

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**DISTRIBUIÇÃO DE MINERAIS E GENÉTICA DOS
TEORES DE POTÁSSIO E DE COBRE EM SEMENTES
DE FEIJÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nerison Luís Poersch

Santa Maria, RS, Brasil

2010

DISTRIBUIÇÃO DE MINERAIS E GENÉTICA DOS TEORES DE POTÁSSIO E DE COBRE EM SEMENTES DE FEIJÃO

por

Nerison Luís Poersch

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agronomia.**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Nerinéia Dalfollo Ribeiro

Santa Maria, RS, Brasil

2010

© 2010

Todos os direitos autorais reservados a Nerison Luís Poersch. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Avenida Roraima, n.1000, Cidade Universitária, Departamento de Fitotecnia, Prédio 77, Sala 11, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900

Fone (55) 3220-8179; End. eletr: nerisonp@yahoo.com.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-graduação em Agronomia**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**DISTRIBUIÇÃO DE MINERAIS E GENÉTICA DOS TEORES DE
POTÁSSIO E DE COBRE EM SEMENTES DE FEIJÃO**

elaborada por
Nerison Luís Poersch

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Agronomia

COMISSÃO EXAMINADORA:

Nerinéia Dalfollo Ribeiro, Dr^a.
(Presidente/Orientadora)

Sérgio Augusto Morais Carbonell, Dr. (IAC)

Lia Rejane Silveira Reiniger, Dr^a. (UFSM)

Santa Maria, 19 de fevereiro de 2010.

DEDICATÓRIA

Ao meus pais: Neri Poersch e
Lúcia T. Haas Poersch (*In Memoriam*)
À minha madrastra: Nair Wenzel
Aos meus irmãos: Ademir Haas Poersch e
Anderson Haas Poersch

A essas pessoas maravilhosas, que fazem parte da minha história, e que são as principais responsáveis pela formação do meu caráter.

Dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo maravilhoso dom da vida.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

À minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Nerinéia Dalfollo Ribeiro, pelos preciosos ensinamentos, pelo carinho, apoio, amizade e sugestões dadas para a realização desse trabalho.

Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia, pelos ensinamentos e amizade.

Aos colegas e sempre amigos, Ana, Daniel, Daniele, Evandro, Guilherme, Micheli, Patrícia, Sandra, Simone, Taiguer e Viviani pela colaboração na condução do trabalho e companheirismo.

Ao Prof. Dr. José Laerte Nörnberg e seus orientados, por possibilitar a realização das análises laboratoriais no Núcleo Integrado de Desenvolvimento em Análises Laboratoriais (NIDAL) e pela disposição em colaborar.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia, principalmente ao João Colpo, pelo auxílio na realização do trabalho e pela amizade.

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para que esse trabalho fosse realizado.

Muito obrigado!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

DISTRIBUIÇÃO DE MINERAIS E GENÉTICA DOS TEORES DE POTÁSSIO E DE COBRE EM SEMENTES DE FEIJÃO

AUTOR: NERISON LUÍS POERSCH

ORIENTADORA: NERINÉIA DALFOLLO RIBEIRO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 19 de fevereiro de 2010.

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), além de ser um alimento altamente protéico, também é uma excelente fonte de minerais para a utilização na alimentação humana. Todavia, variabilidade genética para os teores de minerais tem sido constatada e a acumulação dos minerais pode ocorrer de maneira diferenciada no tegumento e no embrião das sementes de feijão. Não foram encontrados estudos sobre a genética dos teores de potássio e de cobre em sementes de feijão e sobre o potencial do melhoramento genético para o aumento desses minerais. Sendo assim, os objetivos desse trabalho foram: (1) investigar a acumulação de potássio, cálcio, cobre, ferro e zinco no tegumento e no embrião das sementes de feijão; (2) verificar a ocorrência de efeito materno na expressão dos teores de potássio e de cobre em sementes de feijão; (3) obter estimativas de herdabilidade e de ganho por seleção para os teores de potássio e de cobre em gerações precoces. Para tanto, o tegumento foi separado do embrião das sementes de duas cultivares de feijão BRS Expedito e Carioca e os minerais foram determinados em cada fração. Também, foram realizados cruzamentos dirigidos entre as cultivares IAPAR 44 x Guapo Brilhante e BRS Expedito x BRS Valente, para o estudo da genética do teor de potássio, e entre as cultivares IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito, para o estudo da genética do teor de cobre. No embrião se concentraram mais de 80% do potássio, 64% do cobre e 68% do zinco e no tegumento acumularam-se mais de 94% do cálcio e de 51,06% a 60,12% do ferro nas sementes de feijão das cultivares BRS Expedito e Carioca. Não foi observado efeito materno significativo na expressão dos teores de potássio e de cobre em sementes de feijão. Estimativas de herdabilidade em sentido amplo de 44,08% e de 79,97% e em sentido restrito de 33,26% e de 43,05% foram obtidas para o teor de potássio, nos cruzamentos IAPAR 44 x Guapo Brilhante e BRS Expedito x BRS Valente, respectivamente. Para o teor de cobre, foram observadas estimativas de herdabilidade em sentido amplo de 71,90% e de 79,65% e em sentido restrito de 51,98% e de 61,99% para os cruzamentos IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito, respectivamente. O aumento do teor de potássio, por melhoramento genético, poderá ser dificultado em função do expressivo efeito da variância do ambiente. Para o teor de cobre foi possível um aumento de 46,78%, por melhoramento genético.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L.; embrião; herdabilidade; ganho por seleção; efeito materno.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Programa de Pós-graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

DISTRIBUTION OF MINERALS AND GENETIC POTASSIUM AND COPPER CONTENT IN COMMON BEAN SEEDS

AUTHOR: NERISON LUÍS POERSCH

ADVISER: NERINÉIA DALFOLLO RIBEIRO

Place and date of the defense: Santa Maria, February 19th, 2010.

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), besides having high protein food, is also an excellent source of minerals for consuming. However, genetic variability for minerals contents has been observed and the accumulation of minerals occurs differently in the embryo and seed coat of bean seeds. It was not found studies on the genetics levels of potassium and copper in common bean seeds and a little about the potential of genetic improvement to increase in these minerals. Therefore, the aims of this study were: (1) investigate the accumulation of potassium, calcium, copper, iron and zinc in the seed coat and embryo of beans seeds; (2) examine the occurrence of maternal effect in the expression levels of potassium and copper in common bean seeds; (3) to estimate heritability and gain by selection for potassium and copper contents in early generations. Thus, the seed coats of two cultivars BRS Expedito and Carioca were separated from the embryo and minerals were determined in each fraction. Also, crosses were made between IAPAR 44 x Guapo Brilhante and BRS Expedito x BRS Valente, to study the genetics of potassium, and between IAPAR 44 x IAPAR 31 and Diamante Negro x TPS Bonito, to study copper amount. In the embryo was concentrated more than 80% of potassium, 64% copper and 68% zinc and the tegument has accumulated more than 94% of calcium and 51.06% to 60.12% of iron in the seeds of BRS Expedito and Carioca cultivars. There was no significant maternal effect on the expression levels of potassium and copper in common bean seeds. Estimates of broad sense heritability of 44.08% and 79.97%, and in the narrow sense of 33.26% and 43.05% were obtained for potassium content in IAPAR 44 x Guapo Brilhante and BRS Expedito x BRS Valente crossing, respectively. For copper content was observed estimates of heritability in the broad sense of 71.90% and 79.65%, and in the narrow sense of 51.98% and 61.99% for IAPAR 44 x IAPAR 31 and Diamante Negro x TPS Bonito crossing, respectively. The increase in potassium content, for breeding, may be difficult due to the significant effect of the environment variance. For copper content, it was possible an increased of 46.78% for breeding.

Key-words: *Phaseolus vulgaris* L.; embryo; heritability; gain by selection; maternal effect.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Teores de potássio e de cálcio (g kg^{-1}) no tegumento e no embrião de sementes de duas cultivares de feijão. Santa Maria – RS, UFSM, 2010	23
TABELA 2 – Porcentagem de matéria seca (MS%) e porcentagem dos teores de potássio e de cálcio no tegumento e no embrião de sementes de duas cultivares de feijão. Santa Maria – RS, UFSM, 2010.....	24
TABELA 3 – Médias dos genitores (P_1 e P_2) e das gerações F_1 , F_2 , retrocruzamento 1 (RCP_1) e retrocruzamento 2 (RCP_2), com base na geração dos cotilédones, e seus respectivos desvios-padrão, parâmetros genéticos e predição de ganhos por seleção para o teor de potássio em sementes de feijão nos cruzamentos IAPAR 44 x Guapo Brillhante e BRS Expedito x BRS Valente. Santa Maria – RS, UFSM, 2010	28
TABELA 4 – Teores de cobre, ferro e zinco (mg kg^{-1}) no tegumento e no embrião de sementes de duas cultivares de feijão. Santa Maria – RS, UFSM, 2010	40
TABELA 5 – Porcentagem de matéria seca (MS) e porcentagem dos teores de cobre, ferro e zinco no tegumento e no embrião de sementes de duas cultivares de feijão. Santa Maria – RS, UFSM, 2010.....	41
TABELA 6 – Médias dos genitores (P_1 e P_2) e das gerações F_1 , F_2 , retrocruzamento 1 (RCP_1) e retrocruzamento 2 (RCP_2), com base na geração dos cotilédones, e seus respectivos desvios-padrão, parâmetros genéticos e predição de ganhos por seleção para o teor de cobre em sementes de feijão nos cruzamentos IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito. Santa Maria – RS, UFSM, 2010.....	45

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 – Genitores (P_1 e P_2) e gerações F_1 , F_1 recíproco, F_2 , F_2 recíproco e seus respectivos teores médios de potássio nas sementes e teste de significância dos contrastes P_1 vs P_2 , F_1 vs F_1 recíproco (F_{1r}) e F_2 vs F_2 recíproco (F_{2r}) obtidos no cruzamento 1 (IAPAR 44 x Guapo Brilhante) e no cruzamento 2 (BRS Expedito x BRS Valente). Santa Maria – RS, UFSM, 2010..... 26
- FIGURA 2 – Genitores (P_1 e P_2) e gerações F_1 , F_1 recíproco (F_{1r}), F_2 , F_2 recíproco (F_{2r}) e seus respectivos teores médios de cobre nas sementes e teste de significância dos contrastes P_1 vs P_2 , F_1 vs F_1 recíproco e F_2 vs F_2 recíproco obtidos no cruzamento 1 (IAPAR 44 x IAPAR 31) e no cruzamento 2 (Diamante Negro x TPS Bonito). Santa Maria – RS, UFSM, 2010..... 43

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 – Hábito de crescimento (HC), tipo de grão, Programa de Melhoramento obtentor/mantenedor da cultivar e genealogia das cultivares de feijão utilizadas nos estudos de acumulação de minerais e da genética dos teores de potássio e de cobre em sementes de feijão. Santa Maria – RS, UFSM, 2010.....	54
--	----

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
CAPÍTULO 1 – Distribuição de macrominerais e genética do teor de potássio em sementes de feijão	
Resumo.....	15
Abstract	16
Introdução.....	17
Material e Métodos	19
Resultados e Discussão	22
Conclusões.....	30
CAPÍTULO 2 – Distribuição de microminerais e genética do teor de cobre em sementes de feijão	
Resumo.....	32
Abstract	33
Introdução.....	34
Material e Métodos	36
Resultados e Discussão	39
Conclusões.....	47
CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
ANEXOS	54

INTRODUÇÃO

As espécies leguminosas são, frequentemente, citadas na literatura por apresentarem teores elevados de proteína, quando comparadas aos cereais. Dentre às leguminosas, o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) destaca-se como o mais consumido na América Latina e no Leste da África (BEEBE; GONZALEZ; RENGIFO, 2000). Adicionalmente, apresenta teores significativos de carboidratos, vitaminas, fibras e minerais (cálcio, ferro, magnésio, zinco, potássio e cobre) (ESTEVES, 2000). Portanto, o consumo de feijão é capaz de satisfazer grande parte das necessidades nutricionais diárias de um indivíduo adulto (SATHE; DESHPANDE; SALUNKHE, 1984).

