo, do efeito da interação genótipos x ambiente, e da variabilidade presente entre os cultivares e linhagens. Entre os inúmeros genótipos de feijão é possível

selecionar os que apresentaram maiores teores médios de proteínas, ampla adaptabilidade, alta estabilidade e previsibilidade de comportamento para o teor de proteína, que podem ser utilizados como genitores em programas de melhoramento visando à biofortificação de grãos de feijão (BURATTO et al., 2009). É importante selecionar genótipos que apresentam alto teor de proteína, porém, é recomendado que o feijão tenha também alta digestibilidade (MESQUITA et al., 2007).

Além dos nutrientes mais conhecidos como proteína, amido e minerais, os grãos de feijão apresentam outros compostos importantes para a saúde humana. Os grãos de feijão apresentam alta concentração de antocianina e polifenóis. Há grandes diferenças entre os genótipos de feijoeiro em relação à concentração de antocianina, sendo que os feijões dos grupos comerciais preto, vermelho e roxo apresentam as maiores concentrações do que os genótipos dos grupos comerciais com tegumentos mais claros. A antocianina é um grupo de pigmentos hidrossolúveis, que contribui significativamente para coloração vermelha e azul das plantas (AKOND et al., 2011).

Estudos demonstram variabilidade para os teores de taninos condensados e de antocianinas, além disso, há relação entre estes compostos e a cor do tegumento das sementes de feijão. A herança genética de taninos e antocianinas em feijão de cor é predominantemente quantitativa, com muitos genes envolvidos, embora a antocianina possa ser controlada pelos mesmos genes relacionados com o padrão de cor das sementes. Os monômeros predominantes na estrutura de taninos condensados presentes em grãos de feijão são: catequina (60,3%), galocatequina (25%) e afzelequina (14,7%) (DÍAZ; CALDAS; BLAIR, 2010).

Com as informações dos monômeros predominantes na estrutura dos taninos condensados e a composição das antocianinas, os geneticistas podem propor estratégias para a seleção de variedades que têm um equilíbrio positivo entre a atividade antioxidante e antinutricional destes compostos (selecionando aqueles mais benéficos para a saúde nutricional humana), permitindo assim um aumento do potencial nutritivo dos grãos de feijão (DÍAZ; CALDAS; BLAIR, 2010).

Os grãos de feijão, além de apresentarem compostos nutricionais, contêm, adicionalmente, substâncias com propriedades medicinais como: flavonoides (kaempferol e quercetina), isoflavonas (daidzeína e genisteína) e saponinas, e com grande variação em sua concentração nos diferentes genótipos. Estes grupos de compostos com propriedades medicinais ainda são pouco explorados pelos

melhoristas de feijoeiro, porém, é possível selecionar genótipos com maiores teores destes compostos (DORIA et al., 2012). Algumas isoflavonas promovem proteção contra o câncer e doenças cardíacas (ESTEVES; MONTEIRO, 2001); já os flavonoides são importantes no combate de radicais livres, alergias, inflamações, úlceras e tumores; enquanto as saponinas podem reduzir a quantidade de colesterol total no sangue (DILLARD; GERMAN, 2000).

As antocianinas são flavonoides presentes nos tegumentos dos grãos do feijão (CICHY et al., 2013) e são substâncias importantes para saúde humana. As antocianinas protegem o DNA de clivagens indevidas, reduzem a capacidade de proliferação de células cancerígenas e inibem a formação de tumores (LILA, 2004). Os polifenóis também são importantes para saúde humana por combater inúmeras doenças crônicas como o câncer, diabetes, problemas cardiovasculares e envelhecimento precoce (PANDEY; RIZVI, 2009).

O feijão é um alimento muito rico nutricionalmente e importante para alimentação humana e animal. Contudo, o feijão apresenta baixa digestibilidade quando ingerido cru devido a ação dos inibidores de proteases, que diminuem a atividade das enzimas digestivas. O tratamento térmico do feijão, no processo de cozimento, inativa os inibidores de proteases (ex. inibidor de tripsina), o que promove efeito benéfico na digestibilidade (SOARES et al., 1995).

A faseolina é uma proteína muito abundante em sementes de feijão vermelho, porém indivíduos hipersensíveis a este composto apresentam reação alérgica, sendo considerado um dos principais alergênicos presente no feijão vermelho (KUMAR et al., 2014). Além da faseolina, outra importante proteína alergênica presente no feijão vermelho é a fitohemaglutinina, proteína que promove mudanças abruptas nos tecidos do intestino humano, induzindo reações alérgicas (KUMAR et al., 2013). As lectinas também são proteínas encontradas em sementes de feijão e, que apresentam como características efeito tóxico para os seres humanos, no entanto, com o cozimento este efeito é reduzido ou inativado (SILVA; SILVA; 2000).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os grãos de feijão são um alimento muito rico nutricionalmente, contendo altos teores de proteína, amido e minerais (Fe, Ca, Zn, K, Mg, Mn e P). Além de compostos com propriedades medicinais como antocianina, polifenóis, saponina, flavonoides e isoflavonas. Há compostos que podem trazer algum prejuízo à saúde

humana, como os polifenóis (limitam a absorção de Fe); inibidor de tripsina, lectina, faseolina e fitohemaglutinina, por dificultar a absorção de alguns nutrientes, causar alergias ou até mesmo a morte dos indivíduos. Os genótipos de feijoeiro apresentam alta variabilidade e grande influência das concentrações destes compostos na interação genótipo x ambiente, efeito epistático e materno, permitindo novas pesquisas no melhoramento genético desta espécie com grandes perspectivas na melhoria da qualidade nutricional dos grãos de feijão.

Referências

AKOND, A. S. M. G. M.; KHANDAKER, L.; BERTHOLD, J.; GATES, L.; PETERS, K.; DELONG, H.; HOSSAIN, K. Anthocyanin, total polyphenols and antioxidant activity of common bean. **American Journal of Food Technology**, v. 6, n. 5, p. 385–394, 2011.

BOUIS, H. E.; HOTZ, C.; MCCLAFFERTY, B.; MEENAKSHI, J. V.; PFEIFFER, W. H. **Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. Food Nutrition Bulletin**, v. 32, n. Sup. 1, p. 31-40, 2011.

BURATTO, J.S.; CIRINO, V.M.; SCHOLZ, M.B.S.; LANGAME, D.E.M; FONSECA JUNIOR, N.S.; PRÉTE, C.E.C. Variabilidade genética e efeito do ambiente para o teor de proteína em grãos de feijão. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 4, p. 593–597, 2009.

CEYHAN, E.; HARMANKAYA, M.; KAHRAMAN, A. Combining ability and heterosis for concentration of mineral elements and protein in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 38, p. 1–10, 2014.

CICHY, K. A.; FERNANDEZ, A.; KILIAN, A.; KELLY, J. D.; GALEANO, C. H.; SHAW, S.; TROXTELL, E. QTL analysis of canning quality and color retention in black beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Molecular Breeding**, v. 33, n. 1, p. 139–154, 2013.

DÍAZ, A. M.; CALDAS, G. V.; BLAIR, M. W. Concentrations of condensed tannins and anthocyanins in common bean seed coats. **Food Research International**, v. 43, n. 2, p. 595–601, 2010.

DILLARD, C. J.; GERMAN, J. B. Phytochemicals: nutraceuticals and human health. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 80, n. 12, p. 1744-1756, 2000.

DORIA, E.; CAMPION, B.; SPARVOLI, F.; TAVA, A.; NIELSEN, E. Anti-nutrient components and metabolites with health implications in seeds of 10 common bean (*Phaseolus vulgaris* L. and *Phaseolus lunatus* L.) landraces cultivated in southern Italy. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 26, n. 1-2, p. 72–80, 2012.

ESTEVES, E. A.; MONTEIRO, J. B. R. Efeitos benéficos dos efeitos benéficos das isoflavonas de soja em doenças crônicas. **Revista de Nutrição**, v. 14, n. 1, p. 43-52, 2001.

FERREIRA, A. S.; NAOZUKA, J.; KELMER, G. A.; OLIVEIRA, P. V. Effects of the domestic cooking on elemental chemical composition of beans species (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Food Processing**, v. 2014, p. 1–6, 2014.

GOMES JUNIOR, F. G.; LIMA, E. R.; LEAL, A. J. F.; MATOS, F. A.; SÁ, M. E.; HAGA, K. I. Teor de proteína em grãos de feijão em diferentes épocas e doses de cobertura nitrogenada. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 3, p. 455–459, 2005.

GOUVEIA, C. S. S.; FREITAS, G.; BRITO, J. H.; SLASKI, J. J.; CARVALHO, M. A. P. Nutritional and mineral variability in 52 accessions of common bean varieties (*Phaseolus vulgaris* L.) from madeira Island. **Agricultural Sciences**, v. 5, p. 317–329, 2014.

HADŽIĆ, A. ; ĆOTA, J.; SARIĆ, E.; HODŽIĆ, I.; SALMAN, N.; ĆOTA, J. Energy and nutritional value of raw grains of domestic bean varieties. **Agroznanje**, v. 14, n. 1, p. 51-58, 2013.

JOST, E.; RIBEIRO, N.D; MAZIERO, S.M.; CERUTTI, T.; ROSA, D.P. Efeitos gênicos do teor de cálcio em grãos de feijão. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 31–37, 2009.

KAHRAMAN, A.; ÖNDER, M. Correlations between seed color and nutritional composition of dry bean. **Ratarstvo i povrtarstvo**, v. 50, n. 2, p. 8–13, 2013.

KUMAR, SANDEEP; VERMA, A.K.;SHARMA, A.;ROY, R.; KUMAR, D.; BH, G; TRIPATHI, A.; CHAUDHARI, B.P.; M; JAIN,S.K. ; DWIVEDI, P.D. Phaseolin: a 47.5kDa protein of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plays a pivotal role in hypersensitivity induction. **International immunopharmacology**, v. 19, n. 1, p. 178–90, 2014.

KUMAR, S.; VERMA, A. K.; SHARMA, A.; KUMAR, D.; TRIPATHI, A.; CHAUDHARI, B. P.; DWIVEDI, P. D. Phytohemagglutinins augment red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) induced allergic manifestations. **Journal of Proteomics**, v. 93, n. 80, p. 50–64, 2013.

LAM-SANCHEZ, A. ; DURIGAN, J.; CAMPOS, S. D.; SILVESTRE, S. R.; PEDROSO, P. A. C.; BANZATTO, D. A. Efeitos da época de semeadura sobre a composição química e características físico-químicas de grãos de cultivares de *Phaseolus vulgaris* L., *Phaseolus angularis* (Willd) Wright e *Vigna unguiculata* (L.) Walp. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 2, n. 1, p. 35-44, 1990.

LILA, M. A. Anthocyanins and human health: an *in vitro* investigative approach. **BioMed Research International**, v. 2004, n. 5, p. 306-313, 2004.

LONDERO, P. M. G.; RIBEIRO, N. D.; JOST, E.; MAZIERO, S. M.; CERUTTI, T.; POERSCH, N. L. Genética dos teores de fibras insolúvel e solúvel em grãos de feijão. **Revista Ceres**, v. 56, n. 2, p. 150–155, 2009.

MESQUITA, F. R.; CORRÊA, A. D.; ABREU, C. D.; LIMA, R. A. Z.; ABREU, A. D. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade protéica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 4, p. 1114-1121, 2007.

MORAGHAN, J. T.; ETCHEVERS, J. D.; PADILLA, J. Contrasting accumulations of calcium and magnesium in seed coats and embryos of common bean and soybean. **Food Chemistry**, v. 95, n. 4, p. 554–561, 2006.

NOUBISSIE, J.B. T.; BELL, J. M.; YADJI, H. T. Studies on variability and gene effects of seed protein contents in cameroonian bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars. **Journal of Agriculture & Social Sciences**, v. 8, n. 1, p. 17–23, 2012.

OVANDO-MARTÍNEZ, M.; OSORIO-DÍAZ, P.; WHITNEY, K.; BELLO-PÉREZ, L. A.; SIMSEK, S. Effect of the cooking on physicochemical and starch digestibility properties of two varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under different water regimes. **Food Chemistry**, v. 129, n. 2, p. 358–365, 2011b.

OVANDO-MARTÍNEZ, M. ; BELLO-PÉREZ, L. A.; WHITNEY, K.; OSORIO-DÍAZ, P.; SIMSEK, S. Starch characteristics of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in different localities. **Carbohydrate Polymers**, v. 85, n. 1, p. 54–64, 2011a.

PANDEY, K. B.; RIZVI, S. I. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, v. 2, n. 5, p. 270–278, 2009.

PEDROSA ,M. M.; CUADRADO, C.; BURBANO, C.; MUZQUIZ, M.; CABELLOS, B.; OLMEDILLA-ALONSO, BEGOÑA; ASENSIO-VEGAS, C. Effects of industrial canning on the proximate composition, bioactive compounds contents and nutritional profile of two Spanish common dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Food Chemistry**, v. 166, p. 68–75, 2015.

PINHEIRO, C. ; BAETA, J. P.; PEREIRA, A. M.; DOMINGUES, H.;RICARDO, C. P. Diversity of seed mineral composition of *Phaseolus vulgaris* L. germplasm. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 23, n. 4, p. 319–325, 2010.

PLANS, M.; SIMÓ, J.; CASAÑAS, F.; SABATÉ, J.; RODRIGUEZ-SAONA, L. Characterization of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by infrared spectroscopy: comparison of MIR, FT-NIR and dispersive NIR using portable and benchtop instruments. **Food Research International**, v. 54, n. 2, p. 1643–1651, 2013.

POERSCH, N. L.; RIBEIRO, N. D.; ROSA, D. P.; MAZIERO, S. M.;JOST, E. Genetics of the concentration of copper in common bean seeds. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 301–306, 2013.

RIBEIRO, N. D.; LONDERO, P.; HOFFMANN JUNIOR, L.; POERCH, N.; CARGNELUTTI FILHO, A. Dissimilaridade genética para teor de proteína e fibra em grãos de feijão dos grupos preto e de cor. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 2, p. 167–173, 2005.

RIBEIRO, N. D.; LONDERO, P. M. G.; CARGNELUTTI FILHO, A.; JOST E.; POERSCH, N. L.; MALLMANN, C. A. Composição de aminoácidos de cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 10, p. 1393–1399, 2007.

RIBEIRO, N. D. Potencial de aumento da qualidade nutricional do feijão por melhoramento genético. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, sup.1, p. 1367-1376, 2010.

RIBEIRO, N. D.; MAZIERO, S. M.; PRIGOL, M.; NOGUEIRA, C. W.; ROSA, D. P.; POSSOBOM, M. T. D. F. Mineral concentrations in the embryo and seed coat of common bean cultivars. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 26, n. 1-2, p. 89–95, 2012.

ROSA, S. S., RIBEIRO, N. D.; JOST, E.; REINIGER, L. R. S.; ROSA, D. P.; CERUTTI, T.; POSSOBOM, M. T. D. F. Potential for increasing the zinc content in common bean using genetic improvement. **Euphytica**, v. 175, n. 2, p. 207–213, 2010.

SOARES, G. J.; ANTUNES, P.; BILHALVA, A.; ELIAS, M. Valor nutricional de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivares Rico 23, Carioca, Piratã-1 e Rosinha-G2. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 1, n. 1, p. 12-18, 1995.

SILVA, C. A. ; ABREU, A. D. F. B.; RAMALHO, M. A. P.; MAIA, L. G. S. Chemical composition as related to seed color of common bean. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 12, p. 132–137, 2012.

SILVA, M. R.; DA SILVA, M. A. A. P. Fatores antinutricionais: inibidores de proteases e lectinas. **Revista de Nutrição**, v. 13, n. 1, p. 3-9, 2000.

TACO. Tabela Brasileira de Composição de Alimentos 4^a. edição revisada e ampliada Disponível em <
<http://www.unicamp.br/nepa/taco/tabela.php?ativo=tabela>>, acessado em 20 de julho de 2014.

TAKO, E.; BEEBE, S. E.; REED, S.; HART, J. J.; GLAHN, R. P. Polyphenolic compounds appear to limit the nutritional benefit of biofortified higher iron black bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Nutrition Journal**, v. 13, p. 1-10, 2014.

TOLEDO, T. C.; CANNIATTI-BRAZACA, S. G. Avaliação química e nutricional do feijão carioca (*Phaseolus vulgaris* L.) cozido por diferentes métodos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 2, p. 355–360, 2008.

WEAVER, C. M. ; HEANEY, R. P.; PROULX, W. R.; HINDERS, S. M. ; PACKARD, P. T. Absorbability of calcium from common beans. **Journal of Food Science**, v. 58, n. 6, p. 1401-1403, 1993.

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS DE SEMENTES DE FEIJÃO SOB MULTICOLINEARIDADE EM CONDIÇÕES DE SALINIDADE³

³ Artigo aceito para publicação na revista Ciência Agronômica.

CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS DE SEMENTES DE FEIJÃO SOB MULTICOLINEARIDADE EM CONDIÇÕES DE SALINIDADE

RESUMO

Objetivou-se neste trabalho avaliar o efeito da multicolinearidade na análise de diversidade de genótipos de feijão, em relação à qualidade fisiológica de sementes, em diferentes níveis de salinidade. O teste de germinação foi realizado em rolos de papel toalha tipo germitest, embebidos em soluções de NaCl nos potenciais osmóticos de 0,0; -0,3 e -0,6 MPa, mantidos em germinador tipo Mangelsdorff, com temperatura de 25 °C e luz constante. O delineamento utilizado foi o inteiramente ao acaso, em arranjo fatorial 13 x 3 (genótipos x potenciais osmóticos), com quatro repetições de 25 sementes, totalizando 100 sementes por tratamento. Foram analisadas: peso de mil sementes, tempo médio de germinação, protrusão da raiz primária após nove dias, plântulas normais, massa seca da parte aérea, protrusão da raiz primária após cinco dias, comprimento da raiz, comprimento do hipocótilo, massa seca da raiz. Pelo diagnóstico de multicolinearidade na matriz de correlação fenotípica procedeu-se o descarte de variáveis utilizando-se a técnica de variável canônica. O efeito da multicolinearidade foi analisado utilizando-se o método de agrupamento Tocher, antes e após o descarte das variáveis. A metodologia de descarte de variáveis proposta é eficiente na redução da multicolinearidade e o número de descritores de qualidade fisiológica descartados é maior nos potenciais de -0,3 e -0,6 MPa. Sob condições de estresse salino necessita-se descartar três características e na ausência de estresse, apenas duas características descartadas satisfazem a condição de multicolinearidade fraca, para seguir com as análises de agrupamento. Os agrupamentos dos genótipos de feijoeiro comum são alterados em condições de multicolinearidade severa e fraca apenas na condição de estresse salino.

1. Introdução

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa da família Fabaceae, cujo grão é muito apreciado, sendo uma importante fonte de calorias, proteínas, carboidratos (HADŽIĆ et al., 2013; PLANS et al., 2013), zinco (ROSA et al., 2010), ferro (PEDROSA et al., 2015), cálcio (JOST et al., 2009) e apresenta baixo teor de lipídios (PEDROSA et al., 2015). No Brasil, o feijoeiro é a quinta cultura de grão mais produzida (CONAB, 2015) e em 2012 o Brasil foi o terceiro maior produtor mundial de feijão comum, com a produção de 2,94 milhões de toneladas e produtividade de 1037,24 kg ha⁻¹ (FAO, 2013).

A salinização reduz a produtividade de diversas culturas (ANDRÉO-SOUZA et al., 2010; MACHADO et al., 2007), inclusive a do feijoeiro (BEN-GAL et al., 2009), principalmente por induzir modificações morfológicas como redução da germinação (SAEIDI-SAR et al., 2013), do desenvolvimento inicial (BOURGAULT et al., 2010) e do crescimento vegetativo. Modificações que são atribuídas ao estresse osmótico, devido à redução do potencial hídrico do meio e, ao efeito iônico tóxico causado pelo acúmulo de íons nos tecidos (KHADRI; TEJERA; LLUCH, 2007; AYDIN; KANT; TURAN, 2012; ROSALES et al., 2012). No entanto, entre os genótipos de feijoeiro é possível selecionar os materiais genéticos mais tolerantes aos estresses salinos (BAYUELO-JIMENEZ; JASSO-PLATA; OCHOA, 2012) para serem utilizados como parentais em programas de melhoramento.

Um dos fatores que compromete a interpretação correta dos agrupamentos é a multicolinearidade, que é a alta relação entre o conjunto de características explicativas de um experimento, podendo diminuir a eficiência das técnicas multivariadas que utilizam a matriz de covariância residual. O melhorista pode utilizar técnicas que auxiliam na redução da multicolinearidade, como o descarte de variáveis redundantes, reduzindo o tempo e a mão de obra em avaliações futuras (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012).

Diante do exposto, objetivou-se neste trabalho analisar o efeito da multicolinearidade e descartar variáveis para a análise de diversidade de genótipos de feijão, em relação à qualidade fisiológica de sementes, em diferentes níveis de salinidade.

2. Material e métodos

O experimento foi conduzido no Laboratório de Análises de Sementes (LAS) do Departamento de Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-UFES), Alegre, ES, em janeiro de 2013.

Os genótipos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizados estão listados na Tabela 1, com a origem e o teor de água.

Tabela 1. Identificação, nome comum, região de origem e teor de água (TA) das sementes de feijão (*P. vulgaris*).