Entre as leguminosas, o feijão é a espécie que apresenta os maiores teores de potássio em suas sementes (IQBAL et al., 2006). Além disso, o feijão possui, em média, cerca de 1,2 g de potássio 100 g⁻¹ de porção comestível, superando a banana, alimento muito ingerido por atletas com a finalidade de evitar câibras, a qual tem, em média, 0,35 g de potássio (UNICAMP, 2006). A família Fabaceae, em especial àquelas com frutos secos, também, são fontes ricas em cobre (MAHAN; ESCOTT-STUMP, 1998), sendo que o feijão se destaca, pois apresenta, em média, 0,80 mg 100 g⁻¹ de porção comestível, ou seja, bem superior ao arroz, que possui apenas 0,05 mg (UNICAMP, 2006).

No entanto, o consumo “per capita” de feijão tem apresentado decréscimo ao longo dos anos. Segundo dados da Food and Agriculture Organization (FAO), o consumo de feijão no Brasil entre 1961 e 2003, teria sido reduzido de 21 para 17 kg hab ano⁻¹ (FAO, 2009). Dessa forma, o feijão está sendo substituído por outros alimentos que apresentam maior facilidade de preparo, porém, são de menor valor nutricional. Essa substituição tem levado ao aparecimento de deficiências de minerais (WELCH; GRAHAM, 1999).

Os minerais são essenciais à manutenção de várias funções fisiológicas no organismo humano. Dentre eles, o potássio destaca-se como o cátion predominante no interior da célula, exercendo papel relevante como catalisador no metabolismo dos glicídios e no armazenamento do glicogênio e das proteínas, sendo, também, responsável pela regulação do potencial osmótico da célula, juntamente com o sódio (FRANCO, 2005). Entretanto, cerca de 90% do potássio ingerido é excretado pelos rins e o restante, pelo suor e fezes, acarretando em necessidade de reposição diária desse mineral por meio da alimentação (DUTRA DE OLIVEIRA; MARCHINI, 1998).

O cobre também tem recebido atenção especial, uma vez que é essencial, em diversas funções orgânicas, como na mobilização do ferro para a síntese de hemoglobina, produção de energia mitocondrial e síntese de melanina (MAHAN; ESCOTT-STUMP, 1998). A sua deficiência na alimentação resulta em uma falha na absorção do ferro, provocando o aparecimento de anemia.

A composição química de um alimento de origem vegetal é determinada por fatores genéticos, ambientais e sua interação (FLOREZ et al., 2009). Isso explica as variações que podem ser observadas nos teores de um determinado mineral, mesmo dentro da mesma espécie vegetal.

O feijão apresenta altos teores de potássio e de cobre nas sementes e variabilidade genética tem sido observada para potássio (BARAMPAMA; SIMARD, 1993; BEEBE, GONZALEZ; RENGIFO, 2000; MESQUITA et al., 2007) e cobre (AUGUSTIN et al., 1981; MESQUITA et al., 2007) em germoplasma cultivado e silvestre. Entretanto, esses minerais diferem quanto à acumulação nas sementes de feijão, sendo que alguns são, predominantemente, detectados no tegumento enquanto outros, no embrião (MORAGHAN; GRAFTON, 2002).

O teor de potássio na semente pode ser alterado via aplicação direta desse macronutriente no solo ou por meio da adubação foliar. Porém, a utilização da adubação foliar de forma isolada não é recomendada devido à alta exigência da planta por esse mineral, a qual não satisfaz às necessidades da planta (NOVAIS et al., 2007). O elevado índice salino de alguns fertilizantes potássicos tem causado danos quando são aplicados muito próximos às sementes, prejudicando a germinação e o crescimento inicial das plantas (BEVILAQUA et al., 1996). Já, o fornecimento de fertilizantes a base de cobre para as plantas pode ser realizado através da aplicação via solo, foliar ou pelo tratamento de sementes (GALRÃO, 1999). A dificuldade da aplicação de micronutrientes, entre eles o cobre, reside na distribuição de pequenas doses em grandes áreas de cultivo, sendo que a aplicação em excesso resulta em toxidez à planta. Nesse sentido, o melhoramento genético pode contribuir para elevar a qualidade nutricional e tecnológica das sementes de feijão, reduzir custos, disponibilizando um alimento com composição química adequada, minimizando os problemas de carências nutricionais na alimentação. Assim, o conhecimento da herança dos teores de minerais em sementes de feijão é determinante para o desenvolvimento de cultivares nutracêuticas, considerando-se que essas informações são ainda muito escassas na literatura.

Sendo assim, os objetivos desse trabalho foram: (1) investigar a acumulação de potássio, cálcio, cobre, ferro e zinco no tegumento e no embrião das sementes de feijão; (2)

verificar a ocorrência de efeito materno na expressão dos teores de potássio e de cobre em sementes de feijão; e (3) obter estimativas de herdabilidade e de ganho por seleção para os teores de potássio e de cobre em gerações precoces.

CAPÍTULO 1

DISTRIBUIÇÃO DE MACROMINERAIS E GENÉTICA DO TEOR DE POTÁSSIO EM SEMENTES DE FEIJÃO

MACROMINERAL DISTRIBUTION AND GENETIC POTASSIUM CONTENT IN COMMON BEAN SEEDS

RESUMO

O feijão é capaz de suprir grande parte das necessidades de minerais na alimentação humana. Nesse sentido, os objetivos desse trabalho foram investigar a acumulação de potássio no tegumento e no embrião das sementes de feijão, verificar a existência de efeito materno na expressão do teor de potássio em sementes de feijão e obter estimativas de herdabilidade e de ganho por seleção em gerações precoces. Sementes de duas cultivares de feijão BRS Expedito e Carioca, obtidas em duas épocas de cultivo, foram separadas em tegumento e em embrião. Cruzamentos dirigidos foram realizados entre as cultivares IAPAR 44 x Guapo Brilhante e BRS Expedito x BRS Valente e foram obtidas as gerações F₁, F₁ recíproco, F₂, F₂ recíproco e retrocruzamentos (RCP₁ e RCP₂). Os minerais foram determinados por digestão nítrica-perclórica e leitura por fotometria de chama (potássio) e espectrofotômetro de absorção atômica (cálcio). Mais de 80% do potássio se concentrou no embrião e mais de 94% do cálcio se acumulou no tegumento das sementes de feijão das cultivares BRS Expedito e Carioca. Não ocorreu manifestação de efeito materno significativo para o teor de potássio. Estimativas de herdabilidade em sentido restrito de baixa magnitude (33,26%, no cruzamento IAPAR 44 x Guapo Brilhante) a moderada magnitude (43,05%, no cruzamento BRS Expedito x BRS Valente) foram observadas para o teor de potássio. A seleção de germoplasma de feijão com alto teor de potássio nas sementes pode ser dificultada em decorrência do pronunciado efeito da variância de ambiente e da baixa magnitude do ganho por seleção.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., embrião, herdabilidade, ganho por seleção, efeito materno.

ABSTRACT

The common bean is able to meet most needs of minerals in food. In these sense, the objectives of this research were to investigate the accumulation of potassium and calcium in the seed coat and embryo of beans seeds, check maternal effect on the expression of potassium content in common bean seeds and to estimate heritability and selection gain in early generations. Seeds of BRS Expedito and Carioca cultivars, obtained in two growing seasons, were separated into seed coat and embryo. Crosses were performed between IAPAR 44 x Guapo Brillhante and BRS Expedito x BRS Valente cultivars and were obtained F₁, F₁ reciprocal, F₂, F₂ reciprocal and backcrosses (RCP₁ and RCP₂) generations. The minerals were determined by nitric-perchloric digestion and evaluated by flame photometry (potassium) and atomic absorption spectroscopy (calcium). More than 80% of potassium were concentrated in the embryo and over 94% of calcium accumulate in the seed coat of BRS Expedito and Carioca bean cultivars. There was no demonstration of significant maternal effect for the potassium content. Estimates of narrow sense heritability of low magnitude (33,26% IAPAR 44 x Guapo Brillhante crossing) to moderate magnitude (43,05% BRS Expedito x BRS Valente crossing) were observed for the potassium content. The selection of common bean germoplasma with high potassium content in the seeds can be difficult due to the pronounced effect of environmental variance and the low magnitude of the gain by selection.

Key words: *Phaseolus vulgaris* L., embryo, heritability, gain by selection, maternal effect.

INTRODUÇÃO

O potássio é encontrado em quase todos os alimentos, por isso a sua deficiência é rara (FENNEMA, 2000; FRANCO, 2005). Todavia, as leguminosas são muito superiores aos cereais como fonte de minerais (WELCH et al., 2000).

Razões sociais ou culturais podem restringir o uso de uma alimentação balanceada e, nessas condições, a deficiência condicionada de potássio pode ser verificada na doença renal, acidose diabética, vômitos, diarreia ou sudorese excessiva (MAHAN; ESCOTT-STUMP, 1998). Isso porque o potássio intervém na regulação osmótica e no equilíbrio hídrico do organismo, atua na transmissão nervosa, na tonicidade muscular, na função renal e na contração da musculatura cardíaca (FRANCO, 2005). Em função disso, o Instituto de Medicina recomendou a ingestão diária de 4,7 g de potássio dia⁻¹ para satisfazer os requerimentos nutricionais de um indivíduo adulto (INSTITUTE OF MEDICINE, 2004). No entanto, pessoas que praticam atividade física intensa necessitam de doses maiores de potássio para a manutenção do condicionamento físico (LINDINGER, 1995).

Na América Latina, de 8 a 27% do potássio necessário para satisfazer os requerimentos nutricionais diários são obtidos do consumo de feijão (PENNINGTON; YOUNG, 1990). O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) supera a banana no teor de potássio, em até três vezes (UNICAMP, 2006), possui baixo teor de gordura e de sódio e não contém colesterol (HOSFIELD, 1991; MORROW, 1991).

As sementes de feijão apresentam altos teores de potássio e variabilidade genética tem sido constatada em germoplasma silvestre e cultivado. Na Colômbia, o teor máximo de potássio observado em sementes de feijão foi de 20,05 g de potássio kg⁻¹ de matéria seca (MS) em 119 acessos silvestres e de 21,25 g kg⁻¹ de MS em 1031 acessos cultivados (BEEBE; GONZALEZ; RENGIFO, 2000). Em Burundi, valores de 4,42 a 6,31 g kg⁻¹ de MS foram relatados em sementes de quatro cultivares de feijão (BARAMPAMA; SIMARD, 1993).

Em germoplasma de feijão cultivado no Brasil, amplitude de 15,50 a 19,60 g kg⁻¹ de MS foi obtida na avaliação de seis linhagens (ESTEVES, 2000) e de 15,10 a 24,80 g kg⁻¹ de MS foi verificada em 21 linhagens (MESQUITA et al., 2007). A existência de variabilidade genética possibilita a seleção de germoplasma de feijão com alto teor de potássio nas sementes. Entretanto, interação genótipo versus locais foi constatada para o teor de potássio

em sementes de feijão (BARAMPAMA; SIMARD, 1993; MORAGHAN; GRAFTON, 2001) e dessa maneira, torna-se necessária, a avaliação, em um maior número de ambientes para a seleção de genótipos com maior qualidade nutricional.

Genótipos de feijão diferiram quanto à eficiência no uso de potássio e foi possível identificar a cultivar Diamante Negro como eficiente no uso de potássio e responsiva a este nutriente, pois apresentou alto rendimento de grãos em solo com baixo teor deste mineral e respondeu ao aumento de suas doses no solo (FAGERIA; BARBOSA FILHO; COSTA, 2001). Considerando que o potássio é um recurso natural não renovável e um insumo agrícola de alto custo, o uso de menores quantidades de adubo contendo esse mineral representa diminuição da degradação do solo, pela redução do uso de máquinas e de insumos agrícolas, e aumento da lucratividade pela redução dos custos (RENGEL; DAMON, 2008).

A adubação com potássio é realizada, principalmente, no solo. Não foram encontrados trabalhos de aplicação de potássio via foliar ou nas sementes de feijão. Em soja, foi observado que a aplicação de potássio no solo propiciou incremento do teor de potássio nas sementes (YIN; VYN, 2003). Entretanto, o uso de fertilizantes potássicos no solo pode ocasionar problemas de salinidade se for realizado próximo à semente, causando redução na emergência e no peso da matéria seca da parte aérea e das raízes de plântulas de milho (BEVILAQUA et al., 1996). Por isso, práticas de melhoramento sustentável são importantes para a produção agrícola e para melhorar a qualidade da alimentação. O melhoramento genético apresenta-se como uma estratégia para aumentar o teor de minerais em sementes de feijão. Cruzamentos dirigidos e a seleção de recombinantes obtidos proporcionaram incrementos de 19,17% no teor de fósforo (ROSA, 2009) e de 33,64% no teor de cálcio em sementes de feijão de gerações precoces (JOST et al., 2009a).

A semente de feijão é composta pelo tegumento, que representa cerca de 9% na matéria seca, cotilédones, com 90%, e eixo embrionário, com apenas 1% (MESQUITA, 1989). No tegumento das sementes de feijão estão presentes, aproximadamente, 84% do teor de cálcio e apenas de 8% do teor de potássio (MORAGHAN; GRAFTON, 2002). Em decorrência, foi observado efeito materno significativo para o teor de cálcio em sementes de feijão (JOST et al., 2009a) e a expressão genética do cruzamento somente foi observada na geração F_2 , quando as sementes apresentaram cotilédones na geração F_1 . Como consequência, a seleção foi realizada em F_3 (sementes com cotilédones na geração F_2), quando segregação máxima foi constatada. Isso ocorreu porque o tegumento é tecido materno e os cotilédones são produtos da fecundação, ou seja, são tecidos que estão presentes em gerações diferentes em uma mesma semente (RAMALHO; SANTOS; PINTO, 2008).

A genética do teor de potássio em sementes de feijão não é conhecida, assim como o potencial do melhoramento genético em aumentar o teor desse mineral. Sendo assim, os objetivos desse trabalho foram confirmar a acumulação diferencial de potássio e de cálcio no tegumento e no embrião das sementes de feijão, investigar a existência de efeito materno na expressão do teor de potássio e obter estimativas de herdabilidade e de ganho por seleção em gerações precoces, obtidas a partir dos cruzamentos dirigidos entre as cultivares IAPAR 44 x Guapo Brilhante e BRS Expedito x BRS Valente.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento de determinação dos teores de potássio e de cálcio no tegumento e no embrião (cotilédones e eixo embrionário) das sementes de feijão foi realizado com as cultivares BRS Expedito (grupo comercial preto) e Carioca (tipo carioca), ambas do grupo gênico Mesoamericano. As sementes foram obtidas de experimentos conduzidos em campo, em duas safras agrícolas 2007/2008 e 2008/2009. O solo utilizado foi caracterizado como um Argissolo Bruno-Acinzentado alítico típico, com a seguinte composição química média: pH (H₂O): 6,5; matéria orgânica: 2%; fósforo: 14,4 mg dm⁻³; potássio: 40 mg dm⁻³; enxofre: 17,6 mg dm⁻³; cálcio: 5,2 cmol_c dm⁻³; magnésio: 2,1 cmol_c dm⁻³; cobre: 0,2 mg dm⁻³; zinco: 0,6 mg dm⁻³.

O solo foi preparado de maneira convencional e a adubação foi realizada de acordo com a interpretação da análise química do solo. O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados, com três repetições. A parcela foi constituída de duas linhas de 4 m de comprimento, espaçadas de 0,50 m, e uma área útil de 4 m². O controle de insetos e de plantas invasoras foi efetuado sempre que necessário, de modo que a cultura não sofresse competição. O controle de doenças não foi realizado.

A colheita e a trilha das plantas foram realizadas manualmente na maturação. Após a retirada das sementes quebradas e com rachaduras, as sementes foram secadas em estufa (65 a 70 °C) até 13% de umidade média. Na sequência, 50 sementes de cada cultivar foram dispostas entre duas folhas de papel toalha que foram levemente umedecidas com água destilada, por meio de um borrifador manual, permanecendo assim, por um período de 24 horas, à temperatura ambiente (18 °C ± 2 °C). A separação do tegumento foi realizada

manualmente, com o auxílio de uma faca, para facilitar o rompimento inicial do tegumento. Após a separação, as frações tegumento e embrião foram, novamente, secados em estufa (65°C a 70 °C), até peso constante.

As amostras foram moídas em micromoinho até a obtenção de partículas inferiores a 1 mm de diâmetro. Amostras de 0,5 g da farinha de feijão cru, de cada uma das frações obtidas, foram digeridas em 5 ml da solução nítrica-perclórica (HNO₃ + HClO₄, na proporção volumétrica de 5:1). Após 12 horas de digestão a frio (sem aquecimento), a temperatura foi elevada, lentamente, a cada 30 minutos em 30 °C, até atingir 180 °C. Ao final da digestão, quando restava, aproximadamente, 1 ml da solução com coloração transparente, se procedeu a diluição, adicionando água destilada até completar 50 ml, de acordo com a metodologia descrita em Miyazawa et al. (1999). Aproximadamente 20 ml dessa diluição foram utilizados para a leitura dos teores de potássio, que foi realizada por fotometria de chama. O teor de cálcio, também, foi determinado nas amostras por meio de leitura em espectrofotômetro de absorção atômica, utilizando comprimento de onda de 422,70 nm.

O estudo da genética do teor de potássio foi realizado por meio de cruzamentos dirigidos entre as cultivares IAPAR 44 x Guapo Brilhante e BRS Expedito x BRS Valente. Esses foram conduzidos em casa-de-vegetação do Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. As cultivares integram o Banco de Germoplasma de Feijão da UFSM e foram selecionadas com base no teor de potássio e no seu valor agrônomo. Todas as cultivares são do grupo gênico Mesoamericano, apresentam sementes de tegumento preto, hábito de crescimento indeterminado com guias curtas (tipo II) e possuem ciclo intermediário, aproximadamente 90 dias (BRASIL, 2009).

O método de entrelaçamento, com emasculação prévia do botão floral (PETERNELLI; BORÉM; CARNEIRO, 2009), foi utilizado para a obtenção das sementes F₁ (♀ P₁ x ♂ P₂) e F₁ recíproco (♀ P₂ x ♂ P₁), durante o outono-inverno de 2008. Parte dessas sementes foram semeadas na primavera-verão de 2008, obtendo-se as sementes F₂ (autofecundação natural das plantas F₁), F₂ recíproco (autofecundação natural das plantas F₁ recíproco), retrocruzamento 1 (RCP₁: ♀ F₁ x ♂ P₁) e retrocruzamento 2 (RCP₂: ♀ F₁ x ♂ P₂). No outono-inverno de 2009, foram obtidas as gerações F₃ (autofecundação natural das plantas F₂), F₃ recíproco (autofecundação natural das plantas F₂ recíproco) e retrocruzamentos de segunda geração (autofecundação natural das plantas retrocruzadas: RCP₁ e RCP₂), para serem utilizadas na obtenção das estimativas de herdabilidade e de ganho por seleção, caso fosse constatado efeito materno. O processo foi repetido no outono-inverno de 2009, para

possibilitar a avaliação de sementes das gerações F₁, F₁ recíproco, F₂, F₂ recíproco e retrocruzamentos (RCP₁ e RCP₂), nas mesmas condições de cultivo.

As plantas foram cultivadas em vasos plásticos com capacidade de 5 litros, com duas plantas por vaso. Foi utilizada uma mistura de solo + casca de arroz carbonizada + substrato comercial Plantmax® na proporção volumétrica de 2:1:1. O solo utilizado pertence à Unidade de Mapeamento São Pedro, sendo um Argissolo Bruno-Acinzentado alítico típico, com a mesma composição química do experimento conduzido em campo. A correção da fertilidade e a aplicação de nitrogênio em cobertura foram efetuadas com base na análise química do solo. A demanda hídrica das plantas foi suprida por irrigações, de forma que a umidade do solo fosse mantida próxima à capacidade de campo. O controle de pragas e de doenças foi realizado com a aplicação de produtos químicos, sempre que necessário, mantendo-se a sanidade das plantas e a integridade dos botões florais.

Ao final do ciclo da cultura, as sementes de cada geração obtida foram colhidas e secadas em estufa (65 a 70 °C) até atingir 13% de umidade média. As amostras foram moídas e o teor de potássio foi determinado na farinha de feijão cru por meio de digestão nítrica-perclórica, de acordo com a metodologia descrita em Miyazawa et al. (1999).

O experimento de determinação dos teores de potássio e de cálcio nas diferentes frações das sementes de feijão (tegumento e embrião) foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições de 50 sementes. Efetuou-se a comparação das médias pelo teste t a 5% de significância para os contrastes entre as épocas de cultivo e entre as cultivares (dentro de cada época de cultivo).

O delineamento adotado para o estudo da genética do teor de potássio foi o inteiramente casualizado, considerando cinco repetições para os genitores e as gerações F₁ e F₁ recíproco e 12 repetições para as gerações F₂ e F₂ recíproco. Para testar a hipótese de efeito materno, efetuou-se a comparação entre as médias pelo teste t a 5% de significância para os contrastes P₁ vs P₂, F₁ vs F₁ recíproco e F₂ vs F₂ recíproco.

As estimativas de herdabilidade foram obtidas a partir das variâncias dos genitores (P₁ e P₂) e das gerações F₁, F₂, RCP₁ e RCP₂, com base na geração dos cotilédones, para cada

combinação híbrida. A herdabilidade foi estimada em sentido amplo $h_a^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_p^2}$ e em sentido

restrito $h_r^2 = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_p^2}$, de acordo com o método dos retrocruzamentos proposto por Warner (1952).

Sendo que: variância aditiva: $\sigma^2_A = 2\sigma^2_{F_2} - (\sigma^2_{RCP_1} + \sigma^2_{RCP_2})$, variância fenotípica: $\sigma^2_P = \sigma^2_{F_2}$ e variância de ambiente em F_2 : $\sigma^2_E = 1/3(\sigma^2_{F_1} + \sigma^2_{P_1} + \sigma^2_{P_2})$.

A heterose na geração F_1 foi quantificada pela forma percentual, tanto para a relacionada com a média dos genitores ($H\% = \frac{F_1 - P}{P} \times 100$) quanto para a heterobelitose ($HT\% = \frac{F_1 - MP}{MP} \times 100$), considerando-se $P = \frac{P_1 + P_2}{2}$ e MP = melhor genitor.

Para a predição de ganhos por seleção, foi considerada a seleção de 25% das plantas com sementes F_2 (cotilédones na geração F_2) com maior teor de potássio. O ganho esperado, considerando-se a seleção e a recombinação dos indivíduos superiores em plantas com sementes F_2 (cotilédones na geração F_2), foi estimado pela expressão: $\Delta G = DSxh_r^2$ e $\Delta G(\%) = \frac{\Delta G \times 100}{\bar{F}_2}$, em que DS é o diferencial de seleção, expresso por $\bar{X}_s - \bar{X}_0$, sendo \bar{X}_s = média das plantas selecionadas com sementes na geração F_2 e \bar{X}_0 = média das plantas com sementes na geração F_2 . Todas as análises foram realizadas com o auxílio da planilha eletrônica Office Excel e do programa Genes (CRUZ, 2006).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Teores de potássio e de cálcio no tegumento e no embrião das sementes de feijão

As cultivares BRS Expedito e Carioca apresentaram variação nos teores de potássio e de cálcio no tegumento e no embrião das sementes nas épocas avaliadas (Tabela 1). Interação genótipo versus locais significativa já havia sido constatada para o teor de potássio e de cálcio em sementes de feijão (BARAMPAMA; SIMARD, 1993; MORAGHAN; GRAFTON, 2001).

A cultivar BRS Expedito apresentou maior teor de potássio no tegumento e no embrião das sementes, exceto na segunda época de cultivo, pois o contraste entre as duas cultivares não foi significativo para o teor de potássio no embrião das sementes (Tabela 1). No embrião das sementes de feijão se verificou a maior concentração de potássio na matéria seca, de 83,75% a 90,04% (Tabela 2). Este resultado pode ser justificado pelo fato de que o

potássio apresenta elevada mobilidade na planta e na semente (HOCKING; PATE, 1977) e dessa forma, acumulando-se em grande quantidade no embrião da semente.