Identificação	Nome	Origem	TA (%)
G1	IPR Campos Gerais	Londrina-PR	10,8
G2	IAPAR-81	Londrina-PR	9,7
G3	IPR Andorinha	Londrina-PR	11,3
G4	IPR Siriri	Londrina-PR	9,6
G5	IPR Curió	Londrina-PR	10,6
G6	IPR Colibri	Londrina-PR	10,5
G7	Vagem Riscada	Muqui - ES	12,9
G8	Sangue de burro	Manhumirim-MG	13,6
G9	Carioquinha	Tupã-SP	11,8
G10	Rosinha	Tupã-SP	10,7
G11	Mulatinho	Tupã-SP	12,3
G12	Roxinho	Simonésia-MG	12,8
G13	Preto	São José do Mantimento-MG	14,2

As sementes foram desinfestadas em álcool 70% por 30 segundos, e, posteriormente, em solução de hipoclorito de sódio a 2,5% (modificado de MESQUITA; MARINO, 2009). Realizou-se o teste de germinação em germinador tipo Mangelsdorff, com temperatura de 25 °C e luz constante (duas lâmpadas fluorescentes de 40 W, tipo luz do dia especial). As sementes foram dispostas em rolos constituídos de três folhas de papel toalha do tipo germitest, umedecidas com um volume de solução equivalente a 2,5 vezes a sua massa seca. O potencial osmótico de -0,6 MPa foi considerado moderadamente prejudicial para o vigor de sementes de feijão em teste de germinação (COELHO et al., 2010), desta maneira foram selecionados os potenciais osmóticos de 0,0; -0,3 e -0,6 MPa para a realização dos testes. Para o cálculo e preparo das soluções nos potenciais

osmóticos de 0,0; -0,3 e -0,6 MPa de soluções salinas de NaCl utilizou-se a equação de Van't Hoff citada por Pimenta (2004).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com os tratamentos distribuídos em arranjo fatorial 13 x 3 (genótipos x potenciais osmóticos), com quatro repetições de 25 sementes, totalizando 100 sementes por tratamento.

As características analisadas foram : peso de mil sementes (PM) (BRASIL, 2009); tempo médio de germinação (TMG) (LABOURIAU, 1983); porcentagem de protrusão da raiz primária (≥ 2 mm) aos cinco dias após a sementeira (PC) e porcentagem de sementes com protrusão da raiz primária aos nove dias após a sementeira (G), adaptado de BRASIL (2009); a porcentagem de plântulas normais aos nove dias após a sementeira (PN) (BRASIL, 2009) foi obtida pela contagem das plântulas com as estruturas essenciais bem desenvolvidas e com mais de três centímetros de raiz e de hipocótilo.

Nove dias após a sementeira foi avaliado o comprimento (cm) do hipocótilo (CH) e da raiz primária (CR) das plântulas. Posteriormente, foram retirados os cotilédones da parte aérea e as raízes separadas, acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa com circulação de ar forçada a 70 °C até a obtenção de massa seca constante (72 horas). As massas da parte aérea e da raiz foram determinadas em balança analítica de precisão (0,0001 g) e os resultados expressos em g.plântula⁻¹.

As matrizes de covariância residual e fenotípica foram estimadas e a multicolinearidade foi diagnosticada para os dados da correlação fenotípica e classificada segundo o número de condições (NC) como fraca ($NC \leq 100$), moderada a forte ($100 < NC < 1000$) e severa ($NC \geq 1000$) (MONTGOMERY; PECK, 1981). Posteriormente, procedeu-se a análise das variáveis canônicas para o descarte da variável de maior importância associada ao menor autovalor (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012), este procedimento descrito foi realizado na forma de um *loop*, sendo o primeiro valor de NC inferior a 100 considerado como critério de parada.

Para verificar o efeito da multicolinearidade sobre as variáveis de germinação das sementes e no crescimento inicial de plântulas realizou-se agrupamentos dos genótipos pelo método de otimização de Tocher, baseado na distância generalizada de Mahalanobis (D^2), antes e após o descarte das variáveis. Todas as análises foram realizadas utilizando-se o programa Genes, versão 2013 (CRUZ, 2013).

3. Resultados e Discussão

O teor de água das sementes entre os treze genótipos variou de 9,7 a 14,2 % (Tabela 1). O teor de água não apresentou correlação com nenhuma outra variável analisada (dados não apresentados), por isso não foi utilizado nas análises.

O diagnóstico de multicolinearidade realizado para o conjunto das nove variáveis avaliadas nos genótipos de feijoeiro em cada potencial osmótico evidenciou $NC \geq 1000$. Após o descarte de uma variável a multicolinearidade manteve-se severa ($NC \geq 1000$), no potencial osmótico de 0,0 MPa, enquanto nos demais potenciais osmóticos (-0,3 e -0,6 MPa) reduziu-se para moderada a forte ($100 < NC < 1000$) (Tabela 2).

Tabela 2 - Diagnóstico de multicolinearidade em relação ao número de condição (NC), e ao número de variáveis de sementes e plântulas de feijão analisadas nos potenciais osmóticos de 0,0; -0,3 e -0,6 MPa.

Número de variáveis	Potenciais osmóticos (MPa)		
	0,0	- 0,3	- 0,6
9	2424,179	10448,445	6873,647
8	1102,588	570,961	316,023
7	87,783	251,113	172,965
6	----	61,508	76,191

O descarte da segunda variável promoveu redução da multicolinearidade para fraca ($NC \leq 100$) no potencial de 0,0 MPa. No entanto, nos potenciais de -0,3 e -0,6 MPa apresentaram a multicolinearidade moderada a forte, por isso foi necessário o descarte da terceira variável para obter o $NC \leq 100$ (Tabela 2). A multicolinearidade proporcionou formas de agrupamentos não adequados, por impedir a verdadeira expressão do grau de dissimilaridade entre os indivíduos (CARGNELUTTI FILHO et al., 2009).

A análise nos potenciais osmóticos demonstrou que sob condições de estresse salino necessitou descartar três características e na ausência de estresse, apenas duas características, para satisfazer a condição de multicolinearidade fraca. Esse maior número de características eliminadas nas condições de estresse pode estar relacionado à alta associação entre as variáveis em condições de estresse.

O descarte de variáveis utilizando as variáveis canônicas proporcionou redução da multicolinearidade de 2424 para 87; redução de 10448 para 61, e de 6873 para 76, nos potenciais osmóticos de 0,0; -0,3 e -0,6 MPa, respectivamente (Tabela 2).

Na ausência de estresse (0,0 MPa), a característica G foi indicada para o descarte, pois apresentou maior coeficiente de ponderação no autovetor de menor importância da matriz de correlação fenotípica. Entretanto, o descarte da variável G não foi suficiente para atingir o $NC \leq 100$ (Tabela 3). No segundo ciclo de seleção, com ausência da variável G, a variável apontada para o descarte foi PC, que em termos absolutos apresentou o maior coeficiente de ponderação canônico (1,329), na última variável canônica (Tabela 3). Após o descarte da variável PC, atingiu o critério de multicolinearidade fraca. Portanto, as variáveis G e PC foram consideradas redundantes e aumentaram a multicolinearidade no potencial de 0,0 MPa.

Tabela 3 - Estimativa das variâncias (λ), variâncias acumuladas (λ_{ac}) e coeficientes de ponderação padronizados das variáveis canônicas para as características peso mil sementes (PM), tempo médio de germinação (TMG), protrusão da raiz primária após nove dias (G), plântulas normais (PN), protrusão da raiz primária após cinco dias (PC), comprimento do hipocótilo (CH), comprimento da raiz (CR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR), de plântulas oriundas de sementes de feijão (*P.vulgaris*) na ausência de estresse salino (0,0 MPa).

λ	λ_{ac}	PM	TMG	G	PN ³	PC ¹	CH	CR	MSPA ²	MSR
96,525	86,232	1,138	0,230	0,256	-0,216	0,337	-0,180	-0,209	0,253	-0,455
6,891	92,389	0,253	-0,858	1,106	-0,450	-1,023	-0,056	-0,231	-0,258	1,038
4,517	96,424	0,038	0,409	0,435	-0,399	-1,171	1,492	0,332	0,003	-0,457
1,982	98,195	0,203	-1,513	1,765	0,378	-2,387	0,0002	0,745	-0,297	-0,762
1,045	99,128	-0,038	1,134	-0,001	0,256	0,533	0,475	0,556	0,272	-0,218
0,488	99,565	-0,140	-1,384	1,354	-1,516	-0,741	-0,004	0,181	0,708	0,068
0,422	99,942	-0,133	-1,146	1,787	0,586	-2,457	0,292	-0,731	0,623	0,141
0,054	99,990	-0,135	-0,071	0,851	0,474	-1,646	-0,517	0,435	0,444	0,040
0,011	100,00	-0,002	0,525	-1,198	0,885	0,140	0,144	0,429	0,241	-0,090
95,996	87,356	1,131	0,406	----	-0,179	0,615	-0,191	-0,208	0,224	-0,456
6,289	93,079	0,239	-0,141	----	-0,310	0,285	-0,236	-0,311	-0,370	1,152
4,442	97,121	0,055	0,715	----	-0,404	-0,649	1,464	0,268	-0,072	-0,297
1,472	98,461	0,298	-0,242	----	0,636	-0,552	0,033	0,867	-0,753	-0,692
1,045	99,412	-0,038	1,133	----	0,255	0,532	0,475	0,556	0,273	-0,218
0,465	99,835	0,026	0,444	----	1,544	-0,863	0,153	-0,593	-0,194	0,043
0,145	99,967	-0,006	0,598	----	-0,102	0,304	-0,541	0,234	-0,296	0,041
0,037	100,000	-0,110	0,149	----	0,926	-1,329	-0,252	0,577	0,555	-0,028
87,154	87,081	1,082	0,416	----	0,244	----	-0,056	-0,096	0,237	-0,567
6,186	93,262	0,253	-0,071	----	-0,186	----	-0,056	-0,248	-0,378	1,073
3,957	97,215	-0,004	0,778	----	-0,903	----	1,441	0,192	0,000	-0,292
1,369	98,583	0,278	0,053	----	0,229	----	0,218	0,984	-0,695	-0,725
0,947	99,529	-0,103	1,174	----	0,822	----	0,394	0,287	0,473	-0,053
0,333	99,862	-0,101	-0,290	----	-0,721	----	-0,143	0,739	0,589	-0,025

continua...

continuação...

0,138	100,000	-0,039	0,605	----	0,064	----	-0,595	0,408	-0,118	0,035
-------	---------	--------	-------	------	-------	------	--------	-------	--------	-------

Os valores ¹ e ² correspondem à primeira e à segunda variáveis descartadas, respectivamente.

No potencial de -0,3 MPa, a primeira característica indicada para o descarte foi a PC (Tabela 4). Necessitou-se do segundo e do terceiro ciclo de descarte das variáveis para obter multicolinearidade fraca. As variáveis descartadas foram MSPA e PN, em função dos pesos de seus coeficientes de ponderação (0,826 e 1,168), na última variável canônica, respectivamente (Tabela 3). A retirada destas três variáveis sob estresse de -0,3 MPa foi suficiente para satisfazer a condição de multicolinearidade fraca ($NC \leq 100$).

Tabela 4 - Estimativa das variâncias (λ), variâncias acumuladas (λ_{ac}) e coeficientes de ponderação padronizados das variáveis canônicas para as características peso de mil sementes (PM), tempo médio de germinação (TMG), protrusão da raiz primária após nove dias (G), plântulas normais (PN), protrusão da raiz primária após cinco dias (PC), comprimento do hipocótilo (CH), comprimento da raiz (CR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR), de plântulas oriundas de sementes de feijão (*P.vulgaris*) no potencial osmótico de -0,3 MPa, induzido com solução de NaCl.

λ	λ_{ac}	PM	TMG	G ¹	PN	PC ²	CH	CR	MSPA	MSR
70,197	87,669	1,045	0,175	-0,233	-0,486	0,525	-0,159	-0,345	0,331	-0,104
5,246	94,221	0,145	0,980	-1,242	0,475	0,025	0,309	0,200	-0,190	0,405
2,134	96,885	0,053	-0,530	-0,937	0,119	0,950	-0,420	-0,356	-0,767	1,115
1,593	98,875	-0,054	-0,834	0,595	-0,606	-0,103	1,035	0,497	0,340	0,250
0,487	99,483	-0,100	-0,028	-0,616	0,890	-0,501	-0,292	0,944	0,290	-0,254
0,181	99,709	-0,080	0,300	2,075	-0,281	-1,707	-0,304	0,011	0,222	0,275
0,138	99,882	0,063	-0,436	-0,635	-0,0003	1,888	-0,307	0,159	-0,054	-0,082
0,085	99,988	-0,066	-0,488	1,032	1,118	-1,402	0,124	-0,350	0,413	0,056
0,010	100,000	-0,190	0,339	-1,682	-1,252	2,321	0,095	-0,116	0,708	0,151
68,934	87,717	1,035	0,182	0,143	-0,334	----	-0,144	-0,330	0,340	-0,133
5,246	94,392	0,145	0,981	-1,224	0,481	----	0,310	0,201	-0,189	0,403
2,012	96,952	0,051	-0,543	-0,259	0,383	----	-0,386	-0,325	-0,753	1,103
1,592	98,977	-0,055	-0,821	0,530	-0,648	----	1,046	0,504	0,360	0,222
0,480	99,588	-0,098	-0,035	-0,978	0,762	----	-0,283	0,959	0,300	-0,281
0,166	99,798	-0,048	0,127	1,070	-0,515	----	-0,421	0,138	0,189	0,189
0,106	99,933	0,061	-0,772	0,275	1,163	----	-0,052	-0,138	0,019	-0,106
0,052	100,000	-0,213	0,151	-0,072	-0,305	----	0,178	-0,317	0,826	0,206
64,199	88,186	1,062	0,167	0,033	-0,169	----	-0,265	-0,412	----	0,027
5,151	95,262	0,111	1,004	-1,168	0,390	----	0,402	0,271	----	0,289
1,693	97,588	-0,049	-0,946	0,247	-0,321	----	0,647	0,262	----	0,807

continua...

continuação...

1,071	99,058	0,105	-0,202	0,663	-0,577	----	0,767	0,236	----	-0,562
0,420	99,636	-0,005	-0,106	-0,938	0,793	----	-0,183	1,028	----	-0,443
0,159	99,855	0,002	0,092	1,031	-0,424	----	-0,447	0,251	----	0,112
0,106	100,000	0,066	-0,775	0,281	1,168	----	-0,058	-0,127	----	-0,111
63,548	88,862	1,061	0,156	-0,077	----	----	-0,295	-0,382	----	0,006
4,890	95,699	0,103	1,034	-0,930	----	----	0,513	0,221	----	0,353
1,643	97,997	-0,058	-1,013	0,054	----	----	0,501	0,290	----	0,807
0,953	99,330	0,107	-0,517	0,358	----	----	0,727	0,460	----	-0,618
0,327	99,787	-0,043	0,378	-0,724	----	----	-0,299	0,947	----	-0,253
0,153	100,000	0,027	-0,204	1,110	----	----	-0,419	0,143	----	0,079

Os valores ¹, ² e ³ correspondem à primeira, à segunda e à terceira variáveis descartadas, respectivamente.

Na condição de -0,6 MPa realizaram-se três ciclos de seleção e as características descartadas foram G, TMG e CR, em função do peso dos seus coeficientes de ponderação (2,273; 1,046 e 1,100), na última variável canônica, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 - Estimativa das variâncias (λ), variâncias acumuladas (λ_{ac}) e coeficientes de ponderação padronizados das variáveis canônicas para os caracteres peso de mil sementes (PM), tempo médio de germinação (TMG), protrusão da raiz primária após nove dias (G), plântulas normais (PN), protrusão da raiz primária após cinco dias (PC) comprimento do hipocótilo (CH), comprimento da raiz (CR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR), de plântulas oriundas de sementes de feijão (*P.vulgaris*) no potencial osmótico de -0,6 MPa, induzido com solução de NaCl.

λ	λ_{ac}	PM	TMG ²	G ¹	PN	PC	CH	CR ³	MSPA	MSR
90,685	79,420	1,177	-0,280	0,216	-0,503	-0,259	-0,538	0,376	0,375	0,529
13,878	91,574	0,136	-0,178	0,608	1,045	-1,065	0,299	0,115	-0,599	0,417
4,203	95,255	0,097	-0,233	0,676	0,058	0,262	-0,567	0,337	-0,485	0,464
2,458	97,408	-0,195	-0,023	-0,293	-0,860	0,452	0,007	0,363	1,261	-0,078
1,475	98,700	-0,024	0,024	-0,234	0,713	0,201	-0,486	0,193	1,181	-1,701
1,086	99,651	0,078	0,346	-0,112	0,016	0,523	0,783	-0,069	0,371	-0,735
0,206	99,831	-0,059	-1,242	2,101	-0,321	-2,119	-0,010	0,186	0,437	-0,576
0,160	99,971	0,006	0,603	-0,605	0,127	0,600	-0,535	1,144	-0,787	0,206
0,033	100,000	-0,009	0,056	2,273	0,107	-2,208	-0,121	-0,006	0,072	-0,095
90,302	79,897	1,173	-0,218	----	-0,509	-0,049	-0,534	0,378	0,372	0,536
13,421	91,772	0,135	-0,002	----	1,044	-0,501	0,320	0,123	-0,604	0,441
4,026	95,334	0,099	-0,037	----	0,083	0,913	-0,555	0,373	-0,495	0,512
2,437	97,491	-0,202	-0,109	----	-0,890	0,136	0,026	0,338	1,297	-0,107
1,468	98,789	-0,032	-0,051	----	0,686	-0,039	-0,486	0,186	1,230	-1,734
1,084	99,749	0,075	0,310	----	0,012	0,409	0,781	-0,071	0,402	-0,767

continua...

continuação...

0,165	99,895	-0,017	0,035	----	-0,029	-0,020	-0,473	1,111	-0,549	-0,029
0,119	100,000	0,032	1,046	----	0,321	0,052	-0,277	0,314	-0,510	0,361
86,905	79,439	1,164	----	----	-0,429	-0,025	-0,527	0,420	0,257	0,564
13,421	91,707	0,135	----	----	1,045	-0,501	0,320	0,123	-0,605	0,442
4,022	95,383	0,102	----	----	0,098	0,918	-0,554	0,380	-0,519	0,519
2,415	97,591	-0,193	----	----	-0,863	0,163	0,038	0,365	1,246	-0,088
1,465	98,930	-0,028	----	----	0,693	-0,020	-0,466	0,199	1,231	-1,748
1,005	99,849	0,067	----	----	-0,083	0,373	0,846	-0,183	0,481	-0,791
0,165	100,000	-0,018	----	----	-0,040	-0,021	-0,462	1,100	-0,532	-0,042
78,236	78,363	1,116	----	----	-0,402	-0,088	-0,269	----	0,307	0,539
13,298	91,682	0,147	----	----	1,053	-0,534	0,396	----	-0,590	0,445
3,714	95,402	0,154	----	----	0,245	0,852	-0,345	----	-0,694	0,602
2,192	97,598	-0,147	----	----	-0,886	0,298	0,259	----	1,106	0,199
1,419	99,019	-0,028	----	----	0,606	0,065	-0,291	----	1,434	-1,756
0,979	100,000	0,068	----	----	-0,101	0,341	0,775	----	0,263	-0,688

Os valores ¹, ² e ³ correspondem à primeira, à segunda e à terceira variáveis descartadas, respectivamente.

O efeito multicolinearidade sobre o agrupamento de feijoeiro prejudica a real formação de grupos (CARGNELUTTI FILHO et al., 2009), sendo este efeito mais expressivo sob estresse salino (-0,3 e -0,6 MPa). Os agrupamentos de genótipos de feijão pelo método de otimização de Tocher foram diferentes, apenas, em condições de multicolinearidade severa e fraca. Entretanto, em condições não estressantes a multicolinearidade não alterou o agrupamento (Tabela 6), o qual pode ser justificado pelo menor número de ciclos necessários de descartes para reduzir a multicolinearidade, em virtude da menor relação entre as características avaliadas (Tabela 2).

Tabela 6 - Agrupamento antes do descarte (nove características para todos os potenciais) e após o descarte das variáveis (sete características no potencial de 0,0MPa e seis características nos potenciais de -0,3 e -0,6 MPa), baseado em características morfológicas, pelo método de otimização de Tocher, de 13 genótipos de feijão, durante a germinação de sementes sob os potenciais osmóticos de 0,0; -0,3 e -0,6 MPa, induzido com solução de NaCl.

*Antes do descarte						**Após o descarte						
Grupo	Genótipos					Grupo	Genótipos					
0,0 MPa												
1	G2	G7	G8	G13	G6	1	G2	G7	G8	G13	G6	
2	G1	G4	G11			2	G1	G4	G11			
3	G3	G12				3	G3	G12				
4	G5	G9				4	G5	G9				
5	G10					5	G10					
-0,3 MPa												
1	G2	G8	G13	G6		1	G2	G8	G7			
2	G1	G4	G10			2	G6	G13				
3	G3	G12				3	G1	G4				
4	G5					4	G9	G12				
5	G9					5	G3	G5				
6	G7					6	G11					
7	G11					7	G10					
-0,6 MPa												
1	G3	G9	G5	G6	G13	1	G3	G9	G5	G6	G13	G8
2	G1	G4				2	G1	G4	G11			
3	G8	G11				3	G7	G10				
4	G7	G10				4	G2					
5	G2					5	G12					
6	G12											

*Presença de multicolinearidade severa: Os potenciais osmóticos estudados apresentaram as características: PM; TMG; G; PN; PC; CH; CR; MSPA; MSR. **Presença de multicolinearidade fraca-As características mantidas foram: no potencial osmótico de 0,0 MPa (PM, TMG, PN, CH, CR, MSPA e MSR); no potencial osmótico -0,3 MPa (PM, TMG, G, CH, CR e MSR); e no potencial osmótico -0,6 MPa (PM, PN, PC,CH, MSPA e MSR).

Nos potenciais osmóticos de 0,0; -0,3 e -0,6 MPa, com ausência de multicolinearidade, formaram cinco, sete e cinco grupos, respectivamente (Tabela 6). Os resultados obtidos nos diferentes potenciais osmóticos reforçam a ideia da necessidade de estudar o agrupamento de genótipos nos mais variados ambientes de salinidade. Almeida et al. (2011) trabalhando com *Vigna unguiculata* encontraram resultados similares ao obtidos no presente trabalho, nos quais os agrupamentos de genótipos foram alterados em diferentes ambientes com salinidade durante o desenvolvimento das plantas, em função das respostas fenotípicas variarem muito de um ambiente para o outro.

Os pares de genótipos G1 e G4; G6 e G13, em todos os potenciais osmóticos (ausentes e presentes de multicolinearidade), mantiveram-se juntos, sugerindo serem genótipos menos dissimilares (Tabela 6). Os genótipos que formaram grupos com elevado índice de dissimilaridade podem ser avaliados como genitores promissores, em cruzamentos artificiais, para a obtenção de populações segregantes e identificação de genótipos transgressivos (BERTINI et al., 2010).

4. Conclusões

- A metodologia de descarte de variáveis utilizando variáveis canônicas é eficiente na redução da multicolinearidade e o número de descritores de qualidade fisiológica descartados é maior nos potenciais de -0,3 e -0,6 MPa;
- Os agrupamentos dos genótipos de feijão comum são alterados em condições de multicolinearidade severa e fraca apenas na condição de estresse salino.

5. Agradecimentos

Agradecimentos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes/REUNI), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pelo fomento e pela concessão de bolsas. Os autores agradecem ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), pelo fornecimento das sementes.

6. Referências

ALMEIDA, W.S.; BELÉM, F.R.F.; BERTINI, C.H.C.M.; PINHEIRO, M.S.; TEÓFILO, E.M. Identificação de genótipos de feijão-caupi tolerantes a salinidade avaliado por meio de método multivariado. **Ciência Rural**, v. 41, n. 11, p. 1884-1889, 2011.

ANDRÉO-SOUZA, Y.; PEREIRA, A.L.; SILVA, F.F.S.; RIEBEIRO-REIS, R.C.; EVANGELISTA, M.R.V.; CASTRO, R.D.; DANTAS, B.F. Efeito da salinidade na germinação de sementes e no crescimento inicial de mudas de pinhão-manso. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 2, p. 83-92, 2010.

AYDIN, A.; KANT, C.; TURAN, M. Humic acid application alleviate salinity stress of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants decreasing membrane leakage. **African Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 7, p. 1073-1086, 2012.

BAYUELO-JIMENEZ, J. S.; JASSO-PLATA, N.; OCHOA, I. Growth and physiological responses of *Phaseolus* species to salinity stress. **International Journal of Agronomy**, v. 2012, p.1-13, 2012.

BEN-GAL, A.; BOROCHOV-NEORI, H.; YERMIYAHU, U.; SHANI, U. Is osmotic potential a more appropriate property than electrical conductivity for evaluating whole-plant response to salinity? **Environmental and Experimental Botany**, v. 65, n. 2, p. 232-237, 2009.

BERTINI, C.H.C.M.; ALMEIDA, W.S.; SILVA, A.P.M.; SILVA, J.W.L.; TEÓFILO, E.M. Análise multivariada e índice de seleção na identificação de genótipos superiores de feijão-caupi. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 4, p. 613-619, 2010.

BOURGAULT, M.; MADRAMOOTOO, C. A.; WEBBER, H. A.; STULINA, G.; HORST, M. G.; SMITH, D. L. Effects of deficit irrigation and salinity stress on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and mungbean (*Vigna radiata*) wilczek grown in a controlled environment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 196, n. 4, p. 262-272, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA, 2009. 395 p.

CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L.; RIBEIRO, N.D. Agrupamento de cultivares de feijão em presença e em ausência de multicolinearidade. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2409-2418, 2009.

COELHO, D.L.M.; AGOSTINI, E.A.T.; GUABERTO, L.M.; MACHADO NETO, N.B.; CUSTÓDIO, C.C. Estresse hídrico com diferentes osmóticos em sementes de feijão e expressão diferencial de proteínas durante a germinação. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 3, p. 491-499, 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: CONAB, 2015. v. 2, 116 p. (Safra 2014/15).

CRUZ, C. D. GENES-a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. Viçosa-MG: UFV, 2012. 514 p.

FAO (2013). Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E>>. Acesso em: 04 agos. 2014.

HADŽIĆ, A.; ČOTA, J.; SARIĆ, E.; HODŽIĆ, I; SALMAN, N. ČOTA, J. Energy and nutritional value of raw grains of domestic bean varieties. **Agroznanje**, v. 14, n. 1, p. 51-58, 2013.

JOST, E.; RIBEIRO, N.D.; MAZIERO, S.M.; CERUTTI, T.; ROSA, D.P. Efeitos gênicos do teor de cálcio em grãos de feijão. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 31–37, 2009.

KHADRI, M.; TEJERA, N. A.; LLUCH, C. Sodium chloride–ABA interaction in two common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars differing in salinity tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 60, n. 2, p. 211–218, 2007.

LABOURIAU, L. G. **A germinação de sementes**. Washington: OEA, 1983. 174 p.

MESQUITA, J. B.; MARINO, R. H. Micoflora de sementes de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) provenientes do Estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 3, p. 252-256, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: J. Wiley, 1981. 504 p.

REGINA MACHADO, R.; AGUIAR NETTO, A.O.; CAMPECHE, L.F.S.M.; BARROS, A.C. Efeito da salinidade em características físico-hídricas em solos salino-sodilizados no perímetro irrigado Jabiberi-SE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 1, n. 1, p. 15-19, 2007.

PLANS, M.; SIMÓ, J.; CASAÑAS, F.; SABATÉ, J.; RODRIGUEZ-SAONA, L. Characterization of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by infrared spectroscopy: Comparison of MIR, FT-NIR and dispersive NIR using portable and benchtop instruments. **Food Research International**, v. 54, n. 2, p. 1643-1651, 2013.

PIMENTA, J. A. Relações hídricas. In: KERBAUY, G. B. (ed.). **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. cap. 1, p. 1-39.

PEDROSA, M. M.; CUADRADO, C.; BURBANO, C.; MUZQUIZ, M.; CABELLOS, B.; OLMEDILLA-ALONSO, B.; ASENSIO-VEGAS, C. Effects of industrial canning on the proximate composition, bioactive compounds contents and nutritional profile of two Spanish common dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Food Chemistry**, v. 166, p. 68-75, 2015.

RENCHER, A. C. (2003). **Methods of multivariate analysis**. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons. 738 p.

ROSA, S. S.; RIBEIRO, N. D.; JOST, E.; REINIGER, L. R. S.; ROSA, D. P.; CERUTTI, T.; POSSOBOM, M. T. D. F. Potential for increasing the zinc content in common bean using genetic improvement. **Euphytica**, v. 175, n. 2, p. 207–213, 2010.

ROSALES, M. A.; OCAMPO, E.; RODRÍGUEZ-VALENTÍN, R.; OLVERA-CARRILLO, Y.; ACOSTA-GALLEGOS, J.; COVARRUBIAS, A. A. Physiological analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. **Plant physiology and biochemistry**, v. 56, p. 24–34, 2012.

SAEIDI-SAR, S.; ABBASPOUR, H.; AFSHARI, H.; YAGHOUBI, S. R. Effects of ascorbic acid and gibberellin GA₃ on alleviation of salt stress in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 3, p. 667-677, 2013.

CAPÍTULO IV

Análise de fatores aplicada à seleção de genótipos de feijão tolerantes ao estresse osmótico

Análise de fatores aplicada à seleção de genótipos de feijão tolerantes ao estresse osmótico

RESUMO

A produção de feijão é limitada pelo estresse osmótico, necessitando selecionar genótipos tolerantes. Sendo assim, objetivou-se selecionar genótipos de feijão tolerantes aos estresses osmótico e salino e para isso foram analisados: porcentagem de germinação e de plântulas normais, índice de velocidade de germinação, comprimentos de raiz e de hipocótilo, massas seca de raiz e da parte aérea, razão raiz/parte aérea e o produto da porcentagem de plântulas normais x comprimento das plântulas. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 34 x 3 (genótipos x ambientes). Os ambientes corresponderam ao controle (água) e aos estresses osmóticos no potencial de -0,6 MPa, induzidos por soluções de cloreto de sódio (NaCl) e manitol. Utilizou-se o método de análise de fatores para a redução de multicolinearidade. A seleção dos genótipos mais tolerantes foi feita pela estatística multivariada e via modelos mistos, sendo que os genótipos e suas interações com o ambiente constituíram em fatores aleatórios e os ambientes constituíram em fatores fixos. A análise de fatores permitiu a redução da multicolinearidade, reduzindo de nove variáveis para três fatores, que representavam mais de 80% da variância. O fator criado “capacidade germinativa” é o mais expressivo a ser estudado pelo processo de melhoramento do feijoeiro quando se seleciona genótipos tolerantes aos estresses osmóticos. Os genótipos que apresentaram as maiores tolerâncias, adaptabilidade e estabilidade quanto aos estresses foram: CNFC 15466, CNFC 15462, CNFC 15630, BRS Valente, Capixaba Precoce, CNFP 15290, CNFP 15292 e CNFP 15302. Os genótipos selecionados são promissores parentais em programas de melhoramento de feijoeiro.

1. Introdução

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma espécie importante para alimentação humana pelas suas sementes constituir em importante fonte de aminoácidos (RIBEIRO et al., 2010), potássio, ferro, zinco, cálcio, cobre (RIBEIRO et al., 2012), fibras solúveis e insolúveis (LONDERO et al., 2009). O Brasil destaca-se como um dos maiores produtores mundiais de feijão, sendo responsável por aproximadamente 12% das 23 milhões de toneladas de feijão produzidas no mundo (FAO, 2013).

A cultura do feijoeiro é uma das mais sensíveis ao estresse osmótico no solo (BEN-GAL et al., 2009). Os estresses salino e hídrico são alguns dos fatores que mais afetam negativamente a germinação, o desenvolvimento, o crescimento e a produção do feijoeiro (BOURGAULT et al., 2010; TAÏBI et al., 2011; BOURGAULT et al., 2013; SAEIDI-SAR et al., 2013). No entanto, com a existência de variabilidade entre os genótipos de feijoeiro é possível selecionar materiais genéticos mais tolerantes aos estresses hídrico e salino pela maior eficiência no uso da água e do ajustamento osmótico (BAYUELO-JIMENEZ; JASSO-PLATA; OCHOA, 2012; ROSALES et al., 2012).

A avaliação da tolerância ao estresse salino do feijoeiro está relacionada a um grande número de características na fase de crescimento inicial como germinação, vigor, razão da raiz/parte aérea (COELHO et al., 2010) e durante todo o desenvolvimento da folha e acúmulo de biomassa (BAYUELO-JIMENEZ; JASSO-PLATA; OCHOA, 2012). Portanto, a avaliação de diversas características é necessária para estimar o nível de tolerância ao estresse osmótico do feijoeiro. Porém, muitas vezes esta tarefa é dificultada pela análise conjunta de todos os dados.

A análise multivariada é uma ferramenta que auxilia os melhoristas de plantas a trabalhar com um conjunto de variáveis para a seleção de genótipos tolerantes ao estresse osmótico (MOREIRA et al., 2009; ZILIO et al., 2011). A análise de fatores é uma técnica multivariada que permite identificar combinações de variáveis e compreender as inter-relações entre as mesmas, expressando as covariâncias e facilitando a seleção de genótipos promissores. Com essa técnica é possível substituir o conjunto original de característica por um conjunto inteiramente novo, com menor número de variáveis (FERREIRA et al., 2010), e manter todas as relações originais entre as variáveis.

A análise de fatores permite selecionar genótipos não só com base de seus valores fenotípicos, mas também pela covariação das cargas fatoriais das variáveis latentes, que não pode ser observada diretamente nas amostras (RENCHER, 2002). Com a análise de fatores é possível reduzir a dimensionalidade das variáveis para estudar o efeito do desenvolvimento inicial do feijão, e selecionar genótipos para condições de estresse osmótico.

A seleção de genótipos tolerantes ao estresse osmótico é necessária para programas de melhoramento desta importante cultura. Portanto, este trabalho apresenta a utilização de uma metodologia multivariada de seleção de genótipos de feijão tolerantes ao estresse osmótico, que exclui os efeitos da multicolinearidade e seleciona os genótipos em relação aos seus valores genéticos.

2. Material e métodos

As sementes dos 22 genótipos de feijão dos grupos comercial Carioca e 12 genótipos do grupo Preto (Tabela 1), utilizados neste estudo foram gentilmente cedidas pelo Instituto Capixaba de Pesquisa e Extensão Rural (Incaper). O teor de água e o peso de mil sementes seguiram os critérios de Brasil (2009).

Tabela 1. Relação dos genótipos de feijoeiro (*P. vulgaris*), teor de água, peso de mil sementes e grupo comercial (GC).

Código	GENÓTIPO	Teor de água (%)	Peso de mil sementes (g)	GC
G01	BRS ESTILO	15,48	223,49	Carioca
G02	BRS NOTÁVEL	14,98	245,57	Carioca
G03	BRS PONTAL	11,16	251,25	Carioca
G04	BRSMG MAJESTOSO	11,48	266,38	Carioca
G05	CARIOCA PRECOCE	13,64	291,12	Carioca
G06	CNFC 15460	13,95	219,06	Carioca
G07	CNFC 15462	14,80	215,72	Carioca
G08	CNFC 15480	13,40	225,04	Carioca
G09	CNFC 15497	14,35	241,42	Carioca
G10	CNFC 15502	14,43	281,87	Carioca
G11	CNFC 15504	15,06	246,36	Carioca
G12	CNFC 15507	14,12	259,53	Carioca
G13	CNFC 15534	15,59	276,84	Carioca
G14	CNFC 15625	13,80	248,24	Carioca
G15	CNFC 15626	14,25	257,77	Carioca

continua...

continuação...

G16	CNFC 15629	13,41	262,37	Carioca
G17	CNFC 15630	13,61	246,52	Carioca
G18	CNFC 15873	13,00	230,01	Carioca
G19	CNFC 15874	14,03	267,72	Carioca
G20	IPR 139	13,81	205,61	Carioca
G21	IPR COLIBRI	12,50	247,83	Carioca
G22	PÉROLA	13,97	235,98	Carioca
G23	BRS CAMPEIRO	15,05	278,07	Preto
G24	BRS VALENTE	12,23	239,89	Preto
G25	CAPIXABA PRECOCE	13,69	189,48	Preto
G26	CNFP 15290	15,54	272,31	Preto
G27	CNFP 15292	14,11	203,03	Preto
G28	CNFP 15302	13,64	220,49	Preto
G29	CNFP 15304	13,98	267,91	Preto
G30	CNFP 15310	14,44	188,12	Preto
G31	CNFP 15359	13,99	265,62	Preto
G32	CNFP 15361	14,02	243,51	Preto
G33	IAC DIPLOMATA	12,14	246,16	Preto
G34	IPR UIRAPURU	15,12	249,49	Preto

As sementes foram submetidas ao estresse osmótico com manitol e solução de NaCl com potencial osmótico de -0,6 MPa, o qual é considerado moderadamente prejudicial ao vigor das sementes do feijoeiro (COELHO et al., 2010). A água destilada foi usada (0,0 MPa) como controle. O potencial osmótico foi calculado de acordo com a equação de Van 't Hoff, citado por Pimenta (2004): $\Psi_s = - RTCs$, em que: Ψ_s = potencial osmótico (MPa); R = constante dos gases ($0,008093 \text{ mol MPa}^{-1} \text{ K}^{-1}$); C = concentração (mol L^{-1}); s = número de partículas dissociadas e osmoticamente ativas; T = temperatura absoluta (K). Portanto, os experimentos foram conduzidos em três ambientes: água (água destilada), NaCl (solução no potencial osmótico de -0,6 MPa) e manitol (solução no potencial osmótico de -0,6 MPa).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 34 x 3 (genótipo x ambiente), com quatro repetições de 25 sementes por parcela, totalizando 100 sementes por tratamento. A semeadura foi feita em rolos de papel tipo germitest, com três folhas, que foram umedecidos com volume de água destilada ou solução salina, na quantidade equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco. Os rolos foram mantidos em sala climatizada a 25 °C e luz constante.

O experimento foi conduzido durante um período de nove dias para a avaliação da porcentagem de plântulas normais (PN) (BRASIL, 2009), considerando-se aquelas que apresentavam a partir de três centímetros de raiz e de hipocótilo.

A germinação foi avaliada diariamente, e o índice de velocidade de germinação (IVG) foi calculado conforme Maguire (1962): $IVG = G1/D1 + \dots + Gn/Dn$, em que: IVG = índice de velocidade de germinação; G1= número de sementes germinadas no primeiro dia após a semeadura ... Gn = número de sementes germinadas 'n' dias após a semeadura; D1 = um dia após a semeadura... Dn = 'n' dias após a semeadura.

Aos nove dias após a semeadura foram avaliados o comprimento do hipocótilo (CH) e comprimento das raízes (CR), expressos em cm plântula⁻¹. A parte aérea e as raízes das plântulas de cada parcela foram embaladas separadamente em sacos de papel tipo *kraft* e mantidas em estufa com circulação forçada de ar a 70 °C até massa constante. A massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR) foram mensuradas em balança analítica de precisão (0,0001 g), e os resultados expressos em g plântulas⁻¹. Foram determinadas a razão massa seca de raiz/massa seca de parte aérea (MSR/PA); a razão comprimento de raiz/comprimento de parte aérea (CR/PA); o produto da porcentagem de plântulas normais (PN) pelo comprimento das plântulas (-PN.CP- índice de vigor proposto por ABDUL-BAKI; ANDERSON, 1973). Foram avaliados os coeficientes de correlação fenotípicos entre os pares de características analisadas (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012).

2.1. Estatística multivariada

A análise de fatores foi a técnica multivariada utilizada para reduzir o número de variáveis. As cargas fatoriais foram estimadas pelo método do componente principal, com a decomposição espectral da matriz de correlação fenotípica. Posteriormente, escolheu-se um número de fatores comuns, e optou-se pelo modelo de fatores ortogonais. Esse número de fatores é igual ao número de autovalores superiores a uma unidade, e com soma da variância dos autovetores maiores que 80% (FERREIRA et al., 2004; FERREIRA, 2011).

A transformação ortogonal e não correlacionada das cargas dos fatores, denominada de rotação dos fatores, utilizando o método Varimax (HARMAN, 1976). Calculou-se a fração da variância de cada variável original que é explicada pelos 'm' fatores comuns (FERREIRA, 2011). Esta variância, denominada comunalidade, é

representada em [1]. Neste experimento, as comunalidades expressam a porcentagem da variância, de cada variável, que foi explicada pelos três fatores comuns.

$$h_i^2 = \sum_1^m = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, [1]$$

em que: h_i^2 = comunalidade, λ = autovalores da matriz de correlação fenotípica, m = número de fatores.

O modelo de análise de fatores utilizado foi o representado em [2], em que, para obtenção dos escores fatoriais os valores dos dados padronizados (média zero e variância um) foram multiplicados pelos fatores rotacionados (FERREIRA, 2011).

$$Y_p - \mu_p = \gamma_{p1}F_1 + \gamma_{p2}F_2 + \gamma_{p3}F_3 + \varepsilon_p, [2]$$

em que: Y_p = vetor p - dimensional (p) das variáveis originais; μ = média; γ = cargas fatoriais (posto $m \leq p$); F = vetor de fatores comuns latentes não observáveis (m); e ε_p = o fator específico.

As novas variáveis formadas após a rotação dos fatores foram interpretadas pelas magnitudes e pelos sinais das cargas fatoriais finais. A formação de um fator deve ter uma interpretação biológica, e os sinais das cargas fatoriais refletem o sentido da seleção para uma determinada variável, conforme o objetivo dos programas de melhoramento (FERREIRA et al., 2010).

A análise com modelo de regressão múltipla foi realizada, posteriormente, com os escores fatoriais obtidos pela análise de fatores, sendo consideradas as variáveis independentes para predizer o VVG-vigor e a velocidade de germinação- (PN.CP x IVG). A significância dos coeficientes de regressão foi testada pelo teste estatístico “t”, e para verificar o melhor ajustamento da regressão avaliaram-se os coeficientes de determinação (r^2).

Os escores fatoriais foram considerados as variáveis independentes para a predição do VVG do feijoeiro, utilizando-se o modelo de regressão múltipla [3].

$$VVG = a + b_1FS_1 + b_2FS_2 + b_3FS_3 + e [3]$$

em que: VVG= vigor e velocidade de germinação (PN.CP x IVG); a = constante da regressão; b 's= coeficientes da regressão; FS 's= escores fatoriais; e e = erro aleatório do modelo.

As estimativas dos parâmetros genéticos foram obtidas com base no procedimento REML/BLUP (RESENDE, 2002), dado por: [4] e [5]

$$y = Xa + Zg + Wi + e \quad [4]$$

$$\begin{bmatrix} X'X & X'Z & X'W \\ Z'X & Z'Z + I \left(\frac{\sigma_e^2}{\sigma_g^2} \right) & Z'W \\ W'X & W'Z & W'W + I \left(\frac{\sigma_e^2}{\sigma_i^2} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ g \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'y \\ Z'y \\ W'y \end{bmatrix} \quad [5], \text{ em que:}$$

y é o vetor de dados; a é o vetor de dados que representa os efeitos fixos dos ambientes somados à média geral; g é o vetor de efeito genotípico (aleatório); i é o vetor de efeitos da interação genótipo x ambiente (aleatório); e é o efeito de erros ou resíduos (aleatórios); X , Z e W são as matrizes de incidência para a , g e i , respectivamente.

Com base no modelo [4] a *deviance* (D) pode ser obtida pelo estimador, que se baseia na função logarítmica de verossimilhança restrita [5] (RESENDE, 2002):

$$D = -2 \ln(L) = \ln |X'V^{-1}X| + \ln |V| + (y - Xa)' V^{-1} (y - Xa) \quad [5], \text{ em que:}$$

$\ln(L)$ é o ponto de máximo da função logarítmica de verossimilhança restrita maximizada (PATTERSON; THOMPSON, 1971); e V é a matriz de variância e covariância de y .