Tabela 1. Teores de potássio e de cálcio (g kg^{-1}) no tegumento e no embrião de sementes de duas cultivares de feijão. Santa Maria - RS, UFSM, 2010

Fração	Cultivar	Potássio	Cálcio
g kg^{-1}			
Época 1			
Tegumento	BRS Expedito (a)	2,97	10,58
	Carioca (b)	1,77	9,63
	a – b	1,20*	0,95 ^{ns}
Embrião	BRS Expedito (a)	17,70	0,35
	Carioca (b)	15,93	0,43
	a – b	1,77*	-0,08 ^{ns}
Época 2			
Tegumento	BRS Expedito (a)	3,30	11,67
	Carioca (b)	2,37	8,94
	a – b	0,93*	2,73*
Embrião	BRS Expedito (a)	16,97	0,39
	Carioca (b)	16,10	0,47
	a – b	0,87 ^{ns}	-0,08 ^{ns}

*Significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ^{ns}: não significativo. Época 1: safra 2007/2008. Época 2: safra 2008/2009.

No tegumento das sementes, o teor de potássio variou de 9,96% a 16,25% (Tabela 2). Resultado semelhante foi observado por Moraghan; Grafton (2002), em duas cultivares de feijão do grupo gênico Mesoamericano e de tegumento preto, avaliadas em dois locais em Dakota do Norte, que apresentaram apenas 8% do potássio no tegumento das sementes.

As cultivares BRS Expedito e Carioca diferiram apenas para o teor de cálcio no tegumento das sementes, na segunda época de cultivo (Tabela 1). Mais de 94% do teor de cálcio concentraram-se no tegumento das sementes de feijão (Tabela 2). Esse valor é superior aos 80% de cálcio localizados no tegumento das sementes de três cultivares de feijão (MORAGHAN et al., 2002) e aos 84% de cálcio determinados na matéria seca do tegumento de sementes de duas cultivares de feijão (MORAGHAN; GRAFTON, 2002).

Apenas 3,23% a 5,10% do cálcio foram encontrados no embrião das sementes de feijão (Tabela 2). Isso ocorreu porque o movimento do cálcio entre o tegumento e o embrião (cotilédones e eixo embrionário) é restrito em feijão, provavelmente pela presença de cristais de oxalato de cálcio insolúveis no tegumento de sementes maduras (MORAGHAN;

ETCHEVERS; PADILHA, 2006). Portanto, a migração do cálcio para o interior da semente de feijão foi limitada.

A acumulação dos minerais ocorreu de maneira diferenciada no tegumento e no embrião das sementes de feijão, pois mais de 80% do potássio localizaram-se no embrião e mais de 94% do cálcio concentraram-se no tegumento das sementes de feijão (Tabelas 1 e 2). Essas informações precisam ser consideradas na interpretação do valor nutricional do feijão processado, pois se o tegumento for removido durante o cozimento, a quantidade de cálcio será drasticamente reduzida. Também é importante considerar que tegumento e cotilédones são tecidos que estão presentes em gerações diferentes (RAMALHO; SANTOS; PINTO, 2008) e isso terá implicações na seleção e na condução de populações segregantes em programas de melhoramento.

Tabela 2. Porcentagem de matéria seca (MS) e porcentagem dos teores de potássio e de cálcio no tegumento e no embrião de sementes de duas cultivares de feijão. Santa Maria - RS, UFSM, 2010

Fração	Cultivar	MS	Potássio	Cálcio
			%	
----- Época 1 -----				
Tegumento	BRS Expedito (a)	10,0	14,33	96,76
	Carioca (b)	8,48	9,96	95,76
	a – b	1,52*	4,37*	1,00 ^{ns}
Embrião	BRS Expedito (a)	90,00	85,67	3,24
	Carioca (b)	91,52	90,04	4,24
	a – b	-1,52*	-4,37*	-1,00 ^{ns}
----- Época 2 -----				
Tegumento	BRS Expedito (a)	9,95	16,25	96,77
	Carioca (b)	8,41	12,81	94,90
	a – b	1,54*	3,44*	1,87*
Embrião	BRS Expedito (a)	90,04	83,75	3,23
	Carioca (b)	91,58	87,19	5,10
	a – b	-1,54*	-3,44*	-1,87*

*Significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t.. ^{ns}: não significativo. Época 1: safra 2007/2008. Época 2: safra 2008/2009.

2. Efeito materno na expressão do teor de potássio

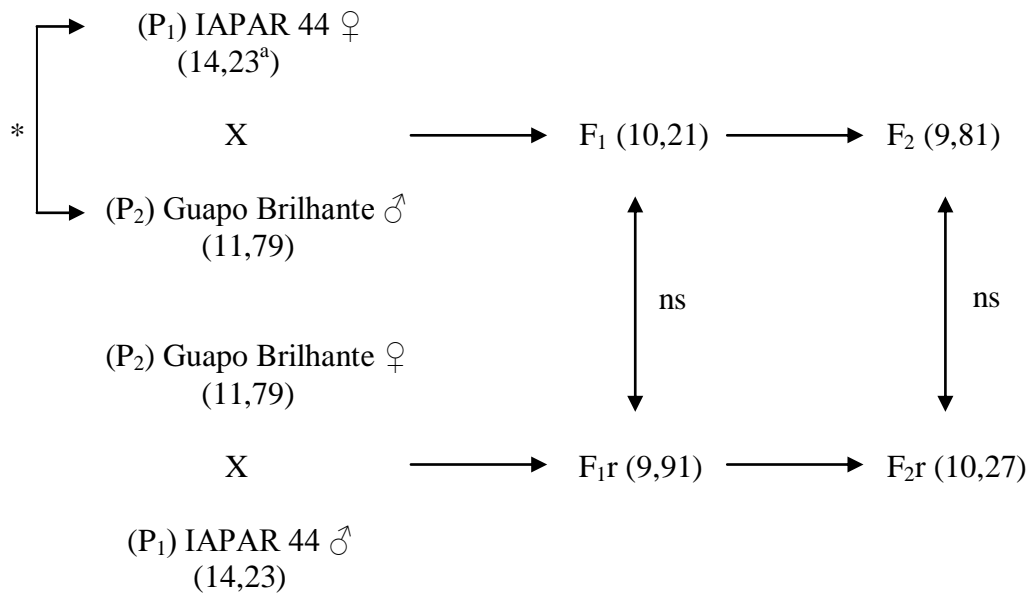
Nos cruzamentos entre as cultivares IAPAR 44 x Guapo Brillhante e BRS Expedito x BRS Valente, o contraste P₁ vs P₂ foi significativo (Figura 1). Assim, os genitores foram contrastantes, nos dois cruzamentos, possibilitando a obtenção de gerações precoces com variabilidade genética para o teor de potássio nas sementes de feijão.

Não foi observada a manifestação de efeito materno na expressão do teor de potássio em sementes de feijão, pois o contraste F_1 vs F_1 recíproco não foi significativo, nos dois cruzamentos. Isso ocorreu porque mais de 80% do potássio concentraram-se no embrião das sementes de feijão (Tabela 2). Moraghan; Grafton (2002), também, constataram que o potássio se localizou, principalmente, no embrião das sementes de feijão. Portanto, o teor de potássio em sementes de feijão é dependente dos cotilédones e a geração F_1 representou o produto da fecundação entre os genitores selecionados.

Não foi constatada diferença significativa para o contraste F_2 vs F_2 recíproco, nos dois cruzamentos, reforçando que os fenótipos destas sementes foram semelhantes para o teor de potássio e que representaram a expressão do genótipo das gerações F_1 e F_1 recíproco, respectivamente. Por conseguinte, as sementes F_2 obtidas apresentaram embrião na geração F_2 e, por isso, a seleção para maior teor de potássio deverá ser iniciada nessa geração, que apresentou ampla variabilidade genética. Rosa (2009), avaliando a genética do teor de fósforo em feijão, também, não observou efeito materno significativo e a seleção de sementes F_2 (cotilédones na geração F_2), colhidas de uma única planta, foi eficiente. O fósforo, à semelhança do potássio, concentrou-se, predominantemente, no embrião das sementes de feijão (MORAGHAN; GRAFTON, 2002).

Por sua vez, efeito materno significativo foi observado para o teor de cálcio em sementes de feijão (JOST et al., 2009a). O teor de cálcio é dependente do tegumento, pois mais de 80% do cálcio foram localizados no tegumento das sementes de feijão (MORAGHAN et al., 2002; MORAGHAN; GRAFTON, 2002). Por isso, a seleção para maior teor de cálcio somente deverá ser realizada em sementes F_3 (cotilédones na geração F_2), quando segregação será verificada. Portanto, a geração dos cotilédones definirá a geração segregante e o início da seleção para maior teor de minerais em sementes de feijão.

Cruzamento 1



Cruzamento 2

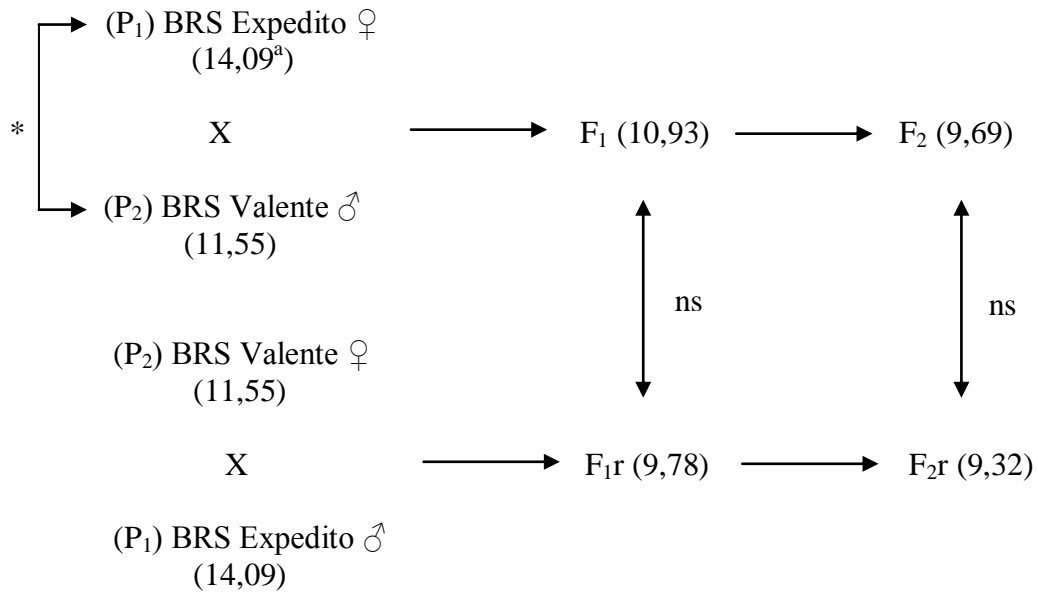


Figura 1. Genitores (P₁ e P₂) e gerações F₁, F₁ recíproco, F₂, F₂ recíproco e seus respectivos teores médios de potássio nas sementes e teste de significância dos contrastes P₁ vs P₂, F₁ vs F₁ recíproco (F_{1r}) e F₂ vs F₂ recíproco (F_{2r}) obtidos no cruzamento 1 (IAPAR 44 x Guapo Brillhante) e no cruzamento 2 (BRS Expedito x BRS Valente). Santa Maria - RS, UFSM, 2010

^a= Teor de potássio (g kg⁻¹ de MS); * = contraste significativo; ^{ns}= contraste não significativo.

3. Herdabilidade e ganho por seleção

Como não se observou expressão de efeito materno significativo para o teor de potássio em sementes de feijão, as repetições obtidas para as gerações F_2 e F_2 recíproco, para uma mesma combinação híbrida, foram somadas e 24 repetições foram consideradas para a estimação dos parâmetros genéticos.