As estimativas dos componentes de variância para os efeitos aleatórios do modelo [1] foram obtidas pelos estimadores iterativos de máxima verossimilhança restrita (REML) mostrados em [6; 7; 8; e 9] via algoritmo EM ("Expectation Maximization") (DEMPSTER et al., 1977):

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{y'y - \hat{a}'X'y - \tilde{g}'Z'y - \tilde{i}'W'y}{N - p(X)} \quad [6]$$

$$\hat{\sigma}_g^2 = \frac{\tilde{g}'\tilde{g} + \hat{\sigma}_e^2 \text{tr}(C^{22})}{N_g} \quad [7]$$

$$\hat{\sigma}_i^2 = \frac{\tilde{i}'\tilde{i} + \hat{\sigma}_e^2 \text{tr}(C^{33})}{N_i} \quad [8]$$

$$\begin{bmatrix} X'X & X'Z & X'W \\ Z'X & Z'Z + I \left(\frac{\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_g^2} \right) & Z'W \\ W'X & W'Z & W'W + I \left(\frac{\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_i^2} \right) \end{bmatrix}^{-1} = C^{-1} = \begin{bmatrix} C^{11} & C^{12} & C^{13} \\ C^{21} & C^{22} & C^{23} \\ C^{31} & C^{32} & C^{33} \end{bmatrix} \quad [9], \text{ em que:}$$

$\hat{\sigma}_e^2$ é a estimativa do componente de variância residual; $\hat{\sigma}_g^2$ é a estimativa do componente de variância genotípico; $\hat{\sigma}_i^2$ é a estimativa do componente de variância

da interação; N é o número de observações; $p(X)$ é o posto da matriz X ; N_g é o número de colunas da matriz Z ; N_i é o número de colunas da matriz W ; tr é o operador de traço matricial; C^{-1} é a matriz dos coeficientes das equações de modelos mistos.

A seleção dos melhores genótipos, considerando os três fatores criados, foi realizada pelo método MHPRVG (média harmônica da performance relativa dos valores genéticos) que seleciona os genótipos por adaptabilidade e estabilidade. Os valores genéticos, para a realização das análises, foram acrescidos de uma constante tornando a média positiva. A constante representa o menor valor genético em módulo nos três ambientes estudados, e somado com o valor 10^{-11} (adaptado de RESENDE, 2004).

Os genótipos foram selecionados para cada fator individualmente e, adicionalmente, foram selecionados pelo índice de soma de *ranks* (MULAMBA; MOCK, 1978), utilizando-se os valores de MHPRVG dos três fatores. Todas as análises foram realizadas utilizando-se os programas GENES (CRUZ, 2013) e o software R (R CORE TEAM, 2015).

3. Resultados e discussão

O uso de todas as variáveis analisadas apresentou multicolinearidade forte (MONTGOMERY; PECK, 1981), decorrente da alta correlação ($\geq 0,8$) entre três variáveis e do elevado número de condições (1.262,6). No entanto, com a utilização da análise de fatores, as nove variáveis iniciais foram reduzidas a três variáveis complexas sem elevada correlação. Com isso, o número de condições foi reduzido a 1,4, que representa multicolinearidade fraca, portanto, não representa um problema para as posteriores análises de seleção dos genótipos (Tabela 2).

Antes da redução da dimensionalidade das variáveis, oito das nove características analisadas apresentavam fator de inflação da variância acima de 0,8. Com o uso da análise de fatores, nenhuma característica apresentou fator de inflação da variância acima de 0,8 (Tabela 2), o que demonstra a eficiência da técnica para a redução da multicolinearidade entre as variáveis.

Tabela 2. Diagnóstico de multicolinearidade baseado no número de condições (NC) e no determinante da matriz de correlação fenotípica $X'X$ (DM) de 34 genótipos de feijão, em três ambientes (Água, NaCl e Manitol). Completo = nove características, e dados não transformados; Fatores = três supercaracterísticas originadas da análise de fatores.

Experimento	$rf \geq 0,8$	$FIV \geq 0,8$	NC ($\lambda_{max}/\lambda_{min}$)	DM	multicolinearidade
Completo	3	8	1262,6	0,00	forte
Fatores	0	0	1,4	0,97	fraca

rf: coeficiente de correlação fenotípico; FIV: fator de inflação da variância; NC: número de condições da matriz de correlação fenotípica. $NC \leq 100$, multicolinearidade fraca; $100 < NC < 1000$, multicolinearidade moderada a forte e $NC \geq 1000$, multicolinearidade forte.

A análise fatorial permitiu a redução de multicolinearidade, possibilitando o uso de todas as variáveis, sem causar problemas de interpretação. A multicolinearidade gera agrupamentos não adequados dos genótipos, porque impossibilita a expressão real da dissimilaridade entre os mesmos (CARGNELUTTI FILHO et al., 2009).

A metodologia de análise de fatores permitiu a redução das nove características iniciais em três supercaracterísticas, que são os fatores. O primeiro fator (Fator 1) correlaciona-se positivamente com as plântulas normais, comprimento de hipocótilo, comprimento de raiz e o produto da porcentagem de plântulas normais pelo comprimento das plântulas. Portanto, o Fator 1 reflete a "capacidade germinativa" das sementes e o comprimento das plântulas. O Fator 2 correlaciona-se mais fortemente à razão raiz/parte aérea, tanto da massa seca quanto do comprimento, portanto, é um fator associado à "razão". O Fator 3 está correlacionado mais fortemente com a massa seca da parte aérea e massa seca da raiz, portanto, é um fator que descreve a "massa" (Tabela 3).

O índice de velocidade de germinação foi a variável com os menores valores em todas as cargas fatoriais geradas e com a menor comunalidade, por isso não foi explicado por nenhum dos fatores estabelecidos (Tabela 3).

Tabela 3. Valores das cargas fatoriais finais (rotacionadas) e comunalidade obtidas pela análise de fatores de nove variáveis avaliadas para feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Comunalidade
IVG ¹	0,225	-0,558	0,031	0,363
PN	0,910	-0,232	-0,046	0,883

continua...

continuação...

MSPA	-0,316	-0,163	0,903	0,942
MSR	0,076	0,678	0,708	0,967
CH	0,940	-0,137	-0,169	0,931
CR	0,669	0,624	-0,133	0,854
MR/PA	0,259	0,872	0,072	0,833
CR/PA	-0,320	0,818	-0,033	0,773
PN.CP	0,983	0,053	-0,131	0,986
Variação (%)	40,2	30,6	12,9	
Autovalor	3,62	2,75	1,16	7,53
Capacidade				
Descrição	germinativa	Razão	Massa	

¹IVG: índice de velocidade de germinação, PN: porcentagem de plântulas normais, MSPA: massa seca da parte aérea, MSR: massa seca de raiz, CH: comprimento do hipocótilo, CR: comprimento das raízes, MR/PA: razão da massa raiz pela massa da parte aérea, CR/PA: razão do comprimento raiz pelo comprimento do hipocótilo, PN.CP: produto da porcentagem de plântulas normais pelo comprimento das plântulas.

Na análise fatorial, utilizando-se os 34 genótipos e as nove variáveis, 83,7% da variação total é explicada por três fatores. As comunalidades, que indicam a proporção da variância explicada por cada carga dos fatores comuns foram, em ordem decrescente: 98,6% (PN.CP); 96,7% (MSR); 94,2% (MSPA); 93,1% (CH); 88,3% (PN); 85,4% (CR); 83,3% (MR/PA); 77,3% (CR/PA); e 36,2% (IVG) (Tabela 3).

Os resultados do quadro de *deviance* demonstram que existe variação genotípica significativa, desconsiderando o efeito dos ambientes ou considerando o efeito ambiental (Tabela 4). Este fato representa que existe uma alta variação genética que deve ser explorada nos programas de melhoramento vegetal.

Tabela 4 – Análise de *deviance* para os efeitos aleatórios, considerando as análises fatorial e individual, e análise de variância para o efeito fixo do ambiente (Amb.) para os fatores capacidade germinativa [F1(CG)], razão [F2(R)] e massa [F3(M)].

Efeitos aleatórios	F1(CG)			F2(R)			F3(M)		
	<i>Deviance</i>	LRT	$p(\chi^2)$	<i>Deviance</i>	LRT	$p(\chi^2)$	<i>Deviance</i>	LRT	$p(\chi^2)$
Genótipos	508,52	39,73	< 0,01	846,57	23,67	< 0,01	295,96	55,61	< 0,01
Genótipo x Amb.	712,99	244,20	< 0,01	859,63	36,73	< 0,01	245,31	4,95	0,03
Água/Genótipos	259,46	133,51	< 0,01	295,65	109,04	< 0,01	75,65	60,06	< 0,01
Água/MC	125,95	---	---	186,61	---	---	15,59	---	---
NaCl/Genótipos	385,55	217,50	< 0,01	335,29	3,21	< 0,01	174,82	35,13	< 0,01
NaCl/MC	168,05	---	---	332,08	---	---	139,69	---	---
Manitol/Genótipos	378,45	175,22	< 0,01	350,58	102,74	< 0,01	157,10	46,02	< 0,01
Manitol/MC	203,23	---	---	247,84	---	---	111,08	---	---

continua...

continuação...

MC	468,79	---	---	822,90	---	---	240,36	---	---
Efeitos fixos	QM	F	p	QM	F	p	QM	F	p
Amb.	1669,55	3173,95	< 0,01	529,77	283,94	< 0,01	5,86	12,05	< 0,01
Resíduos	0,53	---	---	1,87	---	---	0,49	---	---

MC – Modelo completo, LRT – razão de verossimilhança, $p(\chi^2)$ – p-valor da estatística qui-quadrado para a razão de verossimilhança, pv – p-valor da estatística F de Wald.

A regressão múltipla demonstrou que os maiores valores positivos de "capacidade germinativa" (Fator 1) e "massa" (Fator 3) contribuem positivamente para o alto VVG. Entretanto, os valores negativos de "razão" (Fator 2) contribuem para maiores VVG (Tabela 5). O melhorista deve escolher os maiores valores de "capacidade germinativa (fator 1) e "massa" (Fator 3), e escolher o menor valor para "razão" (Fator 2).

Um alto valor de VVG significa plântulas com alta qualidade de tolerância aos estresses osmóticos, pois apresentam plântulas vigorosas e germinação mais acelerada. Todos os coeficientes foram significativos e, portanto, podem ser usados para as projeções para aumentar o VVG usando os três fatores criados. A regressão múltipla usando escores fatoriais tem a vantagem de não comprometer a análise e a interpretação dos dados pela multicolinearidade (EYDURAN et al. 2010).

Tabela 5. Modelo de regressão múltipla para a predição de vigor germinativo de genótipos de feijoeiro em diferentes ambientes (Água, NaCl e Manitol) utilizando-se os fatores 1, 2 e 3.

	Coeficiente
Intercepto	28115,38**
Fator1	5127,49**
Fator2	-358,0**
Fator3	2073,76**
r^2	0,926
r^2 ajustado	0,9254

*Significativo pelo teste "t" em nível de 1%.

Os parâmetros de crescimento da raiz e da parte aérea são afetados negativamente na presença de salinidade (KHADRI; TEJERA; LLUCH, 2007; ROSALES et al., 2012), principalmente, pelo acúmulo dos íons que na presença de NaCl aumenta significativamente a razão raiz/parte aérea em relação à massa (KHADRI et al., 2007), e a redução da condutividade hídrica do feijoeiro (CALVO-

POLANCO; SÁNCHEZ-ROMERA; AROCA, 2014), comprometendo o desenvolvimento normal das plântulas.

O maior dano da parte aérea pode estar relacionado com o grande acúmulo de Cl^- nesta porção da planta, além disso, existe maior translocação do Na^+ para a parte aérea para ser excluída pelas folhas (SIBOLE et al., 2000), porém como as plântulas foram avaliadas apenas aos nove dias (BRASIL, 2009), isso pode ter elevado a massa seca da parte aérea das plântulas de feijão germinadas sob estresse com NaCl, pois não teve tempo suficiente para eliminação do Na^+ pelas folhas.

O Fator 1 demonstra o potencial germinativo das sementes, e corresponde à capacidade da semente germinar e se desenvolver em uma plântula normal (Tabela 4). Desta maneira, mesmo em condições de estresse osmótico, os genótipos apresentaram escores com valores positivos, pois este é um indicativo de que estes genótipos apresentam grande tolerância ao estresse osmótico, como os CNFC 15462 (G07), CNFC 15630 (G17), CAPIXABA PRECOCE (G25), CNFP 15292 (G27) e CNFP 15302 (G28). O genótipo CAPIXABA PRECOCE, que é do grupo comercial preto, já foi relatado como moderadamente tolerante ao estresse hídrico (BUCKER et al., 2010). No entanto, para os outros genótipos não foram encontrados relatos na literatura sobre a tolerância, pois ainda não são cultivares comerciais e não foram testados.

Tabela 6. Escores fatoriais para os três fatores que descreveram as características germinativas de genótipos de feijão (*P. vulgaris*) em diferentes ambientes (Amb.).

Código	Amb.	Fator1	Fator2	Fator3	Código	Amb.	Fator1	Fator2	Fator3
G01	Água	4,91	1,12	-0,78	G18	Água	1,89	-2,48	0,51
G01	NaCl	-1,77	0,65	-0,63	G18	NaCl	-2,93	-1,98	0,91
G01	Manitol	-3,28	4,3	-1,84	G18	Manitol	-4,08	-0,93	0,38
G02	Água	2,15	-0,81	0,21	G19	Água	5,91	0,14	-1,54
G02	NaCl	-6,16	-1,58	-0,45	G19	NaCl	-2,05	-0,4	-1,88
G02	Manitol	-5,23	4,01	-0,42	G19	Manitol	-0,93	2,66	-1,8
G03	Água	3,57	-0,82	0,26	G20	Água	2,88	0,56	0,67
G03	NaCl	-5,38	-2,19	0,54	G20	NaCl	-5,06	-1,46	1,78
G03	Manitol	-4,1	1,36	-1,12	G20	Manitol	-2,52	1,57	1,57
G04	Água	2,28	-3,61	-0,33	G21	Água	4,2	-0,18	1,41
G04	NaCl	-3,92	-2,9	-0,28	G21	NaCl	-1,51	-1,25	1,63
G04	Manitol	-3,55	-0,61	0,07	G21	Manitol	-0,64	2,35	1,39

continua...

continuação...

G05	Água	6,7	-0,26	-0,56	G22	Água	1,18	-2,36	0,06
G05	NaCl	-0,46	-1,21	-0,54	G22	NaCl	-2,76	-2,73	0,52
G05	Manitol	-0,98	2,86	-1,16	G22	Manitol	-4,09	-0,23	-0,52
G06	Água	5,91	-2,18	-0,52	G23	Água	1,95	-3,67	0,08
G06	NaCl	1,24	-2,21	-0,04	G23	NaCl	-1,27	2,43	2,39
G06	Manitol	-0,27	0,35	-0,08	G23	Manitol	-1,23	1,96	0,82
G07	Água	5,12	-2,37	-0,34	G24	Água	5,49	-1,26	0,46
G07	NaCl	0,97	-3,14	0,03	G24	NaCl	0,91	-1,77	-0,11
G07	Manitol	1,63	2,32	-0,59	G24	Manitol	-2,09	0,16	-0,17
G08	Água	3,94	-0,62	0,27	G25	Água	5,2	-2,05	-0,67
G08	NaCl	-3,08	-2,13	0,33	G25	NaCl	1,75	-2,06	0,03
G08	Manitol	-3,21	1,21	-0,3	G25	Manitol	2,85	3,22	-0,63
G09	Água	4,53	1,15	-0,6	G26	Água	5,44	-2,2	-0,43
G09	NaCl	-4,46	0,19	-0,48	G26	NaCl	0,05	-2,66	0,38
G09	Manitol	-2,7	6,73	-0,57	G26	Manitol	-1,23	0,23	-0,23
G10	Água	3,87	-1,28	0,03	G27	Água	6,32	-0,46	-0,55
G10	NaCl	-5,23	-1,00	-0,06	G27	NaCl	1,6	-0,48	-0,31
G10	Manitol	-2,26	4,27	-0,34	G27	Manitol	2,16	4,97	0,22
G11	Água	3,66	3,43	0,00	G28	Água	3,87	-2,1	0,95
G11	NaCl	-2,82	1,14	0,18	G28	NaCl	1,14	-1,17	1,21
G11	Manitol	-4,04	3,38	-0,42	G28	Manitol	1,11	3,74	1,02
G12	Água	3,87	-1,6	0,23	G29	Água	5,2	-0,54	0,45
G12	NaCl	-2,67	-2,99	0,35	G29	NaCl	0,66	-1,58	0,47
G12	Manitol	-2,65	-0,24	0,19	G29	Manitol	-3,81	3,68	-0,12
G13	Água	3,17	-1,88	-0,41	G30	Água	3,96	-0,1	0,5
G13	NaCl	-1,6	-2,7	0,41	G30	NaCl	-2,93	-0,6	-0,66
G13	Manitol	-0,8	1,34	-0,88	G30	Manitol	-4,74	4,22	0,66
G14	Água	2,94	-0,07	0,31	G31	Água	4,56	2,35	0,81
G14	NaCl	-4,51	-0,77	-0,33	G31	NaCl	-5,32	-0,21	0,43
G14	Manitol	-5,05	1,44	-1,22	G31	Manitol	-5,71	2,77	-0,69
G15	Água	4,34	-1,21	-0,73	G32	Água	2,51	-1,24	1,1
G15	NaCl	-4,00	-1,59	-1,58	G32	NaCl	-2,59	-1,68	1,31
G15	Manitol	-2,96	1,94	-1,55	G32	Manitol	-4,2	3,99	0,7
G16	Água	1,91	-4,15	-0,25	G33	Água	2,74	0,04	0,81
G16	NaCl	-2,07	-1,85	0,05	G33	NaCl	-2,5	-1,16	0,44
G16	Manitol	-1,95	-0,34	-0,49	G33	Manitol	-4,01	1,81	0,23
G17	Água	6,25	-1,16	-0,92	G34	Água	5,07	0,94	0,97
G17	NaCl	3,02	-2,28	-0,93	G34	NaCl	0,24	-0,78	1,11
G17	Manitol	2,79	-0,06	-1,03	G34	Manitol	-0,23	6,56	1,25

Alguns genótipos apresentaram valores positivos para o Fator1 (potencial germinativo) apenas quando submetidos ao estresse com NaCl e no controle, ou seja, apresentaram tolerância à condição de estresse salino: CNFC 15460 (G06), BRS VALENTE (G24), CNFP 15290 (G26), CNFP 15304 (G29) e IPR UIRAPURU (G34) (Tabela 3). A análise de fatores permite selecionar genótipos não apenas por seus valores fenotípicos, mas também pela covariação das variáveis. Como os escores fatoriais são as variáveis latentes, desta maneira, não podem ser observadas diretamente na amostra (RENCHEER, 2002).

Plântulas desenvolvidas na ausência de estresse (água) apresentaram, em sua maioria, valores negativos no Fator 2 ("Razão"). Esta informação é importante para a seleção de genótipos com valores mais baixos para este fator, porque as plântulas desenvolvidas em condições de estresse têm modificações na "Razão" (Fator 2). Aumentando este valor, isto pode ocorrer pelo aumento do crescimento da raiz e ou pela diminuição do crescimento da parte aérea das plântulas. Em ambos os casos, o crescimento de plântulas normais foi modificado, e constitui-se em um fator importante para a seleção de genótipos com as menores alterações no desenvolvimento em presença de estresse.

O Fator 2 está relacionado com a razão da raiz/parte aérea das plântulas de feijão, tanto com o comprimento quanto com a massa seca. Uma característica que se pode observar deste fator é que todos os genótipos tratados com manitol apresentaram os maiores valores. Isto sugere que o CH e a MSPA foram as variáveis mais influenciadas negativamente com o estresse com manitol (Tabela 3).

Observa-se que o manitol, de uma forma geral, reduziu mais drasticamente a parte aérea, enquanto o NaCl reduziu mais a raiz (Tabela 7). Por isso, todos os genótipos desenvolvidos em solução com manitol apresentaram maiores valores do Fator 2. Assim, como a parte aérea foi mais comprometida e a raiz foi menos alterada em relação ao controle, a razão raiz/parte aérea, de uma forma geral, apresentou valores maiores demonstrando maior desenvolvimento da raiz em relação à parte aérea (Tabela 3).

Tabela 7. Dados fenotípicos de feijão (*Phaseolus vulgaris*) de índice de velocidade de germinação (IVG), plântulas normais (PN), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), comprimento da parte aérea (CH), comprimento da raiz (CR), razão massa seca de raiz/ pela massa seca de parte aérea (MR/PA), razão comprimento de raiz pelo comprimento do hipocótilo (CR/PA) e produto da porcentagem de plântulas normais pelo comprimento da plântula (PN.CP) de genótipos de feijoeiro em diferentes ambientes [Água (0,0 MPa), NaCl (-0,6 MPa), Manitol (-0,6 MPa)].

Cod	Amb.	IVG	PN %	MSPA g	MSR	CH cm	CR	MR/PA	CR/PA	PN.CP
G01	Água	20,63	100	0,11	0,02	8,84	15,00	0,14	1,71	2384,50
G01	NaCl	12,42	79	0,14	0,02	4,19	6,35	0,13	1,52	838,77
G01	Manitol	13,18	35	0,13	0,02	3,46	11,99	0,14	3,47	539,26
G02	Água	21,46	99	0,15	0,01	7,04	12,46	0,09	1,77	1931,01
G02	NaCl	15,61	8	0,17	0,01	3,38	4,46	0,08	1,32	60,27
G02	Manitol	16,54	5	0,15	0,02	3,39	8,18	0,18	2,39	61,30
G03	Água	24,75	100	0,14	0,01	8,30	13,37	0,10	1,61	2166,53
G03	NaCl	23,75	20	0,18	0,02	3,57	4,71	0,09	1,32	166,70
G03	Manitol	22,75	19	0,15	0,02	3,56	10,67	0,11	2,99	275,40
G04	Água	24,33	97	0,14	0,01	7,98	9,68	0,07	1,21	1719,20
G04	NaCl	18,08	54	0,16	0,01	3,69	4,63	0,07	1,26	447,70
G04	Manitol	20,21	46	0,17	0,01	4,08	8,65	0,09	2,12	580,36
G05	Água	21,43	100	0,11	0,01	12,28	14,77	0,12	1,21	2705,25
G05	NaCl	13,34	87	0,14	0,01	5,94	6,90	0,10	1,16	1119,21
G05	Manitol	12,55	61	0,14	0,02	4,95	14,31	0,11	2,91	1183,61
G06	Água	24,00	99	0,12	0,01	12,06	12,90	0,09	1,07	2469,40
G06	NaCl	22,19	96	0,14	0,01	7,11	7,36	0,10	1,04	1387,28
G06	Manitol	23,46	78	0,15	0,02	4,89	11,69	0,11	2,40	1286,93
G07	Água	23,63	97	0,13	0,01	11,26	13,09	0,08	1,16	2361,60
G07	NaCl	19,75	98	0,14	0,01	7,59	6,29	0,08	0,83	1361,09
G07	Manitol	24,25	91	0,14	0,02	4,85	15,66	0,12	3,23	1856,88
G08	Água	24,81	99	0,14	0,02	8,88	13,31	0,11	1,51	2198,01
G08	NaCl	23,49	59	0,16	0,02	3,95	4,97	0,10	1,26	530,99
G08	Manitol	23,08	42	0,16	0,02	3,70	10,40	0,11	2,83	591,94
G09	Água	22,00	99	0,12	0,02	8,36	14,87	0,14	1,79	2301,14
G09	NaCl	13,50	37	0,15	0,02	3,47	4,52	0,12	1,30	295,68
G09	Manitol	13,25	38	0,15	0,03	4,06	14,85	0,17	3,67	717,74
G10	Água	24,13	98	0,14	0,01	8,74	14,43	0,09	1,65	2270,88
G10	NaCl	13,75	29	0,17	0,02	3,76	4,94	0,09	1,33	253,00
G10	Manitol	14,23	58	0,17	0,02	3,97	15,36	0,11	3,87	1122,26
G11	Água	10,47	98	0,14	0,02	8,62	15,40	0,15	1,79	2353,82
G11	NaCl	9,51	77	0,16	0,02	3,91	6,04	0,12	1,55	772,24
G11	Manitol	9,55	37	0,17	0,02	4,01	11,22	0,12	2,82	567,25
G12	Água	24,38	100	0,15	0,01	8,81	14,47	0,08	1,65	2327,50
G12	NaCl	21,08	69	0,17	0,01	4,53	5,49	0,07	1,22	692,11

continua...

continuação...

G12	Manitol	20,50	52	0,17	0,02	4,67	10,03	0,09	2,15	765,53
G13	Água	23,46	99	0,14	0,01	7,88	12,99	0,08	1,65	2063,21
G13	NaCl	22,08	84	0,16	0,01	4,76	5,37	0,09	1,13	852,88
G13	Manitol	18,75	72	0,14	0,02	4,42	11,27	0,12	2,54	1130,57
G14	Água	24,13	100	0,15	0,02	7,29	13,50	0,11	1,86	2078,75
G14	NaCl	13,46	42	0,16	0,02	3,61	5,25	0,09	1,46	382,79
G14	Manitol	14,00	21	0,16	0,01	3,35	9,78	0,09	2,94	276,10
G15	Água	23,75	100	0,12	0,01	8,60	14,18	0,09	1,65	2277,75
G15	NaCl	19,23	30	0,13	0,01	3,55	6,13	0,09	1,75	292,60
G15	Manitol	19,13	39	0,14	0,02	3,62	11,73	0,11	3,24	599,79
G16	Água	24,38	100	0,14	0,01	7,67	8,84	0,06	1,16	1650,50
G16	NaCl	13,01	84	0,16	0,01	4,93	4,66	0,09	0,95	805,54
G16	Manitol	13,50	71	0,15	0,01	4,74	7,48	0,10	1,58	872,49
G17	Água	24,25	100	0,10	0,01	11,52	13,16	0,12	1,14	2467,75
G17	NaCl	21,75	96	0,11	0,01	8,96	8,08	0,11	0,91	1637,81
G17	Manitol	23,18	97	0,12	0,01	6,44	12,83	0,12	2,00	1868,61
G18	Água	24,63	99	0,16	0,01	7,42	10,71	0,08	1,46	1794,30
G18	NaCl	22,68	70	0,17	0,02	4,02	5,38	0,09	1,34	659,50
G18	Manitol	22,75	37	0,17	0,02	3,95	7,52	0,09	1,90	431,92
G19	Água	21,25	100	0,10	0,01	9,72	15,53	0,12	1,61	2524,75
G19	NaCl	15,87	66	0,11	0,01	3,57	6,52	0,11	1,84	668,07
G19	Manitol	16,52	68	0,12	0,02	3,88	12,02	0,13	3,10	1081,14
G20	Água	24,75	100	0,16	0,02	6,97	14,88	0,11	2,14	2184,50
G20	NaCl	23,63	37	0,20	0,02	3,80	5,47	0,10	1,44	347,95
G20	Manitol	23,27	58	0,19	0,02	4,57	10,76	0,12	2,36	887,94
G21	Água	24,21	98	0,16	0,02	10,46	13,24	0,12	1,27	2322,20
G21	NaCl	21,00	88	0,18	0,02	5,27	6,40	0,10	1,22	1026,05
G21	Manitol	22,63	79	0,18	0,02	4,93	12,80	0,13	2,60	1397,36
G22	Água	24,38	92	0,15	0,01	6,56	10,85	0,07	1,66	1602,65
G22	NaCl	17,96	79	0,17	0,01	4,29	4,82	0,08	1,13	717,84
G22	Manitol	16,25	38	0,17	0,01	3,92	8,99	0,08	2,30	491,69
G23	Água	22,88	100	0,16	0,01	7,77	10,47	0,05	1,35	1823,50
G23	NaCl	18,67	93	0,17	0,03	5,02	5,63	0,18	1,13	992,72
G23	Manitol	15,00	77	0,18	0,02	5,03	12,84	0,10	2,56	1379,26
G24	Água	22,13	100	0,14	0,02	12,71	11,49	0,11	0,92	2419,75
G24	NaCl	17,04	100	0,14	0,01	6,95	6,98	0,10	1,01	1393,25
G24	Manitol	21,21	58	0,16	0,02	4,47	9,98	0,10	2,25	838,41
G25	Água	24,88	100	0,11	0,01	10,85	11,35	0,11	1,05	2220,50
G25	NaCl	24,06	98	0,13	0,01	7,37	7,58	0,11	1,03	1463,74
G25	Manitol	24,38	99	0,13	0,02	5,17	16,56	0,15	3,20	2152,08
G26	Água	24,13	100	0,12	0,01	11,35	12,56	0,09	1,11	2390,75
G26	NaCl	21,55	99	0,15	0,01	5,85	6,99	0,08	1,20	1270,37
G26	Manitol	19,79	74	0,16	0,01	4,49	11,34	0,09	2,53	1165,30
G27	Água	21,83	100	0,12	0,01	11,31	16,16	0,10	1,44	2746,25

continua...

continuação...

G27	NaCl	16,46	100	0,13	0,02	7,06	8,62	0,12	1,22	1567,25
G27	Manitol	14,98	100	0,15	0,02	5,53	16,57	0,15	3,01	2209,25
G28	Água	23,19	100	0,16	0,01	10,83	10,98	0,09	1,01	2180,75
G28	NaCl	16,63	100	0,16	0,02	8,61	6,54	0,11	0,76	1514,50
G28	Manitol	14,92	97	0,17	0,02	5,75	14,32	0,14	2,49	1945,90
G29	Água	23,50	100	0,14	0,01	10,66	14,93	0,11	1,42	2559,00
G29	NaCl	20,25	99	0,15	0,02	6,48	7,78	0,10	1,20	1411,17
G29	Manitol	17,38	37	0,17	0,02	3,61	12,10	0,13	3,37	574,87
G30	Água	23,13	99	0,15	0,02	8,99	14,18	0,11	1,58	2295,69
G30	NaCl	17,75	58	0,14	0,02	3,72	5,47	0,12	1,47	524,32
G30	Manitol	20,71	23	0,17	0,03	3,42	10,58	0,15	3,15	320,40
G31	Água	21,00	100	0,14	0,02	9,43	14,44	0,16	1,54	2387,50
G31	NaCl	12,88	36	0,18	0,02	3,47	5,09	0,10	1,47	308,46
G31	Manitol	13,38	10	0,16	0,02	3,19	8,44	0,13	2,64	118,00
G32	Água	24,13	98	0,17	0,01	8,16	12,66	0,09	1,56	2042,16
G32	NaCl	18,38	90	0,19	0,02	4,03	5,62	0,09	1,41	866,09
G32	Manitol	17,13	34	0,18	0,02	3,81	11,95	0,13	3,13	525,70
G33	Água	21,58	100	0,16	0,02	7,85	13,30	0,11	1,71	2114,50
G33	NaCl	14,58	80	0,16	0,02	4,42	5,28	0,10	1,20	776,15
G33	Manitol	14,75	38	0,18	0,02	4,20	10,31	0,11	2,46	547,30
G34	Água	23,38	98	0,15	0,02	10,54	15,25	0,13	1,45	2525,99
G34	NaCl	19,75	98	0,17	0,02	6,21	8,55	0,10	1,38	1446,19
G34	Manitol	16,25	82	0,18	0,03	4,51	17,30	0,15	3,85	1786,12

As correlações genéticas *via* modelo misto (ambiente fixo, genótipos e interação genótipo x ambientes aleatórios) variaram entre 0,49 - 0,80. Para o Fator 1 foi observado que os ambientes em condições de estresse com NaCl e manitol foram os mais correlacionados, enquanto para os Fatores 2 e 3 as correlações foram semelhantes em todos os ambientes (Tabela 8).

Tabela 8. Correlação genética entre os ambientes (Água, NaCl e Manitol) para os três fatores: capacidade germinativa [F1(CG)], razão [F2(R)] e massa [F3(M)] de 34 genótipos de *Phaseolus vulgaris*.

F1			
	Água	NaCl	Manitol
Água	1,00	0,6	0,56
NaCl	0,6	1,00	0,80
Manitol	0,56	0,8	1,00
F2			
	Água	NaCl	Manitol
Água	1,00	0,49	0,56
NaCl	0,49	1,00	0,55
Manitol	0,56	0,55	1,00
F3			
	Água	NaCl	Manitol
Água	1,00	0,72	0,73
NaCl	0,72	1,00	0,77
Manitol	0,73	0,77	1,00

A "capacidade germinativa" (Fator1) foi o fator mais importante para melhorar a tolerância dos genótipos de feijoeiro comum ao estresse osmótico. Além disso, o Fator 1 apresenta alta herdabilidade, ou seja, há grande probabilidade dessa característica ser herdada pelas progênes. A herdabilidade do Fator 1 foi alta para os três ambientes avaliados, em geral, acima de 90%, mostrando grande possibilidade de transmissão de características para as gerações futuras (Tabela 9).

Tabela 9 - Estimativas dos valores genéticos, relacionados aos três fatores: capacidade germinativa [F1(CG)], razão [F2(R)] e massa [F3(M)], de genótipos de feijoeiro, para três ambientes (Água, NaCl e Manitol - $\mu_j + g_i + ga_{ij}$) e para o ambiente médio (AM) não se capitalizando a interação genótipo x ambiente ($\mu + g_i$).

Genótipos	F1(CG)				F2(R)				F3(M)			
	Água	NaCl	Manitol	AM	Água	NaCl	Manitol	AM	Água	NaCl	Manitol	AM
G1	10,86	4,24	2,83	5,99	4,52	4,06	7,70	5,11	0,91	1,05	0,38	0,82
G2	8,12	0,00	0,83	3,44	2,88	2,22	7,12	3,99	1,71	1,62	1,36	1,58
G3	9,50	0,79	1,95	4,37	2,59	1,54	5,11	3,17	1,79	2,02	1,19	1,69
G4	8,33	2,15	2,47	4,57	0,29	0,59	3,35	1,79	1,55	1,70	1,55	1,62
G5	12,63	5,56	5,07	7,50	3,22	2,44	6,35	3,93	1,14	1,28	0,80	1,11
G6	11,94	7,17	5,76	7,95	1,49	1,31	4,24	2,56	1,47	1,76	1,48	1,59
G7	11,24	6,93	7,52	8,19	1,44	0,78	5,60	2,78	1,48	1,74	1,26	1,52
G8	9,92	2,98	2,85	5,37	2,72	1,58	5,02	3,19	1,92	2,07	1,59	1,87
G9	10,45	1,71	3,31	5,29	4,72	3,94	9,46	5,61	1,24	1,42	1,12	1,29

continua...

G10	9,83	0,98	3,69	5,01	2,60	2,63	7,32	4,08	1,71	1,81	1,45	1,67
G11	9,65	3,20	2,07	5,13	6,19	4,55	7,27	5,58	1,72	1,92	1,45	1,71
G12	9,87	3,38	3,38	5,62	1,80	0,73	3,79	2,36	2,00	2,18	1,85	2,01
G13	9,28	4,42	5,13	6,24	1,75	1,07	4,96	2,76	1,46	1,87	1,16	1,52
G14	8,91	1,58	1,06	4,17	3,27	2,66	5,36	3,73	1,63	1,55	0,98	1,42
G15	10,28	2,13	3,07	5,29	2,40	1,99	5,55	3,36	0,76	0,61	0,35	0,64
G16	8,06	3,92	4,01	5,43	0,00	1,34	3,59	1,98	1,55	1,79	1,34	1,58
G17	12,37	8,92	8,69	9,40	2,20	1,31	4,02	2,70	0,89	1,02	0,72	0,93
G18	7,98	3,06	1,99	4,59	1,17	1,34	3,29	2,22	2,29	2,56	2,11	2,31
G19	11,85	4,05	5,06	6,84	3,56	3,06	6,31	4,18	0,23	0,24	0,00	0,24
G20	8,89	1,11	3,43	4,71	3,68	2,21	5,45	3,75	2,79	3,29	2,95	2,97
G21	10,25	4,53	5,32	6,60	3,22	2,37	5,98	3,81	3,11	3,32	2,97	3,09
G22	7,31	3,20	1,96	4,44	1,25	0,86	3,75	2,24	1,80	2,09	1,47	1,80
G23	8,13	4,69	4,71	5,87	0,94	4,75	5,71	3,76	2,44	3,36	2,56	2,76
G24	11,50	6,80	4,03	7,23	2,19	1,70	4,22	2,85	1,95	1,90	1,61	1,83
G25	11,36	7,70	8,70	8,77	1,85	1,68	6,39	3,35	1,29	1,66	1,17	1,41
G26	11,45	6,01	4,82	7,22	1,42	0,97	4,11	2,41	1,57	1,98	1,50	1,70
G27	12,39	7,56	8,06	8,85	3,31	3,15	7,95	4,59	1,46	1,67	1,58	1,59
G28	10,05	7,06	7,01	7,74	1,94	2,39	6,85	3,70	2,71	2,94	2,60	2,73
G29	11,18	6,52	2,40	6,60	3,05	2,21	6,90	3,97	2,07	2,22	1,75	2,02
G30	9,90	3,09	1,41	4,98	3,51	3,03	7,43	4,47	2,04	1,78	1,95	1,93
G31	10,39	0,83	0,46	4,21	5,22	3,40	6,61	4,82	2,15	2,16	1,51	1,94
G32	8,56	3,39	1,90	4,83	2,55	2,11	7,06	3,85	2,75	2,96	2,48	2,70
G33	8,79	3,49	2,08	4,97	3,35	2,41	5,61	3,75	2,33	2,34	2,00	2,22
G34	11,13	6,20	5,75	7,45	4,46	3,19	9,23	5,27	2,75	2,93	2,71	2,77
Média geral	10,07	4,10	3,91	6,02	2,67	2,22	5,84	3,58	1,78	1,97	1,56	1,77
CVg/CVe	2,16	3,51	2,78	2,32	1,84	0,40	1,76	1,26	1,25	0,95	1,09	1,00
$h_{\bar{g}}$	0,95	0,98	0,97	0,82	0,93	0,39	0,93	0,65	0,86	0,78	0,83	0,77
$\hat{r}_{\bar{g}g}$	0,97	0,99	0,98	0,90	0,97	0,62	0,96	0,80	0,93	0,89	0,91	0,88
\hat{r}_{gloc}	---	---	---	0,66	---	---	---	0,61	---	---	---	0,89

Coeficiente de variação relativa (CVg/CVe), herdabilidade média ($h_{\bar{g}}$), acurácia seletiva ($\hat{r}_{\bar{g}g}$) e correlação dos genótipos através dos ambientes (\hat{r}_{gloc}).

O \hat{r}_{gloc} demonstra a relação entre os ambientes (RESENDE, 2002), e observa-se que existe uma relação acima de 0,6 entre os ambientes para os três fatores estudados. Desta maneira, os genótipos apresentaram comportamentos similares nos três ambientes e para os três fatores criados (Tabela 9).

A “capacidade germinativa” (Fator 1) foi a característica que apresentou as maiores relações CVg/CVe, que significa que a variação genotípica foi maior que a variação ambiental. Desta maneira, existe uma maior possibilidade de seleção aliado com as altas herdabilidades que esta característica apresenta. O Fator 1 é a

principal característica que o melhorista procura na busca de genótipos mais tolerantes aos estresses osmóticos (Tabela 9).

As acurácias do experimento demonstram que existiu um forte controle experimental, e que a maioria das modificações existentes entre os genótipos foi originária das variações genéticas e não ambientais (Tabela 9).

Os genótipos foram selecionados para os maiores valores dos Fatores 1 e 3, enquanto para o Fator 2 foram selecionados os genótipos com os menores valores. Os valores utilizados foram as médias harmônicas da performance relativa dos valores genéticos (MHPRVG), que é importante por considerar além das médias genéticas, a adaptabilidade e a estabilidade dos genótipos nos três ambientes (RESENDE, 2004).

Com a utilização da metodologia MHPRVG, selecionou-se os genótipos: G07 (CNFC 15462), G06 (CNFC 15460), G17 (CNFC 15630), G25(CAPIXABA PRECOCE), G26 (CNFP 15290), G28 (CNFP 15302) e G27 (CNFP 15292). Estes genótipos apresentam alta tolerância aos estresses osmóticos e são promissores parentais a serem utilizados em programas de melhoramento que visem o desenvolvimento de genótipos de feijoeiro mais tolerantes aos estresses osmóticos.

Os valores de MHPRVG para os três fatores criados são importantes para a seleção dos genótipos, por levar em consideração a variação genética presente entre os materiais. Porém, o Fator 1 (“capacidade germinativa”), foi o que mais contribuiu para seleção de genótipos promissores. O Fator 1 isolado permitiu a seleção de seis dos oitos genótipos selecionados, levando em consideração os três fatores criados (Tabela 10).

Tabela10 – Valores de estabilidade e adaptabilidade estimados pela MHPRVG dos valores genéticos de feijoeiro para cada fator isolado e a soma de *ranks* para os fatores capacidade germinativa [F1(CG)], razão [F2(R)] e massa [F3(M)] de plântulas de feijão (*Phaseolus vulgaris*).

Genótipos	¹ F1(CG)	F2(R)	F3(M)	Soma de <i>ranks</i>
G1	0,92	1,58	0,38	362
G2	0,00	1,09	0,88	468
G3	0,36	0,83	0,92	409
G4	0,64	<u>0,20</u>	0,91	300
G5	<u>1,30</u>	1,13	0,59	240
G6	<u>1,43</u>	<u>0,62</u>	0,89	<u>111</u>
G7	<u>1,50</u>	<u>0,52</u>	0,84	<u>90</u>
G8	0,80	0,85	1,05	278
G9	0,66	1,72	0,71	434

continua...

continuação...

G10	0,48	1,12	0,94	443
G11	0,71	1,74	0,96	406
G12	0,89	<u>0,50</u>	1,14	209
G13	1,08	0,63	0,83	201
G14	0,40	1,09	0,76	448
G15	0,72	0,91	0,30	313
G16	0,92	<u>0,00</u>	0,88	189
G17	<u>1,74</u>	0,69	0,49	<u>91</u>
G18	0,66	<u>0,53</u>	<u>1,31</u>	287
G19	1,14	1,25	0,00	289
G20	0,50	1,07	<u>1,70</u>	387
G21	1,14	1,09	<u>1,78</u>	226
G22	0,65	<u>0,48</u>	1,00	290
G23	1,02	0,69	<u>1,56</u>	199
G24	1,23	0,77	1,03	<u>174</u>
G25	<u>1,61</u>	0,81	0,77	<u>122</u>
G26	1,26	<u>0,54</u>	0,95	<u>142</u>
G27	<u>1,63</u>	1,34	0,89	<u>187</u>
G28	<u>1,40</u>	0,95	<u>1,56</u>	<u>150</u>
G29	0,95	1,10	1,14	280
G30	0,59	1,31	1,08	432
G31	0,21	1,46	1,08	491
G32	0,68	1,02	<u>1,55</u>	326
G33	0,72	1,09	<u>1,26</u>	318
G34	<u>1,34</u>	1,56	<u>1,58</u>	228

¹Os valores sublinhados foram considerados os selecionados.