O teor de potássio variou de 6,00 g kg⁻¹ de MS (planta F_2 do cruzamento BRS Expedito x BRS Valente) a 14,90 g kg⁻¹ de MS (valor máximo obtido nos genitores do cruzamento IAPAR 44 x Guapo Brilhante) (Tabela 3). Esses valores foram superiores aos verificados em Burundi (BARAMPAMA; SIMARD, 1993), porém foram inferiores aos valores observados em genótipos avaliados no Brasil (ESTEVES, 2000; MESQUITA et al., 2007).

A obtenção de plantas com teores de potássio inferiores nas gerações F_1 e F_2 , a partir dos cruzamentos realizados entre as cultivares IAPAR 44 x Guapo Brilhante e BRS Expedito x BRS Valente (Tabela 3), caracteriza dominância para baixo teor de potássio em sementes de feijão. Dominância parcial para baixo teor de proteína bruta (POLIGNANO, 1982) e de cisteína já foram descritas em feijão (RIBEIRO et al., 2009). Provavelmente, efeitos epistáticos podem estar atuando sobre a expressão do teor de potássio e esse fato pode resultar em dificuldades para a seleção de genótipos com melhor qualidade nutricional. Isso porque a variância epistática se refere à interação entre alelos de diferentes locos, a qual pode ser detectada, erroneamente por métodos estatísticos, como uma variância aditiva (HOLLAND, 2001).

Na decomposição da variância fenotípica, houve predominância dos efeitos ambientais no cruzamento IAPAR 44 x Guapo Brilhante (Tabela 3). Como a variância de ambiente foi responsável pela maior parte da variância fenotípica detectada, estimativa de herdabilidade de moderada magnitude foi obtida em sentido amplo ($h^2_a = 44,08\%$). Em sentido restrito, herdabilidade de baixa magnitude ($h^2_r = 33,26\%$) foi constatada, em razão da variância aditiva não constituir a totalidade da variância genética e os efeitos da variância de ambiente também serem expressivos. Portanto, a seleção de germoplasma de feijão com alto teor de potássio nas sementes pode ser demasiadamente difícil na população obtida, a partir desse cruzamento.

Tabela 3. Médias dos genitores (P_1 e P_2) e das gerações F_1 , F_2 , retrocruzamento 1 (RCP_1) e retrocruzamento 2 (RCP_2), com base na geração dos cotilédones, e seus respectivos desvios-padrão, parâmetros genéticos e predição de ganhos por seleção para o teor de potássio em sementes de feijão nos cruzamentos IAPAR 44 x Guapo Brilhante e BRS Expedito x BRS Valente. Santa Maria - RS, UFSM, 2010

Gerações	Teor de potássio (g kg^{-1} MS)	
	IAPAR 44 x Guapo Brilhante	BRS Expedito x BRS Valente
P_1	14,23 \pm 0,06	14,09 \pm 0,02
P_2	11,79 \pm 0,25	11,55 \pm 0,04
F_1	10,21 \pm 0,77	10,93 \pm 0,32
F_2	10,52 \pm 0,13	9,85 \pm 0,13
RCP_1	12,40 \pm 0,36	11,34 \pm 0,59
RCP_2	12,38 \pm 0,30	12,34 \pm 0,21
Média	11,03	10,69
CVe (%)	16,83	13,25
Variância fenotípica (σ^2_P)	3,22	3,17
Variância de ambiente (σ^2_E)	1,80	0,64
Variância genética (σ^2_G)	1,42	2,53
Variância aditiva (σ^2_A)	1,07	1,36
Herdabilidade ampla (h^2_a)	44,08	79,97
Herdabilidade restrita (h^2_r)	33,26	43,05
Heterose (H%)	-21,50	-14,74
Heterobeltiose (HT%)	-28,21	-22,44
Valor máximo nos genitores	14,90	14,40
Valor mínimo nos genitores	10,50	11,05
Valor máximo na F_2	14,30	13,80
Valor mínimo na F_2	6,80	6,00
Plantas selecionadas na F_2	10, 22, 4, 18, 8 e 7	5, 24, 9, 11, 2 e 15
Média original na F_2	10,52	9,85
Média das plantas selecionadas	13,05	12,28
Diferencial de seleção (DS)	2,52	2,43
Ganho por seleção (ΔG)	0,84	1,05
Ganho por seleção ($\Delta G\%$)	7,98	10,65
Média predita para o primeiro ciclo após a seleção	11,36	10,90

Por outro lado, no cruzamento BRS Expedito x BRS Valente os efeitos da variância genética foram mais expressivos. Como a proporção entre a variância genética e a variância fenotípica expressa a herdabilidade em sentido amplo (BORÉM; VIEIRA, 2009), valor considerado alto para essa estimativa foi obtido (79,97%). Já, em sentido restrito, estimativa de moderada magnitude (43,05%) foi observada, pois a variância aditiva constituiu, praticamente, a metade do valor da variância genética. No melhoramento de plantas

autógamas, a variância aditiva é de grande importância, posto que não segrega de geração para geração, possibilitando o êxito na seleção em populações segregantes (CARVALHO et al., 2001). Nesse caso, o Método Genealógico ou o Descendente de uma Única Semente (SSD) são promissores para a condução das populações segregantes obtidas nesse cruzamento.

Trabalhos de estimação da herdabilidade do teor de potássio em sementes de feijão não foram encontrados na literatura. Para o teor de fósforo em feijão, herdabilidade em sentido restrito de baixa (21,37% para TPS Nobre x Guapo Brilhante) a alta magnitude (65,54% para Pérola x Guapo Brilhante) foi verificada (ROSA, 2009). Para o teor de cálcio, estimativas de herdabilidade em sentido restrito de moderada (47,00%) a alta (63,61%) foram obtidas nos cruzamentos Pérola x TPS Bonito e TPS Bonito x BRS Expedito, respectivamente (JOST et al., 2009a). Como a herdabilidade não é uma característica fixa, variações podem ocorrer em função da população avaliada, da característica selecionada e da variabilidade genética (BORÉM; VIEIRA, 2009).

Se a herança quantitativa predomina na manifestação do caráter, se espera dificuldades para a seleção em virtude da baixa herdabilidade, do grande número de genes e do pronunciado efeito do ambiente na expressão do caráter. Acredita-se que o teor de potássio em feijão apresente herança quantitativa, em função do pronunciado efeito da variância do ambiente observado no presente estudo (Tabela 3). Um estudo mais aprofundado dos efeitos gênicos e do número de genes que controlam o teor de potássio não pode ser realizado devido à baixa eficiência obtida nos cruzamentos dirigidos, o que resultou num número extremamente reduzido de repetições para as gerações F_2 e de retrocruzamentos (RCP_1 e RCP_2).

Com relação à heterose, foram observados valores negativos, nos dois cruzamentos (Tabela 3). Assim, a média da geração F_1 foi inferior a média dos genitores e, estimativas negativas foram constatadas, podendo ser atribuída a hipótese da sobredominância para o teor de potássio em sementes de feijão. Como o feijão é uma planta autógama, se espera que a heterose seja reduzida à metade em cada geração de autofecundação e, por isso, a geração F_3 poderá apresentar média inferior à geração F_2 , devido ao aumento da homozigose. Por isso, a avaliação em gerações avançadas se faz necessária para se investigar como será a segregação para esse caráter.

O ganho por seleção foi estimado utilizando uma pressão de seleção de 25%. Diferencial de seleção de 2,52 g kg⁻¹ foi obtido para o cruzamento IAPAR 44 x Guapo Brilhante e de 2,43 g kg⁻¹ para o cruzamento BRS Expedito x BRS Valente, com ganhos

esperados 7,98% e de 10,65%, respectivamente. Como dominância para baixo teor de potássio foi observada, a expectativa é de que os ganhos por seleção sejam de baixa magnitude.

Plantas F₂ foram obtidas com teores de potássio inferiores aos valores determinados nos genitores utilizados, caracterizando segregação transgressiva (Tabela 3). Assim, gerações segregantes com baixo teor de potássio poderão ser constatadas, a partir da seleção dessas plantas. Quando há o diagnóstico de comprometimento renal, Louis; Dolan (1970) recomendaram a restrição de potássio na alimentação. Nesse caso, a utilização de cultivares de feijão com baixo teor de potássio poderá apresentar benefícios à saúde.

A partir dos cruzamentos realizados entre as cultivares IAPAR 44 x Guapo Brilhante e BRS Expedito x BRS Valente, não foi possível aumentar o teor de potássio em sementes de feijão, por recombinação e seleção. Todavia, plantas F₂ com altos teores de potássio, semelhantes aos genitores IAPAR 44 e BRS Expedito foram observadas (Tabela 3). Como o feijão é menos calórico do que a banana e possui baixo teor de gordura e de sódio e não contém colesterol (HOSFIELD, 1991; MORROW, 1991) a utilização do germoplasma selecionado, como parte integrante de uma alimentação balanceada, poderá contribuir para minimizar os problemas de má nutrição, relatados por Mahan; Escott-stump (1998). Também, poderá constituir numa alternativa alimentar para pessoas que praticam atividade física intensa e, por isso, requerem teores mais elevados de potássio na dieta (LINDINGER, 1995).

Face ao exposto, o melhoramento genético poderá ser utilizado para o desenvolvimento de cultivares de feijão com teores de potássio adequados para satisfazer requerimentos nutricionais diferenciados. Também poderá contribuir para a sustentabilidade da agricultura, pela economia de recursos não renováveis e de alto custo. Apesar das dificuldades que podem ser antevistas, devido aos efeitos da variância do ambiente serem expressivos, as perspectivas, para a melhora da qualidade de vida da população, são grandes.

CONCLUSÕES

1. As cultivares de feijão BRS Expedito e Carioca apresentam mais de 80% do potássio no embrião e mais de 94% do cálcio no tegumento das sementes.

2. A partir dos cruzamentos dirigidos realizados entre as cultivares IAPAR 44 x Guapo Brillhante e BRS Expedito x BRS Valente, conclui-se que:

- não ocorre efeito materno significativo na expressão do teor de potássio em sementes de feijão;
- o teor de potássio em sementes de feijão apresenta herdabilidade em sentido restrito de baixa (33,26%) a moderada magnitude (43,05%);
- a seleção de germoplasma de feijão com alto teor de potássio nas sementes poderá ser dificultada devido ao pronunciado efeito da variância de ambiente.

CAPÍTULO 2

DISTRIBUIÇÃO DE MICROMINERAIS E GENÉTICA DO TEOR DE COBRE EM SEMENTES DE FEIJÃO

TRACE ELEMENT DISTRIBUTION AND GENETIC COPPER CONTENT IN COMMON BEAN SEEDS

RESUMO

O feijão destaca-se como uma excelente fonte de microminerais para utilização na alimentação. Assim, os objetivos desse trabalho foram investigar a acumulação de cobre, ferro e zinco no tegumento e no embrião das sementes de feijão, verificar a existência de efeito materno na expressão do teor de cobre em sementes de feijão e obter estimativas de herdabilidade e de ganho por seleção em gerações precoces. Os minerais foram determinados no tegumento e no embrião de sementes das cultivares BRS Expedito e Carioca, obtidas em duas épocas de cultivo. Os cruzamentos dirigidos foram efetuados entre as cultivares IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito, obtendo-se as gerações F₁, F₁ recíproco, F₂, F₂ recíproco e retrocruzamentos (RCP₁ e RCP₂), para cada combinação híbrida. Os teores dos microminerais (cobre, ferro e zinco) foram determinados por digestão nítrica-perclórica e leitura em espectrofotômetro de absorção atômica. Mais de 64% do cobre e mais de 68% do zinco se concentraram no embrião e de 51,06% a 60,12% do ferro se localizaram no tegumento das sementes de feijão das cultivares BRS Expedito e Carioca, respectivamente. Não foi observada manifestação de efeito materno significativo para o teor de cobre em sementes de feijão. Estimativas de herdabilidade, alta em sentido amplo, de 71,90% e de 79,65% e, moderada a alta, em sentido restrito, de 51,98% e de 61,99% foram obtidas nos cruzamentos IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito, respectivamente. Segregação transgressiva foi constatada em gerações precoces, sendo possível aumentar em 46,78% o teor de cobre em sementes de feijão, por melhoramento genético.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., embrião, herdabilidade, ganho por seleção, efeito materno.

ABSTRACT

Common bean stands out as an excellent source of trace minerals for use in food. Thus, the objectives of this were to investigate the accumulation of copper, iron, and zinc in the seed coat and embryo of bean seeds, evaluate maternal effects on expression of copper content in common bean seeds and to estimate heritability and gain from selection in early generations. The minerals were determined in the seed coat and embryo of seeds of BRS Expedito and Carioca cultivars, obtained in two growing seasons. The crosses were made between IAPAR 44 x IAPAR 31 and Diamante Negro x TPS Bonito, resulting in F₁, F₁ reciprocal, F₂, F₂ reciprocal and backcrosses (RCP₁ and RCP₂) generations for each hybrid combination. The levels of trace minerals (copper, iron and zinc) were determined by nitric-perchloric digestion and evaluated by atomic absorption spectrophotometer. More than 64% of copper and more than 68% of zinc were concentrated in the embryo and 51.06% to 60.12% of the iron were located in the seed coat of the common bean seeds of BRS Expedito and Carioca cultivars. There was no demonstration of significant maternal effect for copper content in common bean seeds. Estimates of heritability, high in the broad sense, 71.90% and 79.65%, and moderate to high in the narrow sense of 51.98% and 61.99% were obtained in IAPAR 44 x IAPAR 31 crossing. Transgressive segregation was observed in early generations, it is possible to increase 46.78% copper content in common bean seeds for breeding.

Key-words: *Phaseolus vulgaris* L., embryo, heritability, gain by selection, maternal effect.

INTRODUÇÃO

Na região sul do Brasil, há registros de solos com quantidades disponíveis de cobre insuficientes para a produção agrícola (LUCHESE; BOHNEN, 1987). O suprimento de cobre pode ser feito no solo, na planta (foliar) ou nas sementes. As três formas de aplicação de cobre proporcionaram alto rendimento de grãos para a cultura da soja (GALRÃO, 1999). Entretanto, quando o cobre foi aplicado nas sementes de milho, se observou redução na germinação, devido a problemas de fitotoxicidade (RIBEIRO; SANTOS, 1993). Não foram encontrados trabalhos de suplementação com cobre em feijão.

O uso de cobre na agricultura pode afetar a qualidade do solo e a saúde da população, devido ao acúmulo de metais pesados, como constatado na Itália (MANTOVI et al., 2003). Isso pode ocorrer porque há um limite estreito entre a necessidade e o excesso de cobre, dificultando o reconhecimento da deficiência ou da toxicidade desse mineral no solo (FERREIRA; CRUZ, 1983). Nesse contexto, o aumento do teor de cobre em sementes de feijão por melhoramento genético é importante para a sustentabilidade da agricultura e para a qualidade de vida das pessoas.

O aumento do teor de cobre em sementes de feijão é importante para a saúde humana. Isso porque esse micronutriente é essencial para o perfeito funcionamento do sistema imunológico, para o transporte do ferro, para o metabolismo da glicose e do colesterol, para a contractilidade miocárdica, para o desenvolvimento cerebral e é componente de várias enzimas (CUNHA; CUNHA, 1998). Por isso, se recomenda a ingestão diária de 1,5 a 3,0 mg de cobre dia⁻¹ para satisfazer os requerimentos nutricionais de adolescentes e de adultos (MAHAN; ESCOTT-STUMP, 1998). Considerando que o teor médio de cobre em sementes de feijão é de 7,5 mg kg⁻¹ de MS, ao ser consumida uma porção média de cerca de 50 gramas de feijão cozido, aproximadamente, 19% das necessidades diárias de cobre de um homem adulto são supridas (ANDRADE et al., 2004). Esses autores observaram que o feijão preto, quando comparado às sementes de diferentes colorações de tegumento, apresentou os maiores valores de cobre (9,9 mg kg⁻¹ de MS) em amostras cruas e o teor de cobre manteve-se alto, após o cozimento (9,2 mg kg⁻¹ de MS).

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) apresenta alto teor de cobre nas sementes e variabilidade genética tem sido verificada. Na coleção do Centro Internacional de Agricultura

Tropical (CIAT), na Colômbia, foi constatado teor médio de cobre de 9,00 mg kg⁻¹ de matéria seca (MS) e o valor máximo obtido foi de 14,00 mg kg⁻¹ de MS, em 1031 acessos de feijão cultivado (BEEBE; GONZALEZ; RENGIFO, 2000). Valores similares foram observados em Burundi, com variação de 7,00 a 12,80 mg kg⁻¹ de MS (BARAMPAMA; SIMARD, 1993) e, no Brasil, de 11,37 a 17,73 mg kg⁻¹ MS (MESQUITA et al., 2007). Variabilidade genética para os teores de outros micronutrientes também foi obtida em sementes de feijão, proporcionando incrementos de 94% no teor de ferro (JOST et al., 2009b) e de 37,26% no teor de zinco (ROSA, 2009), por melhoramento genético. Não há registro de incremento do teor de cobre nas sementes de feijão via recombinação genética e seleção.

O tegumento da semente de feijão representa, em média, 9% da matéria seca total, os cotilédones, 90%, e o eixo embrionário, apenas 1% (MESQUITA, 1989). A acumulação dos minerais ocorre de maneira diferenciada nesses tecidos. Moraghan; Grafton (2002) observaram 93% do zinco, 76% do ferro e 16% do cálcio acumulados no embrião das sementes de feijão. O tegumento é um tecido de origem materna e o embrião (cotilédones e eixo embrionário) é oriundo da fecundação (RAMALHO; SANTOS; PINTO, 2008). Como esses tecidos estão presentes em gerações diferentes, isso terá implicações na seleção e na condução de populações segregantes em programas de melhoramento.

O teor de zinco em sementes de feijão não apresentou efeito materno significativo (ROSA, 2009). Isso porque o zinco foi dependente dos cotilédones e, por isso, as sementes da geração F₁ representaram o produto do cruzamento entre os genitores. Portanto, a seleção foi iniciada em sementes F₂ (cotilédones na geração F₂), pois ampla variabilidade genética foi constatada nessa geração. Entretanto, efeito materno significativo foi observado para o teor de ferro em sementes de feijão (JOST et al., 2009b). Nesse caso, a expressão genética do cruzamento somente foi observada em sementes F₂ (cotilédones na geração F₁) e a seleção foi realizada em sementes F₃ (cotilédones na geração F₂), quando segregação máxima foi constatada.

A concentração de ferro no tegumento varia, amplamente, entre as sementes de feijão de diferentes colorações (MORAGHAN et al., 2002). Por isso, o teor de ferro pode ser dependente do tegumento, como observado por Jost et al. (2009b), ou do embrião, como sugere a interpretação dos teores de ferro observados em sementes de duas cultivares de feijão, do grupo Mesoamericano (MORAGHAN; GRAFTON, 2002). Com relação ao cobre, não se encontrou informações quanto à concentração no embrião ou no tegumento das sementes de feijão, à expressão de efeito materno, à herdabilidade e ao ganho por seleção.

Esse conhecimento é relevante para a definição de estratégias de melhoramento para o desenvolvimento de cultivares de feijão com maior teor de cobre nas sementes.

Face ao exposto, os objetivos desse trabalho foram: (1) confirmar a acumulação diferencial de cobre, ferro e zinco no tegumento e no embrião das sementes de feijão; (2) investigar a existência de efeito materno na expressão do teor de cobre em sementes de feijão, a partir dos cruzamentos dirigidos entre as cultivares IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito; e (3) obter estimativas de herdabilidade e de ganho por seleção em gerações precoces.

MATERIAL E MÉTODOS

Sementes de duas cultivares de feijão BRS Exedito (grupo comercial preto) e Carioca (tipo carioca), ambas do grupo gênico Mesoamericano, foram utilizadas no experimento de determinação dos teores de microminerais no tegumento e no embrião (cotilédones e eixo embrionário) das sementes. As sementes foram obtidas de experimentos conduzidos em campo, em duas safras agrícolas (2007/2008 e 2008/2009). O solo utilizado foi caracterizado como um Argissolo Bruno-Acinzentado alítico típico, com a seguinte composição química média: pH (H₂O): 6,5; matéria orgânica: 2%; fósforo: 14,4 mg dm⁻³; potássio: 40 mg dm⁻³; enxofre: 17,6 mg dm⁻³; cálcio: 5,2 cmol_c dm⁻³; magnésio: 2,1 cmol_c dm⁻³; cobre: 0,2 mg dm⁻³; zinco: 0,6 mg dm⁻³.

O solo foi preparado de maneira convencional e a adubação foi realizada de acordo com a interpretação da análise química do solo. O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados, com três repetições. A parcela foi constituída de duas linhas de 4 m de comprimento, espaçadas de 0,50 m, e uma área útil de 4 m². O controle de insetos e de plantas invasoras foi efetuado sempre que necessário, de modo que a cultura não sofresse competição. O controle de doenças não foi realizado.

A colheita e a trilha das plantas foram realizadas manualmente na maturação. Após a retirada das sementes quebradas e com rachaduras, as sementes foram secadas em estufa (65 a 70 °C) até 13% de umidade média. Na sequência, 50 sementes de cada cultivar foram dispostas entre duas folhas de papel toalha que foram levemente umedecidas com água destilada, por meio de um borrifador manual, permanecendo assim, por um período de 24 horas, à temperatura ambiente (18 °C ± 2 °C). A separação do tegumento foi realizada

manualmente, com o auxílio de uma faca, para facilitar o rompimento inicial do tegumento. Após a separação, as frações tegumento e embrião foram, novamente, secados em estufa (65°C a 70 °C), até peso constante.

As amostras foram moídas em micromoinho até a obtenção de partículas inferiores a 1 mm de diâmetro. Amostras de 0,5 g da farinha de feijão cru, de cada uma das frações obtidas, foram digeridas em 5 ml da solução nítrica-perclórica (HNO₃ + HClO₄, na proporção volumétrica de 5:1). Após 12 horas de digestão a frio (sem aquecimento), a temperatura foi elevada, lentamente, a cada 30 minutos em 30 °C, até atingir 180 °C. Ao final da digestão, quando restava, aproximadamente, 1 ml da solução com coloração transparente, se procedeu a diluição, adicionando água destilada até completar 50 ml, de acordo com a metodologia descrita em Miyazawa et al. (1999). Em, aproximadamente, 20 ml dessa diluição foi realizada a leitura dos teores de microminerais em espectrofotômetro de absorção atômica, marca Perken Elmer®, modelo Analyst 200®, utilizando um comprimento de onda de 324,8 nm para o cobre, de 248,3 nm para o ferro e de 213,9 nm para o zinco.

O estudo da genética do teor de cobre foi realizado por meio de cruzamentos dirigidos entre as cultivares IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito. Esses cruzamentos foram conduzidos em casa-de-vegetação do Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. As cultivares pertencem ao grupo gênico Mesoamericano e integram o Banco de Germoplasma de Feijão da UFSM e foram selecionadas com base no teor de cobre e no seu valor agrônomico. As cultivares IAPAR 44 e Diamante Negro pertencem ao grupo comercial preto e possuem hábito de crescimento indeterminado, com guias curtas (tipo II). As cultivares IAPAR 31 e TPS Bonito são do grupo comercial de cor, tipo carioca, e apresentam hábito de crescimento indeterminado, com guias longas (tipo III) (BRASIL, 2009).