O Fator 1 (“capacidade germinativa”) é o fator mais relevante para a seleção de genótipos tolerantes aos estresses osmóticos, pois é a característica que engloba características de vigor das sementes, apresenta altas herdabilidades em todos os ambientes individualmente e de forma conjunta, apresentou os maiores valores de CVg/CVe, demonstrando que esta característica apresenta maior variação genotípica do que a variação ambiental. Todos estes fatores em conjunto facilitam o processo de seleção de genótipos mais tolerantes aos estresses.

4. Conclusão

A grande variabilidade genética encontrada permite a seleção de genótipos de feijoeiro dos grupos comerciais Carioca e Preto com alta qualidade de plântulas desenvolvidas sob estresses osmóticos. A análise de fatores constitui uma técnica eficiente para eliminar a influência da multicolinearidade nas análises e, portanto,

representa uma estratégia interessante a ser utilizada em programas de melhoramento. O fator criado “capacidade germinativa” é o mais interessante a ser buscado pelo processo de melhorando do feijoeiro quando se almeja genótipos mais tolerantes aos estresses osmóticos. Os genótipos que apresentaram as maiores tolerâncias, adaptabilidade e estabilidade quanto aos estresses osmóticos foram: CNFC 15466, CNFC 15462, CNFC 15630, BRS Valente, Capixaba Precoce, CNFP 15290, CNFP 15292 e CNFP 15302. Os genótipos selecionados são interessantes como parentais em programas de melhoramento de feijoeiro para a obtenção de materiais genéticos mais tolerantes aos estresses osmóticos.

5. Referências

AYDIN, A.; KANT, C.; TURAN, M. Humic acid application alleviate salinity stress of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants decreasing membrane leakage. **African Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 7, p. 1073-1086, 2012.

ABDUL -BAKI, A.A.; ANDERSON, J. D. Vigour determination in soybean by multiple criteria. **Crop Science**, v. 13, n. 6, p. 630-633, 1973.

BAYUELO-JIMENEZ, J.S.; JASSO-PLATA, N.; OCHOA, I. Growth and physiological responses of *Phaseolus* species to salinity stress. **International Journal of Agronomy**, v. 2012, p.1-13, 2012.

BEN-GAL, A.; BOROCHOV-NEORI, H.; YERMIYAHU, U.; SHANI, U. Is osmotic potential a more appropriate property than electrical conductivity for evaluating whole-plant response to salinity? **Environmental and experimental botany**, v. 65, n. 2, p. 232-237, 2009.

BOURGAULT, M.; MADRAMOOTOO, C. A.; WEBBER, H. A.; STULINA, G.; HORST, M. G.; SMITH, D. L. Effects of deficit irrigation and salinity stress on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) grown in a controlled environment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 196, n. 4, p. 262-272, 2010.

BOURGAULT, M.; MADRAMOOTOO, C. A.; WEBBER, H. A.; DUTILLEUL, P.; STULINA, G.; HORST, M. G.; SMITH, D. L. Legume Production and Irrigation

Strategies in the Aral Sea Basin: Yield, Yield Components, Water Relations and Crop Development of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and Mungbean (*Vignaradiata* (L.) Wilczek). **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 199, n. 4, p. 241-252, 2013.

BUCKER, W. M., MARTINS FILHO, S., GARCIA, G. O.; CAETANO, S.P., MORAES, W. B. Seleção de genótipos de feijoeiro à seca. **Idesia**, v. 28, n. 2, p. 53-59, 2010.

CALVO-POLANCO, M.; SÁNCHEZ-ROMERA, B.; AROCA, R. Mild Salt Stress Conditions Induce Different Responses in Root Hydraulic Conductivity of *Phaseolus vulgaris* Over-Time. **PloS one**, v. 9, n. 3, p. 1-13, 2014.

CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L.; RIBEIRO, N. D. Agrupamento de cultivares de feijão em presença e em ausência de multicolinearidade. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2409-2418, 2009.

COELHO, D. L. M., AGOSTINI, E. A. T. D., GUABERTO, L. M., MACHADO-NETO, N. B., CUSTÓDIO, C. C. Estresse hídrico com diferentes osmóticos em sementes de feijão e expressão diferencial de proteínas durante a germinação. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 3, p. 491-499, 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, nono levantamento, junho 2014** / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab, 2014.

CRUZ, C. D. GENES-a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3.ed. Viçosa: Ed. UFV, 2004. v.1, 480p.

DEMPSTER, A.P.; LAIRD, N.M.; RUBIN, D.B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. **Journal of the Royal Statistic Society**, v.39, p.1-38, 1977.

EYDURAN, E.; TOPAL, M.; SONMEZ, A. Y. Use of factor scores in multiple regression analysis for estimation of body weight by several body measurements in

brown trouts (*Salmo trutta fario*). **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 12, p. 611-615, 2010.

FAO Statistical Yearbook. **World food and agriculture**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2013.

FERREIRA, A.; CECON, P. R.; CRUZ, C. D.; FERRÃO, R. G.; SILVA, M.; FONSECA, A.; FERRÃO, M. A. G. Prediction of selection gains in *Coffeacaneophora* based on factorial scores. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 4, n. 3, p. 298-304, 2004.

FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. Editora UFLA, -2.ed. rev.ampl. 2011.

FERREIRA, F. M.; NEVES, L. G.; BRUCKNER, C. H.; VIANA, A. P.; CRUZ, C. D., BARELLI, M. A. A. Formação de supercaracteres para seleção de famílias de maracujazeiro amarelo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 2, p. 247-254, 2010.

HARMAN, H. H. **Modern factor analysis**. 3. ed. Chicago: The University of Chicago Press, 1976. 474p.

JIMÉNEZ-BREMONT, J. F.; BECERRA-FLORA, A.; HERNÁNDEZ-LUCERO, E.; RODRÍGUEZ-KESSLER, M.; ACOSTA-GALLEGOS, J. A.; RAMÍREZ-PIMENTEL, J. G. Proline accumulation in two bean cultivars under salt stress and the effect of polyamines and ornithine. **Biologia plantarum**, v. 50, n. 4, p. 763-766, 2006.

KHADRI, M.; TEJERA, N. A.; LLUCH, C. Sodium chloride–ABA interaction in two common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars differing in salinity tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 60, n. 2, p. 211–218, 2007.

LONDERO, P. M. G.; RIBEIRO, N. D.; JOST, E.; MAZIERO, S. M.; CERUTTI, T.; POERSCH, N. L. Genética dos teores de fibras insolúvel e solúvel em grãos de feijão. **Revista Ceres**, v. 56, n. 2, p. 150-155, 2009.

MACHADO, R.; AGUIAR NETTO, A. O.; CAMPECHE, L.; BARROS, A. Efeito da Salinidade em Características Físico-Hídricas em Solos Salino-Sodilizados no Perímetro Irrigado Jabiberi-SE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 1, n. 1, p. 15-19, 2007.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination and seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v. 2, n. 2, p. 176-177, 1962.

MAPA-Ministério da Agricultura Agropecuária E Abastecimento. Perfil do feijão no Brasil. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/feijao/saiba-mais>>. Acesso em: 13 de Julho de 2014.

MOREIRA, R. M. P., FERREIRA, J. M., TAKAHASHI, L. S. A., VASCONCELOS, M. E. C., GEUS, L. C., BOTTI, L. Potencial agrônômico e divergência genética entre genótipos de feijão-vagem de crescimento determinado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, n. 4, sup1, p. 1051-1060, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: J. Wiley, 1981. 504 p.

MULAMBA, N. N.; MOCK, J. J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. **Egyptian Journal of Genetics and Cytology**, v. 7, n. 1, p. 40-51, 1978.

PATTERSON, H.D.; THOMPSON, R. Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. **Biometrika**. v.58, n.3, p. 545-54, 1971.

PIMENTA, J.A. **Relações Hídricas**. In: KERBAUY, G. B. (ed). Fisiologia vegetal. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004, p. 1-39.

PLANS, M.; SIMÓ, J.; CASAÑAS, F.; SABATÉ, J.; RODRIGUEZ-SAONA, L. Characterization of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by infrared spectroscopy: Comparison of MIR, FT-NIR and dispersive NIR using portable and benchtop instruments. **Food Research International**, v. 54, n. 2, p. 1643–1651, 2013.

R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2014. Disponível em: <http://www.R-project.org/>, acessado em 07 de julho de 2014.

RENCHE, A. C. (2002) **Methods of Multivariate Analysis**. A John Wiley & Sons. Inc. Publication.

RESENDE, M.D.V. (2002). **Genética Biométrica e Estatística no Melhoramento de Plantas Perenes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 975.

RESENDE, M.D.V. **Métodos Estatísticos Ótimos na Análise de Experimentos de Campo**.: Embrapa Florestas, Colombo. 2004, 65 p. (Documentos 100)

RIBEIRO, N. D.; LONDERO, P. M. G.; CARGNELUTTI FILHO, A.; JOST, E. Composição de aminoácidos de gerações precoces de feijão obtidas a partir de cruzamentos com parental de alto teor de metionina. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 57-61, 2010.

RIBEIRO, N. D.; MAZIERO, S. M.; PRIGOL, M.; NOGUEIRA, C. W.; ROSA, D. P.; POSSOBOM, M. T. D. F. Mineral concentrations in the embryo and seed coat of common bean cultivars. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 26, n. 1, p. 89-95, 2012.

ROSALES, M. A.; OCAMPO, E.; RODRÍGUEZ-VALENTÍN, R.; OLVERA-CARRILLO, Y.; ACOSTA-GALLEGOS, J.; COVARRUBIAS, A. A. Physiological analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. **Plant physiology and biochemistry**, v. 56, p. 24–34, 2012.

SAEIDI-SAR, S., ABBASPOUR, H., AFSHARI, H., YAGHOUBI, S. R. Effects of ascorbic acid and gibberellin GA₃ on alleviation of salt stress in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 3, p. 667-677, 2013.

SIBOLE, J. V.; MONTERO, E.; CABOT, C.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Relationship between carbon partitioning and Na⁺, Cl⁻ and ABA allocation in fruits of salt-stressed bean. **Journal of Plant Physiology**, v. 157, n. 6, p. 637–642, 2000.

TAIBI, K.; BOUSSAID, M.; ACHIR, M.; TAIBI, F.; BELKHODJA, M. Evaluation of growth response and water relations of two bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.) from Algerian semi-arid regions grown under salt stress. **Genetics and Plant Physiology**, v. 1, n.3–4, pp. 176–185, 2011.

ZILIO, M.; COELHO, C. M. M.; SOUZA, C. A.; SANTOS, J. C. P.; MIQUELLUTI, D. J. Contribuição dos componentes de rendimento na produtividade de genótipos crioulos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 429-438, 2011.

CAPÍTULO V

Diversidade mineralógica e seleção de feijão biofortificado

Diversidade mineralógica e seleção de feijão biofortificado

RESUMO

O feijoeiro é a sexta cultura mais produzida no Brasil e é uma grande fonte de proteínas e minerais na alimentação humana. É possível a seleção de genótipos promissores para a formação de cultivares biofortificados para vários elementos minerais, permitindo melhorar a qualidade nutricional dos grãos. Neste trabalho abordou-se a análise de diversidade da composição mineralógica em diversos genótipos de feijão com o enfoque na seleção de promissores parentais na formação de cultivares biofortificados. Realizou-se a análise da composição mineralógica de fósforo, cálcio, magnésio, ferro, manganês e zinco. Os dados foram analisados utilizando-se o modelo misto univariado em delineamento inteiramente casualizado com três repetições por genótipo. Os resultados demonstraram-se promissores, pois se encontrou alta diversidade genética e possibilidade de seleção de materiais genéticos mais ricos em cálcio, ferro, zinco, potássio, magnésio, manganês e fósforo. Todos os minerais apresentaram altas variabilidade genética e herdabilidade. Os genótipos mais ricos e divergentes geneticamente do grupo comercial carioca foram CNFC 15475 e CNFC 15625, e do grupo comercial preto foram CNFP 15310 e CNFP 15304. A seleção de genótipos biofortificados de linhagens elites dos programas de melhoramento é extremamente benéfica por selecionar genótipos ricos mineralogicamente e que já apresentam características agronômicas desejáveis.

1. Introdução

A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é extremamente importante para a população brasileira, e trata-se da sexta cultura mais produzida no Brasil (CONAB, 2015). Além da importância econômica, o feijão destaca-se nutricionalmente por representar uma importante fonte de proteínas e minerais na alimentação humana (PLANS et al., 2013; PEDROSA et al., 2015).

Grande variabilidade genética é observada nos genótipos de feijoeiro quanto à composição mineralógica dos grãos (CEYHAN; HARMANKAYA; KAHRAMAN, 2014), demonstrando o grande potencial de seleção de genótipos promissores, ou seja, mais ricos em determinado grupo de minerais. Essas diferenças nos teores de minerais estão relacionadas com a fisiologia do feijoeiro, o local de crescimento e as condições ambientais (FERREIRA et al., 2014). Há correlações positivas e significativas nos teores de minerais (KAHRAMAN; ÖNDER, 2013), o que facilita o enriquecimento do feijão por mais de um mineral durante o processo de seleção nos programas de melhoramento genético.

Materiais genéticos superiores podem ser pesquisados com a finalidade de desenvolver linhagens de feijoeiro biofortificadas. Atualmente, é possível aumentar a concentração de todos os minerais, porém os trabalhos enfocam no enriquecimento de Ca, Fe e Zn nas sementes de feijão (RIBEIRO, 2010). Um ponto bastante positivo é que estes compostos apresentam altas herdabilidades e correlações positivas de seus teores (RIBEIRO, 2010; KAHRAMAN; ÖNDER, 2013). Portanto, a seleção de genótipos e a formação de linhagens superiores é eficiente em disponibilizar grãos biofortificados por esses minerais (JOST et al., 2009; ROSA et al., 2010; SILVA et al., 2012). A seleção de genótipos mais ricos nutricionalmente permite melhorar a qualidade nutricional e fornecer uma alimentação diária mais equilibrada à população (RIBEIRO, 2010; GOUVEIA et al., 2014).

Neste trabalho foi abordada a diversidade da composição mineralógica em grãos de 40 genótipos de feijão comum enfocando, principalmente, como estas características podem ser úteis para programas de melhoramento. Os resultados obtidos fornecem informações relevantes quando à diversidade genética e à possibilidade de seleção de genótipos biofortificados.

2. Material e métodos

Os grãos de 40 genótipos de feijão, colhidos em julho de 2013, foram gentilmente cedidos pelo Instituto Capixaba de Pesquisa e Extensão Rural (Incaper)

(Tabela 1). O cultivo foi conduzido em Sooretama- ES, seguindo as recomendações para a cultura.

Tabela 1. Relação dos genótipos utilizados nas análises de composição mineralógica: identificação numérica do genótipo (N), nome do cultivar ou linhagem (Genótipos), e o grupo comercial (GC).

N	Genótipos	GC	N	Nome	GC
1	CNFC 15460	Carioca	21	BRS PONTAL	Carioca
2	CNFC 15625	Carioca	22	CNFP 15310	Preto
3	BRS MG MAJESTOSO	Carioca	23	BRS CAMPEIRO	Preto
4	CNFC 15475	Carioca	24	CNFC 15502	Carioca
5	CNFC 15873	Carioca	25	JALO PRECOCE	Manteigão
6	BRS ESTILO	Carioca	26	CNFC 15874	Carioca
7	CNFC 15480	Carioca	27	BRS RADIANTE	Manteigão
8	CNFC 15513	Carioca	28	CNFP 15359	Preto
9	CNFC 15462	Carioca	29	CNFP 15292	Preto
10	BRS NOTÁVEL	Carioca	30	PÉROLA	Carioca
11	CNFC 15504	Carioca	31	CNFP 15290	Preto
12	CNFP 15361	Preto	32	IPR COLIBRI	Carioca
13	CNFC 15534	Carioca	33	CNFC 15626	Carioca
14	IAC DIPLOMATA	Preto	34	CNFC 15629	Carioca
15	CNFC 15497	Carioca	35	BRS ESPLENDOR	Preto
16	CNFC 15875	Carioca	36	CARIOCA PRECOCE	Carioca
17	CNFC 15630	Carioca	37	CNFC 15289	Carioca
18	IPR 139	Carioca	38	CNFC 15507	Carioca
19	BRS VALENTE	Preto	39	CNFP 15304	Preto
20	CAPIXABA PRECOCE	Preto	40	CNFC 15458	Carioca

A composição mineralógica foi determinada segundo Malavolta et al. (1997), no qual os extratos das amostras foram obtidos por digestão nitroperclórica de 500 mg da massa seca de grãos macerados para cada amostra. O fósforo (P) foi quantificado por colorimetria; cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) por espectrofotometria de absorção atômica e potássio (K), por fotometria de chama.

Os dados obtidos da análise mineralógica foram analisados utilizando-se o modelo misto univariado em delineamento inteiramente casualizado com três

repetições por genótipo, escrito na forma matricial como em [1] e sua solução pode ser obtida pelas equações apresentadas em [2] (RESENDE, 2002).

$$y = Xu + Zg + e \quad [1] \quad \begin{bmatrix} X'X & X'Z \\ Z'X & Z'Z + I \left(\frac{\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_g^2} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'y \\ Z'y \end{bmatrix} \quad [2],$$

em que: y é o vetor que possui a variável a ser analisada; u é a média geral fixa; g é o vetor de efeitos genotípicos assumidos como aleatórios; e é o vetor de erros aleatórios; X é a matriz de incidência para os efeitos fixos; Z é a matriz de incidência para os efeitos genotípicos. Para a solução do sistema de equações de modelos mistos apresentado em [2] utilizou-se as estimativas dos componentes de variância do erro ($\hat{\sigma}_e^2$) [3] e genotípico ($\hat{\sigma}_g^2$) [4], obtidas pelo método de máxima verossimilhança restrita (REML) (PATTERSON; THOMPSON, 1971) via algoritmo “Expectation Maximization” (EM) (DEMPSTER et al., 1977).

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{y'y - \hat{u}'X'y - \hat{g}'Z'y}{N - p(X)} \quad [3] \quad \hat{\sigma}_g^2 = \frac{\hat{g}'\hat{g} + \hat{\sigma}_e^2 \text{tr}(C^{22})}{N_g} \quad [4] \quad \hat{\sigma}_f^2 = \hat{\sigma}_g^2 + \hat{\sigma}_e^2 \quad [5],$$

em que: $\hat{\sigma}_e^2$ é a estimativa do componente de variância residual; $\hat{\sigma}_g^2$ é a estimativa do componente de variância genotípico; N é o número de observações; $p(X)$ é o posto da matriz X ; N_g é o número de colunas da matriz Z ; tr é o operador de traço matricial e C^{22} é uma sub-matriz da inversa da matriz dos coeficientes das equações de modelos mistos.

As estimativas dos parâmetros genéticos para o modelo misto são calculadas seguindo o procedimento a seguir:

$$\begin{bmatrix} X'X & X'Z \\ Z'X & Z'Z + I \left(\frac{\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_g^2} \right) \end{bmatrix}^{-1} = C^{-1} = \begin{bmatrix} C^{11} & C^{12} \\ C^{21} & C^{22} \end{bmatrix} \quad [6], \text{ em que:}$$

C^{-1} é a matriz dos coeficientes das equações de modelos mistos.

As estimativas dos parâmetros genéticos para o modelo misto são calculadas seguindo o procedimento a seguir:

$$\hat{h}_g^2 = \frac{\hat{\sigma}_g^2}{\hat{\sigma}_f^2} \quad [7] \quad \hat{r}_{gg} = \left(\frac{1}{1 + \frac{\hat{\sigma}_e^2}{r\hat{\sigma}_g^2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [9] \quad CV_e(\%) = \frac{\sqrt{\hat{\sigma}_e^2}}{\hat{\mu}} 100 \quad [11]$$

$$\hat{h}_{mc}^2 = \left(\frac{1}{1 + \frac{\hat{\sigma}_e^2}{r\hat{\sigma}_g^2}} \right) \quad [8] \quad CV_g(\%) = \frac{\sqrt{\hat{\sigma}_g^2}}{\hat{\mu}} 100 \quad [10] \quad CV_r = \frac{\sqrt{\hat{\sigma}_g^2}}{\sqrt{\hat{\sigma}_e^2}} \quad [12],$$

em que: $\hat{\sigma}_e^2$ é a estimativa da variância residual; $\hat{\sigma}_g^2$ é a estimativa da variância genotípica; $\hat{\sigma}_f^2$ é a estimativa da variância fenotípica; \hat{h}_g^2 é a herdabilidade individual no sentido amplo; r é o número de repetições utilizadas; \hat{h}_g^2 é a herdabilidade da média de genótipos; \hat{r}_{gg} é a acurácia da seleção de genótipos; $\hat{\mu}$ é a estimativa da média geral; $CV_g(\%)$ é o coeficiente de variação genotípico; $CV_e(\%)$ é o coeficiente de variação experimental e CV_r é coeficiente de variação relativa.

As médias genéticas foram ranqueadas e selecionadas pela metodologia de índice de soma de ranks de Mulamba e Mock (1978), em que os valores genotípicos são classificados para cada característica e a soma dos *ranks* de cada genótipo para todas as características é apresentada como resultado final.

A distância genética utilizada para demonstrar a divergência genética entre os genótipos foi a Mahalanobis, e adicionalmente foi realizada a análise de componentes principais para demonstração gráfica da dispersão das médias genéticas. Todas as análises estatísticas e os gráficos foram feitos com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2014).

3. Resultados e discussão

A dispersão dos dados fenotípicos está representada pelos gráficos de boxplot. Pode-se observar que a amplitude de concentração dos minerais nos genótipos foi de: P (44,4 a 61,9 mg 100 g⁻¹), Mg (144,4 a 205,5 mg 100 g⁻¹), Ca (0,8 a 3,2 g kg⁻¹), K (15,6 a 21,1 g kg⁻¹), Mn (1,0 a 2,8 mg 100 g⁻¹), Fe (5,82 a 13,6 mg 100 g⁻¹) e Zn (2,8 a 4,6 mg 100 g⁻¹) (Figura 1).