O método de entrelaçamento, com emasculação prévia do botão floral (PETERNELLI; BORÉM; CARNEIRO, 2009), foi utilizado para a obtenção das sementes F₁ (♀ P₁ x ♂ P₂) e F₁ recíproco (♀ P₂ x ♂ P₁), durante o outono-inverno de 2008. Parte dessas sementes foram semeadas na primavera-verão de 2008, obtendo-se as sementes F₂ (autofecundação natural das plantas F₁), F₂ recíproco (autofecundação natural das plantas F₁ recíproco), retrocruzamento 1 (RCP₁: ♀ F₁ x ♂ P₁) e retrocruzamento 2 (RCP₂: ♀ F₁ x ♂ P₂). No outono-inverno de 2009, foram obtidas as gerações F₃ (autofecundação natural das plantas F₂), F₃ recíproco (autofecundação natural das plantas F₂ recíproco) e retrocruzamentos de segunda geração (autofecundação natural das plantas retrocruzadas: RCP₁ e RCP₂), para serem utilizadas na obtenção das estimativas de herdabilidade e de ganho por seleção, caso fosse

constatado efeito materno. O processo foi repetido no outono-inverno de 2009, para possibilitar a avaliação de sementes das gerações F_1 , F_1 recíproco, F_2 , F_2 recíproco e retrocruzamentos (RCP_1 e RCP_2), nas mesmas condições de cultivo.

As plantas foram cultivadas em vasos plásticos com capacidade de 5 litros, com duas plantas por vaso. Foi utilizada uma mistura de solo + casca de arroz carbonizada + substrato comercial Plantmax® na proporção volumétrica de 2:1:1. O solo utilizado pertence à Unidade de Mapeamento São Pedro, sendo um Argissolo Bruno-Acinzentado alítico típico, com a mesma composição química do experimento conduzido em campo. A correção da fertilidade e a aplicação de nitrogênio em cobertura foram efetuadas com base na análise química do solo. A demanda hídrica das plantas foi suprida por irrigações, de forma que a umidade do solo fosse mantida próxima à capacidade de campo. O controle de pragas e de doenças foi realizado com a aplicação de produtos químicos, sempre que necessário, mantendo-se a sanidade das plantas e a integridade dos botões florais.

Ao final do ciclo da cultura, as sementes de cada geração obtida foram colhidas e secadas em estufa (65 a 70 °C) até atingir 13% de umidade média. As amostras foram moídas e o teor de cobre foi determinado na farinha de feijão cru por meio de digestão nítrica-perclórica, de acordo com a metodologia descrita em Miyazawa et al. (1999).

O experimento de determinação dos teores de cobre, de ferro e de zinco nas diferentes frações das sementes de feijão (tegumento e embrião) foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições de 50 sementes. Efetuou-se a comparação das médias pelo teste t a 5% de significância para os contrastes entre as épocas de cultivo e entre as cultivares (dentro de cada época de cultivo).

O delineamento adotado para o estudo da genética do teor de cobre foi o inteiramente casualizado, considerando cinco repetições para os genitores e as gerações F_1 e F_1 recíproco e 12 repetições para as gerações F_2 e F_2 recíproco. Para testar a hipótese de efeito materno, efetuou-se a comparação entre as médias pelo teste t a 5% de significância para os contrastes P_1 vs P_2 , F_1 vs F_1 recíproco e F_2 vs F_2 recíproco.

As estimativas de herdabilidade foram obtidas com as variâncias dos genitores (P_1 e P_2) e das gerações F_1 , F_2 , RCP_1 e RCP_2 , com base na geração dos cotilédones, para cada

combinação híbrida. A herdabilidade foi estimada em sentido amplo $h_a^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_P^2}$ e, em sentido

restrito $h_r^2 = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_P^2}$, de acordo com o método dos retrocruzamentos proposto por Warner (1952).

Sendo que: variância aditiva: $\sigma^2_A = 2\sigma^2_{F_2} - (\sigma^2_{RCP_1} + \sigma^2_{RCP_2})$, variância fenotípica: $\sigma^2_P = \sigma^2_{F_2}$ e variância de ambiente em F_2 : $\sigma^2_E = 1/3(\sigma^2_{F_1} + \sigma^2_{P_1} + \sigma^2_{P_2})$.

A heterose na geração F_1 foi quantificada pela forma percentual, tanto para a relacionada com a média dos genitores ($H\% = \frac{F_1 - P}{P} \times 100$) quanto para a heterobeliose ($HT\% = \frac{F_1 - MP}{MP} \times 100$), considerando-se $P = \frac{P_1 + P_2}{2}$ e MP = melhor pai.

Para a predição de ganhos por seleção, foi considerada a seleção de 25% das plantas com sementes F_2 (cotilédones na geração F_2) com maior teor de cobre. O ganho esperado, considerando-se a seleção e a recombinação dos indivíduos superiores em plantas com sementes F_2 (cotilédones na geração F_2), foi estimado pela expressão: $\Delta G = DSxh_r^2$ e $\Delta G(\%) = \frac{\Delta G \times 100}{\bar{F}_2}$, em que DS é o diferencial de seleção, expresso por $\bar{X}_s - \bar{X}_0$, sendo \bar{X}_s = média das plantas selecionadas com sementes na geração F_2 e \bar{X}_0 = média das plantas com sementes na geração F_2 . Todas as análises foram realizadas com o auxílio da planilha eletrônica Office Excel e do programa Genes (CRUZ, 2006).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Teores de cobre, ferro e zinco no tegumento e no embrião das sementes de feijão

As cultivares BRS Expedito e Carioca apresentaram variação nos teores de ferro e de zinco no tegumento e no embrião das sementes, nas épocas avaliadas (Tabela 4). Para o cobre, o contraste entre as épocas de cultivo não foi significativo. Interação genótipo versus ambiente significativa foi constatada para os teores de cobre, de ferro e de zinco em sementes de feijão, quando cultivadas em diferentes locais em Burundi (BARAMPAMA; SIMARD, 1993).

O contraste entre as cultivares BRS Expedito e Carioca não foi significativo, dentro de cada época de avaliação, para o teor de cobre nas diferentes frações das sementes (tegumento e embrião) (Tabela 4). Portanto, os teores de cobre acumulados no tegumento e no embrião das sementes de feijão foram similares para as duas cultivares. No entanto, se verificou que a

maior concentração de cobre na matéria seca ocorreu no embrião, variando entre 64,38% a 74,23% (Tabela 5). No tegumento, o teor de cobre variou de 25,77% a 35,62%.

Tabela 4. Teores de cobre, ferro e zinco (mg kg^{-1}) no tegumento e no embrião de sementes de duas cultivares de feijão. Santa Maria - RS, UFSM, 2010

Fração	Cultivar	Cobre	Ferro	Zinco
		mg kg^{-1}		
Época 1				
Tegumento	BRS Expedito (a)	4,55	91,91	13,67
	Carioca (b)	5,90	61,62	10,41
	a – b	-1,35 ^{ns}	30,29 [*]	3,26 ^{ns}
Embrião	BRS Expedito (a)	13,44	60,88	29,83
	Carioca (b)	10,58	59,10	23,75
	a – b	2,86 ^{ns}	1,78 ^{ns}	6,08 [*]
Época 2				
Tegumento	BRS Expedito (a)	4,40	91,86	13,86
	Carioca (b)	5,42	77,55	11,93
	a – b	-1,02 ^{ns}	14,31 ^{ns}	1,93 ^{ns}
Embrião	BRS Expedito (a)	12,26	65,64	32,88
	Carioca (b)	9,77	63,15	26,35
	a – b	2,49 ^{ns}	2,49 ^{ns}	6,53 [*]

*Significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ^{ns}: não significativo. Época 1: safra 2007/2008. Época 2: safra 2008/2009.

A cultivar BRS Expedito apresentou maior teor de ferro no tegumento ($91,91 \text{ mg kg}^{-1}$ de MS) do que a cultivar Carioca ($61,62 \text{ mg kg}^{-1}$ de MS), na primeira época de cultivo (Tabela 4). A concentração de ferro no embrião das sementes não diferiu, pois o contraste entre as cultivares não foi significativo.

O teor de ferro variou de 51,06% a 60,12% na matéria seca do tegumento das sementes de feijão (Tabela 5). Por sua vez, Moraghan; Grafton (2002) constataram apenas 24% do ferro acumulado no tegumento das sementes de feijão de duas cultivares do grupo gênico Mesoamericano e de coloração preta. Já, Moraghan et al. (2002) observaram que o teor de ferro no tegumento de três cultivares de feijão, cultivadas em diferentes tipos de solo, variou de 6% a 40%. De acordo com esses autores, as sementes do grupo comercial preto acumularam mais ferro no tegumento em função da maior quantidade de taninos e isso foi justificado pelo fato de que esses compostos podem complexar o ferro. Por isso, a migração do ferro foi menor para o embrião das sementes de feijão. No presente trabalho, foram obtidos valores de 39,88% a 48,94% de ferro no embrião.

O teor de zinco foi similar no tegumento das sementes de feijão das duas cultivares, nas duas épocas de cultivo (Tabela 4). Entretanto, diferenças significativas foram obtidas para

o teor de zinco no embrião, sendo que a cultivar BRS Expedito se destacou pela maior migração do zinco para o embrião das sementes. Consequentemente, o zinco se concentrou, principalmente, no embrião das sementes de feijão, variando de 68,62% a 70,38% da MS (Tabela 5). Apenas 29,62% a 31,20% do zinco se localizaram no tegumento das sementes de feijão. Moraghan; Grafton (2002) e Moraghan et al. (2002), igualmente, verificaram baixa acumulação do zinco no tegumento das sementes de feijão.

Tabela 5. Porcentagem de matéria seca (MS) e porcentagem dos teores de cobre, ferro e zinco no tegumento e no embrião de sementes de duas cultivares de feijão. Santa Maria - RS, UFSM, 2010

Fração	Cultivar	MS	Cobre	Ferro	Zinco
%					
Época 1					
Tegumento	BRS Expedito (a)	10,00	25,77	60,12	31,38
	Carioca (b)	8,48	35,62	51,06	30,40
	a – b	1,51*	-9,85 ^{ns}	9,06*	0,98 ^{ns}
Embrião	BRS Expedito (a)	90,00	74,23	39,88	68,62
	Carioca (b)	91,52	64,38	48,94	69,60
	a – b	-1,52*	9,85 ^{ns}	-9,06*	-0,98 ^{ns}
Época 2					
Tegumento	BRS Expedito (a)	9,95	27,16	58,18	29,62
	Carioca (b)	8,41	35,50	55,48	31,20
	a – b	1,54*	-8,34 ^{ns}	2,70 ^{ns}	-1,58 ^{ns}
Embrião	BRS Expedito (a)	90,04	72,84	41,82	70,38
	Carioca (b)	91,58	64,50	44,52	68,80
	a – b	-1,54*	8,34 ^{ns}	-2,70 ^{ns}	1,58 ^{ns}

*Significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t.. ^{ns}: não significativo. Época 1: safra 2007/2008. Época 2: safra 2008/2009.

A acumulação dos minerais ocorreu de maneira diferenciada no tegumento e no embrião das sementes de feijão, pois mais de 64% do cobre e mais de 68% do zinco se concentraram no embrião, enquanto que 51,06% a 60,12% do ferro se localizaram no tegumento das sementes de feijão (Tabelas 4 e 5). Essas informações precisam ser consideradas na interpretação do valor nutricional do feijão processado, pois se o tegumento for removido durante o cozimento, a quantidade de ferro será drasticamente reduzida. Adicionalmente, é importante considerar que tegumento e cotilédones são tecidos que estão presentes em gerações diferentes em uma mesma semente (RAMALHO; SANTOS; PINTO, 2008) e isso terá implicações na seleção e na condução de populações segregantes em programas de melhoramento.

2. Efeito materno na expressão do teor de cobre em sementes de feijão

Os contrastes entre as cultivares IAPAR 44 (5,28 mg kg⁻¹ MS) x IAPAR 31 (3,49 mg kg⁻¹ MS) e Diamante Negro (4,36 mg kg⁻¹ MS) x TPS Bonito (1,60 mg kg⁻¹ MS) foram significativos (Figura 2). Portanto, os genitores utilizados foram contrastantes para o teor de cobre em sementes de feijão e foram obtidas gerações precoces com variabilidade genética.

As gerações F₁ e F₁ recíproco não diferiram significativamente entre si nos dois cruzamentos, demonstrando que não ocorreu expressão de efeito materno para o teor de cobre em sementes de feijão. Isso ocorreu porque mais de 64% do cobre se concentrou no embrião das sementes de feijão (Tabela 5). Portanto, o teor de cobre é dependente dos cotilédones e a geração F₁ representou o produto da fecundação entre os genitores selecionados. O teor de zinco em sementes de feijão, também, não apresentou expressão de efeito materno significativo (ROSA, 2009). O zinco, à semelhança do cobre, se acumulou, predominantemente, no embrião das sementes de feijão (MORAGHAN; GRAFTON, 2002; MORAGHAN et al., 2002).