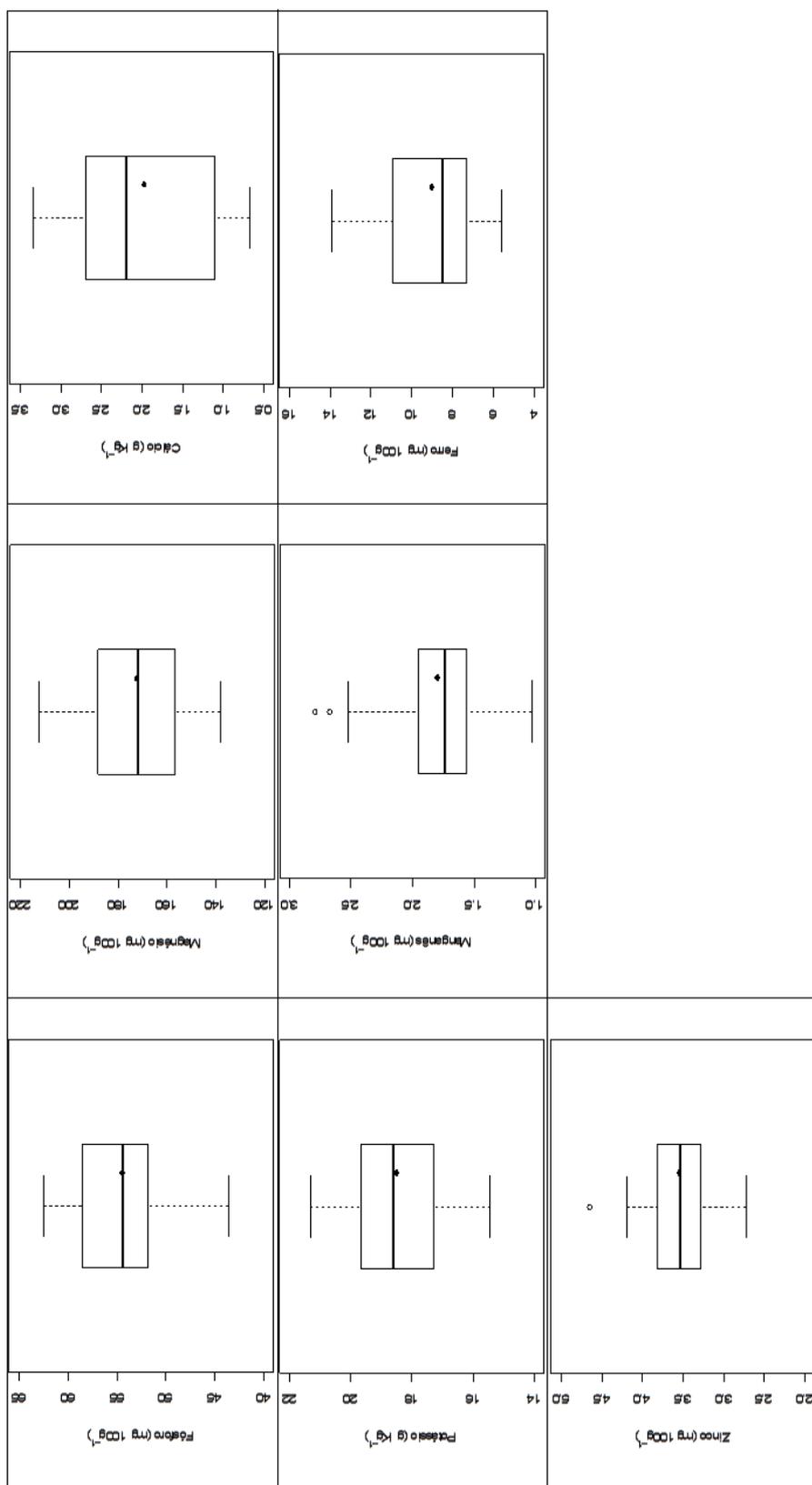


Figura 1. Boxplot dos dados fenotípicos da composição de fósforo, magnésio, cálcio, potássio, manganês, ferro e zinco de 40 genótipos de feijão.

Os valores de potássio e fósforo encontrados neste estudo foram maiores do que os encontrados por Pereira et al. (2011), enquanto as concentrações de magnésio foram menores. Com relação ao manganês, a concentração média encontrada foi menor do que a encontrada por Mesquita et al. (2007), porém alguns genótipos deste estudo apresentaram valores similares aos genótipos com as mais altas concentrações.

Os valores médios de zinco foram similares aos encontrados por Pereira et al. (2011) e Silva et al. (2013), no entanto, estes valores foram superiores à média encontrada por Ribeiro et al. (2008). As possibilidades de aumentar a concentração de zinco em genótipos de feijão são altas, pois existe uma grande variação genética que pode ser explorada, pois o Cv_r foi acima de 1,0 neste estudo (Tabela 2), assim como para Ribeiro et al. (2008). A razão Cv_r acima de uma unidade demonstra que a variação genotípica é maior que a variação ambiental, possibilitando a seleção de genótipos com maiores concentrações de zinco nos grãos.

Os teores médios de ferro encontrados neste trabalho (Tabela 2) apresentaram valores similares aos encontrados em outros trabalhos (MESQUITA et al.; 2007, PEREIRA et al., 2011; RIBEIRO et al., 2014a). Entretanto, observa-se que a diversidade genética de concentração de ferro permite aumentar muito a concentração deste mineral nos grãos. Ribeiro et al. (2012) demonstraram que a média obtida foi maior do que o maior teor encontrado neste estudo, e que o melhoramento pelo método SSD (single seed descendent) permitiu ganhos superiores aos valores aqui obtidos (RIBEIRO et al., 2014b).

Todos os minerais estudados apresentaram herdabilidade média acima de 80% (Tabela 2), o que sugere uma grande possibilidade de se obter sucesso na seleção de genótipos superiores para o teor de minerais e reflete em maiores ganhos por seleção (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Normalmente, características com alta herdabilidade são controladas por um número menor de genes do que características que possuem baixa herdabilidade (FLINT-GARCIA et al., 2005), facilitando a transmissão das características para a progênie.

Os teores de cálcio foram superiores aos encontrados por Pereira et al. (2011), Silva et al. (2013) e Ribeiro et al. (2014a), e similares aos encontrados por Mesquita et al. (2007). O cálcio é um mineral que apresenta a maior concentração no tegumento dos grãos (RIBEIRO et al., 2012) e apresenta efeito materno (JOST et al.,

2009), por isso a seleção de genótipos de feijoeiro ricos neste material é dificultada, pois o cruzamento influencia muito a composição de cálcio nos grãos.

Os coeficientes de variação do experimento foram baixos para a maioria dos minerais, sendo que apenas o cálcio apresentou maior coeficiente de variação residual (22,24%), sugerindo a ocorrência de contribuição significativa do efeito ambiental, e não apenas da variação genética (Tabela 2). No entanto, as razões CV foram acima de 1, o que indica que a variação genética foi maior que a variação ambiental, ainda que a composição mineralógica em grãos de feijão seja influenciada pela interação genótipo x ambiente. Além disso, quanto maior o valor da relação de CV_r (acima de 1) melhor é para os programas de melhoramento, pois, isto indica que há uma alta variabilidade e grande possibilidade de seleção de materiais promissores para esta característica.

Tabela 2. Estimativa dos parâmetros genéticos e não genéticos de 40 genótipos de feijão (*P. vulgaris*), em relação à composição de cálcio (Ca), potássio (K), fósforo (P), magnésio (Mg), manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn).

Variáveis	Ca	K	P	Mg	Mn	Fe	Zn
	(g Kg ⁻¹)		(mg 100g ⁻¹)				
$\hat{\sigma}_g^2$	0,586	2,074	23,633	325,271	0,139	5,186	0,168
$\hat{\sigma}_e^2$	0,192	0,404	5,532	208,595	0,005	1,019	0,022
$\hat{\sigma}_f^2$	0,778	2,478	29,165	533,866	0,144	6,205	0,189
\hat{h}_g^2	0,902	0,939	0,928	0,824	0,989	0,939	0,959
CVg (%)	38,863	7,786	8,935	10,454	20,789	25,166	11,574
CVe (%)	22,243	3,435	4,323	8,372	3,885	11,158	4,136
CV _r	1,747	2,267	2,067	1,249	5,352	2,255	2,798
Acurácia	0,950	0,969	0,963	0,908	0,994	0,969	0,979
X _o	1,970	18,498	54,408	172,516	1,794	9,049	3,541
X _s	2,967	20,445	60,826	198,935	2,377	12,702	4,137
GS (%)	45,656	9,889	10,944	12,617	32,107	37,894	16,130
LRT	74,6 **	105,1 **	93,8 **	42,9 **	227,2 **	104,5 **	132,7 **

$\hat{\sigma}_g^2$: estimativa do componente de variância genotípico, $\hat{\sigma}_e^2$: estimativa do componente de variância experimental, $\hat{\sigma}_f^2$: estimativa do componente de variância fenotípico, \hat{h}_g^2 : estimativa da herdabilidade média, CVg (%): estimativa do coeficiente de variação genético, CVe (%): estimativa do coeficiente de variação experimental, CV_r: estimativa do coeficiente de variação relativa, \hat{r}_{gg} : estimativa da acurácia seletiva, X_o: média original, X_s: – média dos selecionados (8), GS (%) – ganho por seleção, e LRT: teste de razão de verossimilhança.

Todos minerais apresentaram altos ganhos de seleção para intensidade de seleção de 20%, e em ordem decrescente os elementos foram: cálcio > ferro >

manganês > zinco > magnésio > fósforo > potássio. Desta forma, o cálcio foi o mineral que mais se destacou, com a possibilidade de ganho de mais de 45% (Tabela 2).

Os resultados encontrados para herdabilidade, variação genética, razão CV_r , ganho de seleção, e na alta acurácia deste experimento ($>0,90$) reforçam a possibilidade de praticar eficiente seleção de materiais genéticos biofortificados (Tabela 2).

Os elementos minerais, entre si, apresentaram correlações genéticas positivas, em sua maioria, à exceção de fósforo com manganês; e ferro com magnésio, cálcio e manganês (Figura 2). As correlações positivas entre os elementos favorecem a seleção de genótipos ricos em mais de um mineral durante o processo de melhoramento (KAHRAMAN; ÖNDER, 2013).

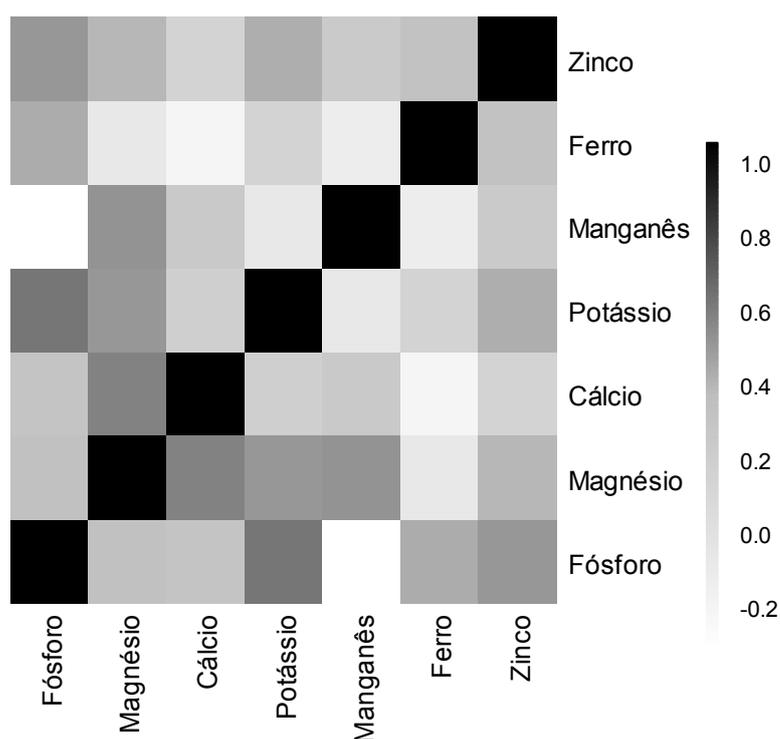


Figura 2. Heatmap obtido a partir da matriz de correlação genética entre as concentrações de fósforo, magnésio, cálcio, potássio, manganês, ferro e zinco.

Os genótipos que apresentaram as maiores concentrações de cada mineral foram: CNFC 15460, CNFC 15475 e CNFC 15873 (P); CNFC 15475, CNFP 15310 e Carioca precoce (Mg); CNFC 15460 e CNFC 15513 (Ca); CNFC 15504, CNFP 15310 e CNFC 15629 (K); CNFC 15513, Carioca precoce e CNFP 15304 (Mn); CNFC 15475, CNFP 15292 e CNFP 15290 (Fe); CNFC 15873 e CNFP 15304 (Zn)

(Tabela 3). Todos estes genótipos são promissores para formação de progênes biofortificadas por meio de cruzamentos direcionados para cada mineral.

O processo de melhoramento genético é bastante minucioso, e o pesquisador pode utilizar diferentes estratégias. Neste trabalho, o genótipo selecionado para os oito minerais é diferente de quando se procede a seleção apenas para cálcio, zinco e ferro. Desta maneira, quando o objetivo for selecionar materiais ricos em todos os minerais, os genótipos mais promissores são CNFC 15460 (1), CNFC 15625 (2), CNFC 15475 (4), CNFC 15504 (11), CNFP 15310 (22), CNFC 15629 (34), CNFC 15507(38) e CNFP 15304 (39) (Tabela 3).

A seleção de genótipos com enfoque apenas nos minerais Fe, Ca e Zn, os genitores mais indicados são CNFC 15475 (4) e CNFP 15304(39). Ressalta-se que o genótipo CNFC 15475 foi o primeiro selecionado pelo índice de soma de *ranks*, principalmente porque este genótipo apresentou as concentrações mais altas de minerais, à exceção do cálcio e manganês. Durante o processo de melhoramento, há uma alta probabilidade de gerar novas linhagens biofortificadas a partir do cruzamento desses genitores indicados.

Tabela 3. Valores genotípicos de fósforo (P), magnésio (Mg), cálcio (Ca), potássio (K), manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn) e a soma de ranks de Mulamba e Mock (1978) de 40 genótipos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).

Genótipo	P	Mg	Ca	K	Mn	Fe	Zn	Soma de ranks ¹
CNFC 15460	61,9	180,4	3,1	19,3	1,9	8,5	3,8	<u>82</u>
CNFC 15625	56,7	184,3	2,8	17,4	2,0	9,1	3,9	<u>93</u>
BRSMG MAJESTOSO	53,8	175,4	1,5	19,3	1,8	10,2	4,1	121
CNFC 15475	61,6	198,1	2,5	20,4	1,8	12,9	4,0	<u>48</u>
CNFC 15873	61,7	173,3	2,2	19,1	1,6	9,7	4,2	103
BRS ESTILO	57,2	192,7	2,7	16,5	2,2	11,2	3,7	97
CNFC 15480	54,2	176,2	2,7	18,9	1,6	6,2	3,3	161
CNFC 15513	45,9	188,8	3,2	17,2	2,5	5,8	3,1	158
CNFC 15462	50,3	166,0	2,8	18,2	1,6	6,2	2,8	195
BRS NOTÁVEL	55,1	167,0	2,3	19,9	1,6	9,9	3,3	143
CNFC 15504	59,5	185,2	2,1	20,5	1,9	11,0	3,5	<u>85</u>
CNFP 15361	47,2	181,	2,8	17,8	2,2	7,3	4,1	124
CNFC 15534	52,4	169,2	2,4	18,4	1,2	7,9	3,1	189
IAC DIPLOMATA	54,1	195,0	2,1	18,5	1,8	7,2	4,0	129
CNFC 15497	58,5	176,4	2,3	20,3	1,5	8,2	3,7	117
CNFC 15875	54,9	188,8	2,4	19,4	1,7	8,7	3,1	131
CNFC 15630	53,2	186,0	1,6	19,8	2,3	7,0	3,5	131

continua...

continuação...

IPR 139	57,3	152,1	2,8	17,2	1,0	6,6	3,3	188
BRS VALENTE	50,0	184,6	2,4	17,5	2,3	8,7	3,3	137
CAPIXABA PRECOCE	53,9	156,0	1,7	15,8	1,7	7,6	2,8	212
BRS PONTAL	54,2	149,4	0,9	19,5	1,4	8,1	3,4	191
CNFP 15310	60,2	196,8	1,2	21,1	1,6	8,6	4,1	<u>88</u>
BRS CAMPEIRO	58,0	188,6	2,3	19,6	1,9	7,5	3,6	110
CNFC 15502	47,1	165,4	1,2	18,8	1,9	8,9	3,4	168
JALO PRECOCE	48,8	163,1	1,3	16,7	1,6	12,4	3,2	192
CNFC 15874	52,2	159,3	1,7	17,3	1,7	7,7	3,3	195
BRS RADIANTE	44,4	149,9	1,0	17,0	2	6,4	3,1	227
CNFP 15359	46,7	151	0,9	17,6	2	6,8	3,0	221
CNFP 15292	58,9	168,6	1,2	19,7	1,5	13,1	3,8	120
PÉROLA	47,2	159,8	0,9	15,6	1,7	6,0	3,1	241
CNFP 15290	51,9	152,1	1,1	16,9	1,8	13,6	3,4	177
IPR COLIBRI	55,2	149,6	1	18,2	1,3	8,0	3,7	191
CNFC 15626	52,5	145,9	1	17,4	1,5	12,0	3,6	190
CNFC 15629	59,8	182	2,4	20,5	1,9	11,8	3,4	<u>78</u>
BRS ESPLENDOR	55,8	144,4	0,8	16,8	1,4	12,5	3,6	192
CARIOCA PRECOCE	54,1	205,5	1,8	19	2,7	7,6	3,8	107
CNFC 15289	59,1	164,2	2	18,7	1,7	11,6	3,5	130
CNFC 15507	57,7	188	2,7	20,2	1,8	10,6	3,7	<u>76</u>
CNFP 15304	54,5	170,9	2,8	18,5	2,8	10,2	4,6	<u>81</u>
CNFC 15458	58,4	169,6	2,4	19,5	1,5	8,5	3,9	121

¹ Os valores sublinhados representam os genótipos selecionados pelo Índice de Soma de Ranks (MULAMBA; MOCK, 1978).

Os genótipos mais dissimilares, dentre os 40, foram os CNFP 15304 (39) e CNFP 15361 (12), como pode ser observado no agrupamento de UPGMA (Figura 3) e *heatmap* (Figura 4). A utilização destes dois genótipos como genitores para a formação de populações segregantes em programas de melhoramento genético é bastante interessante. Além disso, o genótipo CNFP 15304 também foi um dos oito genótipos selecionados pelo índice de soma de *ranks*, e destacou-se na dispersão gráfica dos componentes principais (Figura 5).

Os genótipos que apresentaram a maior concentração de cálcio, ferro e zinco foram os CNFC 15475 (4) e CNFP 15304 (39) (Figura 6), destacando-se que esses materiais pertencem a dois grupos comerciais distintos (Carioca e Preto, respectivamente), e que podem ser utilizados como genitores promissores em cruzamentos, com vistas a aumentar as concentrações mineralógicas, por serem materiais que não foram registrados como cultivares.

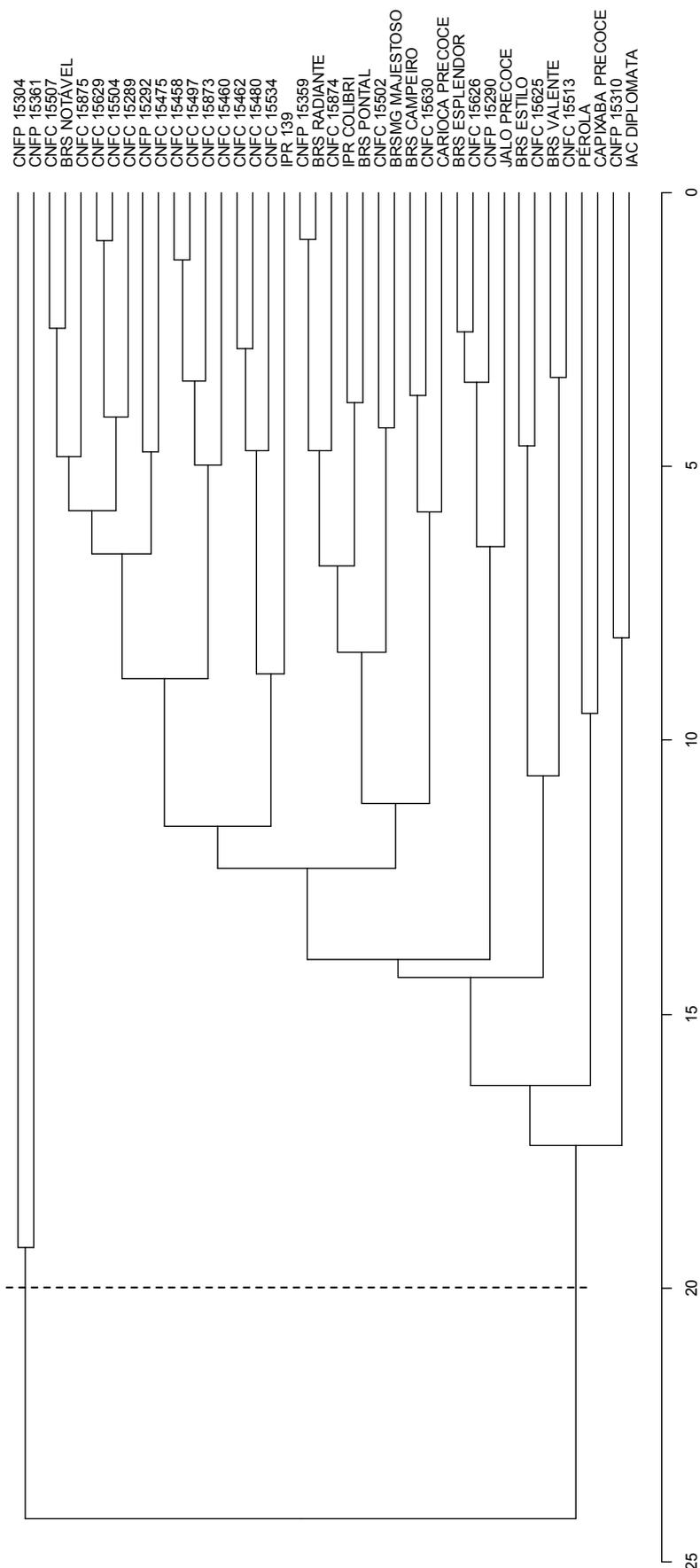


Figura 3. Dendrograma obtido pelo método de agrupamento hierárquico da ligação média entre grupos (UPGMA), a partir da distância generalizada de Mahalanobis entre 40 genótipos de feijão, agrupados a partir das variáveis concentração de fósforo, magnésio, cálcio, potássio, manganês, ferro e zinco.

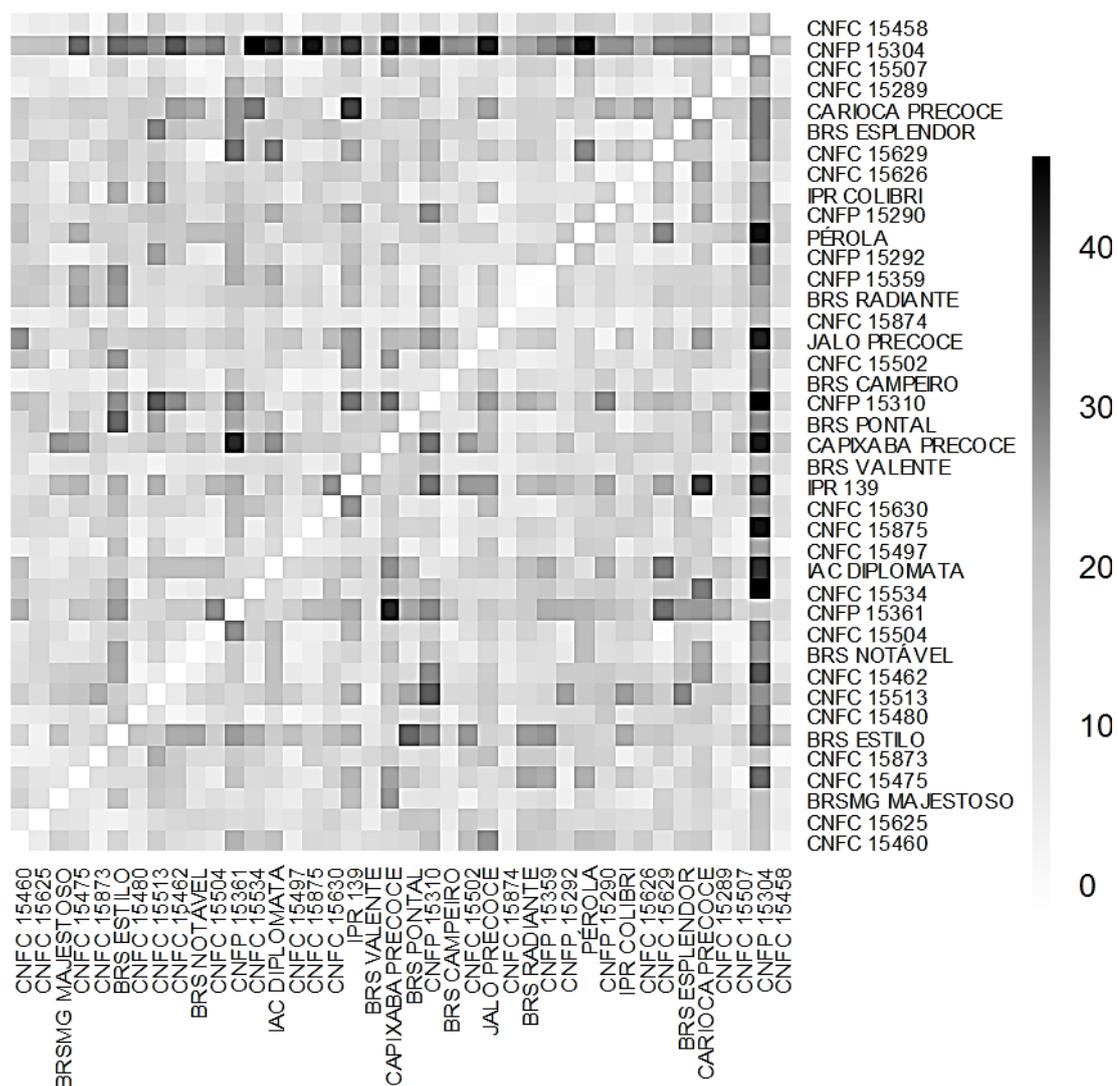


Figura 4. Heatmap obtido a partir da matriz de distância de Mahalanobis de 40 genótipos de feijão (*P. vulgaris*) para as variáveis concentrações de fósforo, magnésio, cálcio, potássio, manganês, ferro e zinco. A escala de cor utilizada foi gradiente de cinza, as maiores distâncias genéticas com tons escuros e as mais próximas com tons mais claros.

Observa-se pelo gráfico de componentes principais que dentre os oito materiais selecionados pelo índice de soma de *ranks* (Tabela 3), os mais divergentes do grupo carioca são CNFC 15475 (4) e CNFC 15625 (2) e do grupo preto são CNFP 15310 (22) e CNFP 15304 (39). Estes materiais dentro de cada grupo são promissores parentais para o desenvolvimento de cultivares biofortificados para a maioria dos minerais estudados. Os cruzamentos direcionados de genótipos para o desenvolvimento de cultivares são extensamente investigados no melhoramento do feijão (JOST et al., 2009; ROSA et al., 2010; RIBEIRO et al., 2012; POERSCH et al., 2013; CEYHAN; HARMANKAYA; KAHRAMAN, 2014), e possibilitam o incremento

na concentração de minerais nos grãos (RIBEIRO, 2010; POERSCH et al., 2013). Para o desenvolvimento de novos cultivares biofortificados deve-se atentar para a existência de interação genótipo x ambiente, e a ocorrência de efeito materno (PEREIRA et al., 2011).

Figura 5. Dispersão gráfica dos 40 genótipos de feijão (*P.vulgaris*) em relação aos três primeiros componentes principais (CP1, CP2 e CP3) com base nas distâncias de Mahalanobis para as médias genéticas das variáveis concentrações de fósforo, magnésio, cálcio, potássio, manganês, ferro e zinco.

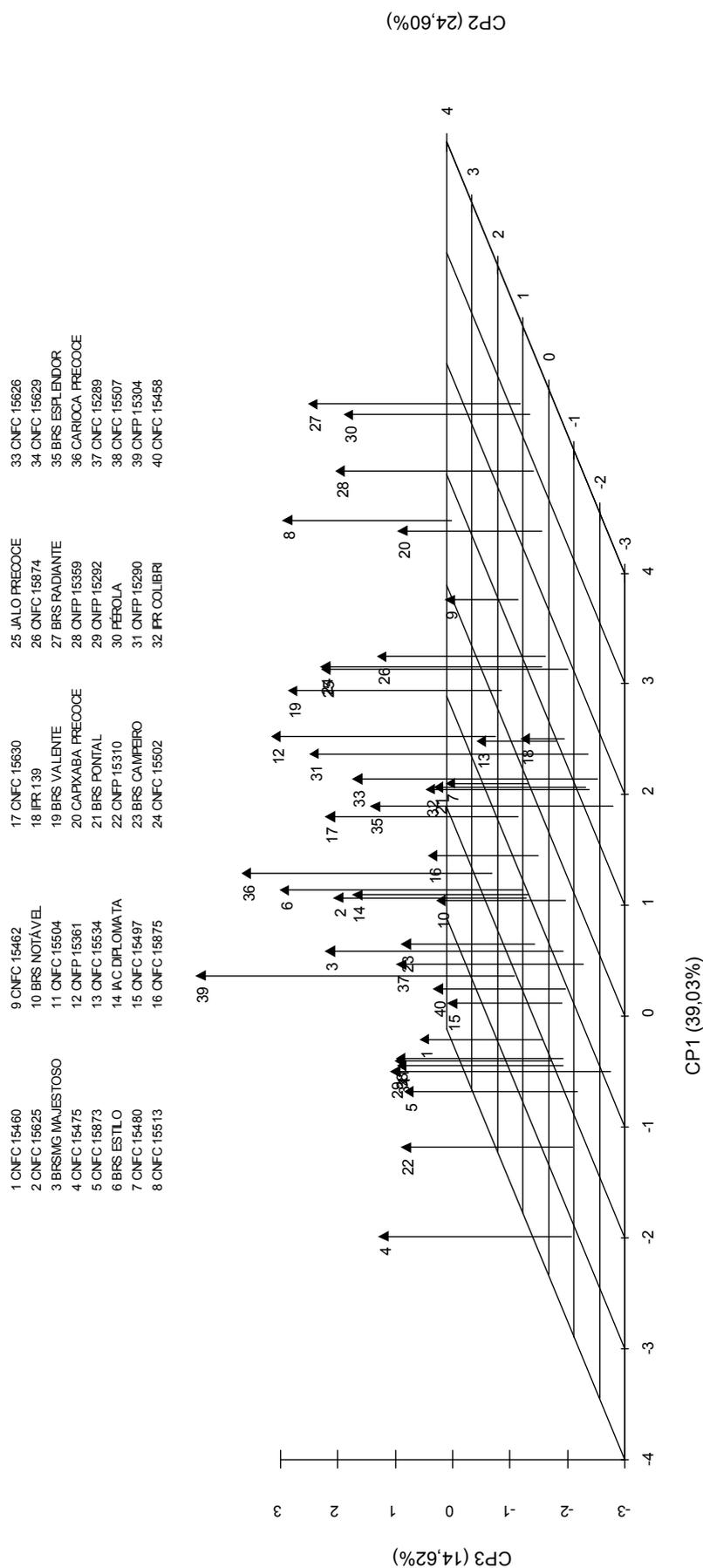


Figura 5. Dispersão gráfica dos 40 genótipos de feijão (*P. vulgaris*) em relação aos três primeiros componentes principais (CP1, CP2 e CP3) com base nas distâncias de Mahalanobis para as médias genéticas das variáveis concentrações de fósforo, magnésio, cálcio, potássio, manganês, ferro e zinco.

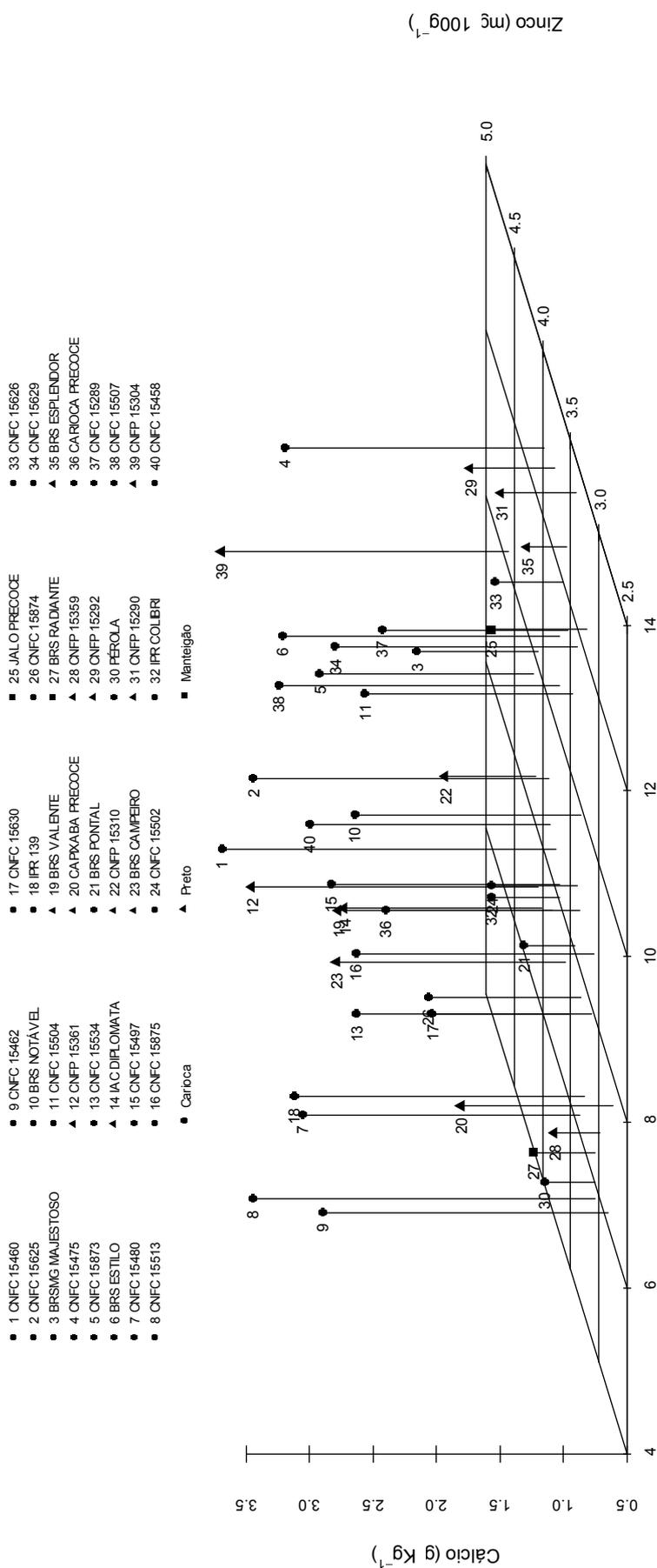


Figura 6. Dispersão das médias genéticas de 40 genótipos de feijão (*P. vulgaris*) em relação a composição de cálcio, ferro e zinco

Destaca-se neste estudo que os oito genótipos que apresentam as maiores concentrações de todos os elementos mineralógicos são linhagens ainda não comerciais, o que possibilita o melhorista utilizar essas linhagens para o lançamento de novos cultivares biofortificados.

4. Conclusão

No feijoeiro existe grande diversidade genética a ser explorada e utilizada pelos melhoristas da cultura. Alcançar altos ganhos de seleção é possível para todos os minerais estudados, com destaque para o cálcio e ferro. Os genótipos CNFC 15475 e CNFC 15625 são os materiais genéticos indicados como parentais promissores no incremento de minerais em feijão do grupo comercial carioca, enquanto os genótipos CNFP 15310 e CNFP 15304 são os genitores mais promissores para o grupo comercial preto.

5. Referências

CEYHAN, E.; HARMANKAYA, M.; KAHRAMAN, A. Combining ability and heterosis for concentration of mineral elements and protein in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 38, p. 1–10, 2014.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: 9º Levantamento**, Junho/2015 - Brasília, v.2, n.9, p.1-104, 2015. Disponível em:<
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_06_11_09_00_38_boletim_graos_junho_2015.pdf >

DEMPSTER, A. P.; LAIRD, N. M.; RUBIN, D. B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 39, n.1, p. 1-38, 1977.

FERREIRA, A. S.; NAOZUKA, J.; KELMER, G. A.; OLIVEIRA, P. V. Effects of the domestic cooking on elemental chemical composition of beans species (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Food Processing**, v. 2014, p. 1–6, 2014.

FLINT-GARCIA, S.A.; THUILLET, A.-C.; YU, J.M.; PRESSOIR, G.; ROMERO, S.M.; MITCHELL, S.E.; DOEBLEY, J.; KRESOVICH, S.; GOODMCAN, M.M.; BUCKLER,

E.S. Maize association population: a high-resolution platform for quantitative trait locus dissection. **The Plant Journal**, v.44, p.1054-1064, 2005.

GOUVEIA, C. S. S.; FREITAS, G.; BRITO, J. H.; SLASKI, J. J.; CARVALHO, M. A. P. Nutritional and mineral variability in 52 accessions of common bean varieties (*Phaseolus vulgaris* L.) from madeira Island. **Agricultural Sciences**, v. 5, p. 317–329, 2014.

JOST, E.; RIBEIRO, N.D; MAZIERO, S.M.; CERUTTI, T.; ROSA, D.P. Efeitos gênicos do teor de cálcio em grãos de feijão. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 31–37, 2009.

KAHRAMAN, A.; ÖNDER, M. Correlations between seed color and nutritional composition of dry bean. **Ratarstvo i povrtarstvo**, v. 50, n. 2, p. 8–13, 2013.

MALAVOLTA, E., VITTI, G.C., OLIVEIRA, A.S. (1997) **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Potafos, Piracicaba, 319p.

MESQUITA, F. R.; CORRÊA, A. D.; ABREU, C. M. P.; LIMA, R. A. Z.; ABREU, A. F. B. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade proteica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 1, p. 1114-1121, 2007.

MULAMBA, N. N.; MOCK, J. J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. **Egyptian Journal of Genetics and Cytology**, v. 7, n. 1, p. 40-51, 1978

PEDROSA ,M. M.; CUADRADO, C.; BURBANO, C.; MUZQUIZ, M.; CABELLOS, B.; OLMEDILLA-ALONSO, BEGOÑA; ASENSIO-VEGAS, C. Effects of industrial canning on the proximate composition, bioactive compounds contents and nutritional profile of two Spanish common dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Food Chemistry**, v. 166, p. 68–75, 2015.

PEREIRA, T., COELHO, C. M. M., SANTOS, J. C. P. D., BOGO, A., MIQUELLUTI, D. J. Diversidade no teor de nutrientes em grãos de feijão crioulo no Estado de Santa Catarina. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 477-485, 2011.

PLANS, M.; SIMÓ, J.; CASAÑAS, F.; SABATÉ, J.; RODRIGUEZ-SAONA, L. Characterization of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by infrared spectroscopy: comparison of MIR, FT-NIR and dispersive NIR using portable and benchtop instruments. **Food Research International**, v. 54, n. 2, p. 1643–1651, 2013.

POERSCH, N. L., RIBEIRO, N. D., ROSA, D. P., MAZIERO, S. M., JOST, E. Genetics of the concentration of copper in common bean seeds. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 301-306, 2013.

R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2014. Disponível em: <http://www.R-project.org/>, acessado em 07 de julho de 2014.

RESENDE, M.D.V. (2002). **Genética Biométrica e Estatística no Melhoramento de Plantas Perenes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 975.

RIBEIRO, N. D. Potencial de aumento da qualidade nutricional do feijão por melhoramento genético. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, sup.1, p. 1367-1376, 2010.

RIBEIRO, N. D., JOST, E., MAZIERO, S. M., STORCK, L., ROSA, D. P. Selection of common bean lines with high grain yield and high grain calcium and iron concentrations. **Revista Ceres**, v. 61, n. 1, p. 77-83, 2014a.

RIBEIRO, N. D., RODRIGUES, J. D. A., PRIGOL, M., NOGUEIRA, C. W., STORCK, L., GRUHN, E. M. Evaluation of special grains bean lines for grain yield, cooking time and mineral concentrations. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 14, n. 1, p. 15-22, 2014b.

RIBEIRO, N. D.; MAZIERO, S. M.; PRIGOL, M.; NOGUEIRA, C. W.; ROSA, D. P.; POSSOBOM, M. T. D. F. Mineral concentrations in the embryo and seed coat of common bean cultivars. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 26, n. 1-2, p. 89–95, 2012.

RIBEIRO, N.D.; JOST, E.; CERUTTI, T.; MAZIERO, S.M.; POERSCH, N.L. Composição de microminerais em cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético. **Bragantia**, v.67,n. 2, p.267-273, 2008.

ROSA, S. S., RIBEIRO, N. D.; JOST, E.; REINIGER, L. R. S.; ROSA, D. P.; CERUTTI, T.; POSSOBOM, M. T. D. F. Potential for increasing the zinc content in common bean using genetic improvement. **Euphytica**, v. 175, n. 2, p. 207–213, 2010.

SILVA, C. A.; ABREU, A. D. F. B.; RAMALHO, M. A. P.; MAIA, L. G. S. Chemical composition as related to seed color of common bean. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 12, p. 132–137, 2012.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seleção de genótipos de feijoeiro com características desejáveis é muito promissora, pois existe uma grande variabilidade genética e muitas das características apresentam alta herdabilidade que facilita o processo de seleção. Porém, a grande dificuldade neste processo de seleção é a compreensão melhor da interação dos genótipos com os ambientes, pois esta espécie apresenta uma interação muito forte que dificulta o processo de seleção.

A análise de diversidade e seleção deve considerar a relação das variáveis, evitando os efeitos da multicolinearidade que é muito prejudicial às análises. Além disso, deve-se usar técnicas que trabalhem com estatísticas multivariadas durante o processo de seleção, para permitir uma seleção mais holística que leve em consideração o maior número possível de variáveis. O processo de classificação dos genótipos deve ser pelos valores genéticos e não apenas pelos valores fenotípicos, pois os valores genéticos serão transmitidos para as novas gerações e poderão ser selecionados para formação de cultivares superiores.

Conclui-se neste trabalho que os genótipos que apresentaram as maiores tolerâncias, adaptabilidade e estabilidade quanto aos estresses osmóticos foram: CNFC 15466, CNFC 15462, CNFC 15630, BRS Valente, Capixaba Precoce, CNFP 15290, CNFP 15292 e CNFP 15302. Além disso, os genótipos mais ricos nutricionalmente e divergentes geneticamente do grupo comercial carioca são: CNFC 15475 e CNFC 15625, e do grupo comercial preto são: CNFP 15310 e CNFP 15304.