No cruzamento IAPAR 44 x IAPAR 31, o contraste F₂ vs F₂ recíproco não foi significativo, reforçando que os fenótipos destas sementes foram semelhantes para o teor de cobre e que representaram a expressão do genótipo das gerações F₁ e F₁ recíproco, respectivamente. Por conseguinte, as sementes F₂ obtidas apresentaram embrião na geração F₂ e, em função disso, a seleção para maior teor de cobre deverá ser iniciada nessa geração, que apresentou ampla variabilidade genética. A seleção de sementes F₂ (cotilédones na geração F₂), colhidas de uma única planta, foi eficiente para o aumento do teor de zinco em feijão (ROSA, 2009).

Todavia, efeito materno significativo foi observado para o teor de ferro em sementes de feijão (JOST et al., 2009b). Nesse caso, o ferro foi dependente do tegumento das sementes e, por isso, a seleção somente foi realizada em sementes F₃ (cotilédones na geração F₂), quando foi verificada segregação. Como a acumulação do teor de ferro no tegumento das sementes de feijão pode variar com o genótipo (MORAGHAN et al., 2002), o ferro poderá ser dependente do embrião, como sugere a interpretação dos dados obtidos por Moraghan; Grafton (2002). Face ao exposto, o programa de melhoramento deverá investigar a presença ou a ausência de efeito materno para o teor de minerais, no germoplasma a ser submetido à seleção. A geração dos cotilédones deverá ser considerada inicialmente para se proceder, depois, a seleção para maior teor de minerais em sementes de feijão.

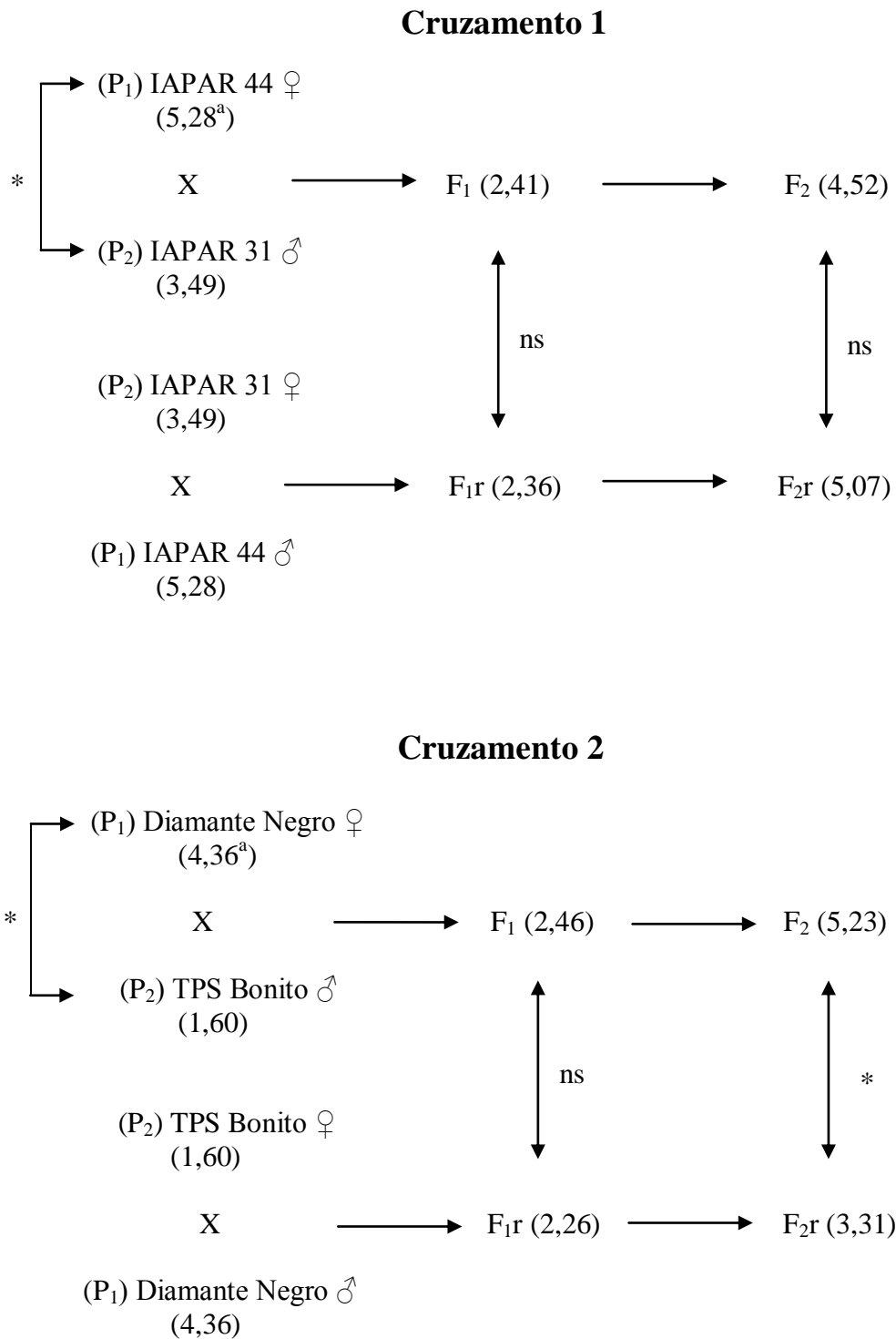


Figura 2. Genitores (P₁ e P₂) e gerações F₁, F₁ recíproco (F_{1r}), F₂, F₂ recíproco (F_{2r}) e seus respectivos teores médios de cobre nas sementes e teste de significância dos contrastes P₁ vs P₂, F₁ vs F₁ recíproco e F₂ vs F₂ recíproco obtidos no cruzamento 1 (IAPAR 44 x IAPAR 31) e no cruzamento 2 (Diamante Negro x TPS Bonito). Santa Maria - RS, UFSM, 2010

^a= Teor de cobre (mg kg⁻¹ de MS); *= contraste significativo; ns= contraste não significativo.

3. Herdabilidade e ganho por seleção

Como não se observou expressão de efeito materno significativo para o teor de cobre em sementes de feijão, as repetições obtidas para as gerações F_2 e F_2 recíproco, para uma mesma combinação híbrida, foram somadas e 24 repetições foram consideradas para a estimação dos parâmetros genéticos.

Os teores médios de cobre variaram de 1,60 mg kg⁻¹ (TPS Bonito) a 7,75 mg kg⁻¹ (planta F_2 do cruzamento IAPAR 44 x IAPAR 31) (Tabela 6). Os valores observados foram inferiores aos verificados em genótipos cultivados no Brasil (MESQUITA et al., 2007) e na Colômbia (BEEBE; GONZALEZ; RENGIFO, 2000), sendo, porém, semelhantes aos verificados em Burundi (BARAMPAMA; SIMARD, 1993).

Nos dois cruzamentos, se constatou a predominância dos efeitos genéticos em relação aos de ambiente, na decomposição da variância fenotípica (Tabela 6). Como consequência, foram obtidas estimativas de herdabilidade em sentido amplo de alta magnitude nos cruzamentos IAPAR 44 x IAPAR 31 (h^2_a : 71,90%) e Diamante Negro x TPS Bonito (h^2_a : 79,65%). Isso ocorreu porque a herdabilidade em sentido amplo considera a relação entre a variância genética e a variância fenotípica (BORÉM; VIEIRA, 2009). Quanto maior for essa relação, maior será a contribuição genética na determinação do valor fenotípico de um indivíduo (CARVALHO et al., 2001). Por isso, esperam-se maiores ganhos na seleção, pois foram expressivos os efeitos da variância genética.

Estimativas de herdabilidade em sentido restrito de moderada (h^2_r : 51,98%) a alta magnitude (h^2_r : 61,99%) foram observadas nos cruzamentos IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito, respectivamente. Como a variância aditiva foi responsável pela maior parte da variância genética, a fixação desse caráter poderá ser observada em gerações avançadas. No melhoramento genético do feijão, que é uma espécie autógama, a variância aditiva é de grande importância, pois não segrega de geração para geração, possibilitando o êxito na seleção em populações segregantes (CARVALHO et al., 2001). Por isso, os métodos Genealógico ou Descendente de uma Única Semente (SSD) são promissores para a condução das populações segregantes obtidas a partir desses cruzamentos.

Tabela 6. Médias dos genitores (P_1 e P_2) e das gerações F_1 , F_2 , retrocruzamento 1 (RCP_1) e retrocruzamento 2 (RCP_2), com base na geração dos cotilédones, e seus respectivos desvios-padrão, parâmetros genéticos e predição de ganhos por seleção para o teor de cobre em sementes de feijão nos cruzamentos IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito. Santa Maria - RS, UFSM, 2010

Gerações	Teor de cobre (mg kg^{-1} MS)	
	IAPAR 44 x IAPAR 31	Diamante Negro x TPS Bonito
P_1	5,28 \pm 0,10	4,36 \pm 0,04
P_2	3,49 \pm 0,07	1,60 \pm 0,07
F_1	2,41 \pm 0,14	2,46 \pm 0,13
F_2	4,82 \pm 0,77	4,27 \pm 0,08
RCP_1	5,16 \pm 0,35	4,84 \pm 0,40
RCP_2	4,86 \pm 0,16	4,71 \pm 0,17
Média	4,32	3,78
CVe (%)	26,39	24,96
Variância fenotípica (σ^2_P)	1,86	1,99
Variância de ambiente (σ^2_E)	0,52	0,40
Variância genética (σ^2_G)	1,34	1,59
Variância aditiva (σ^2_A)	0,97	1,23
Herdabilidade ampla (h^2_a)	71,90	79,65
Herdabilidade restrita (h^2_r)	51,98	61,99
Heterose (H%)	-44,97	-17,48
Heterobeltiose (HT%)	-54,28	-43,63
Valor máximo nos genitores	6,27	5,00
Valor mínimo nos genitores	2,60	1,07
Valor máximo na F_2	7,75	7,53
Valor mínimo na F_2	2,47	1,98
Plantas selecionadas na F_2	6, 24, 22, 21, 17 e 16	3, 8, 11, 4, 1 e 2
Média original na F_2	4,82	4,27
Média das plantas selecionadas	6,54	6,27
Diferencial de seleção (DS)	1,72	2,00
Ganho por seleção (ΔG)	0,89	1,24
Ganho por seleção ($\Delta G\%$)	18,55	29,03
Média predita para o primeiro ciclo após a seleção	5,72	5,51

Estimativas de herdabilidade em sentido restrito de moderada a alta também foram observadas para o teor de ferro (JOST et al., 2009b) e para o teor de zinco em sementes de feijão (ROSA, 2009). A predominância de variância aditiva na expressão de um caráter é de grande importância, pois os ganhos seletivos dependerão apenas da variância gamética (CARVALHO et al., 2001; CRUZ, 2005). Por conseguinte, esperam-se facilidades para o desenvolvimento de cultivares de feijão com maior qualidade nutricional para uso na

alimentação, a partir da identificação de plantas com altos teores de cobre, ferro e/ou zinco nas sementes.

A estimativa de heterose obtida foi negativa nos dois cruzamentos dirigidos, ou seja, a média da geração F_1 foi inferior à média dos genitores utilizados em cada cruzamento (Tabela 6). Resposta semelhante foi observada para a heterobeltiose, com valores negativos para o cruzamento IAPAR 44 x IAPAR 31 (-54,28%) e Diamante Negro x TPS Bonito (-43,63%). Estimativas de heterose negativa, também, foram detectadas para altura de planta (-9,54%), número de vagens por planta (-27,87%), sementes por planta (-32,65) e sementes por vagem (-18,57%) em feijão (GONÇALVES-VIDIGAL et al., 2008). Face ao exposto, o efeito de epistasia sobre o fenótipo da geração F_1 precisa ser considerado, uma vez que a variância epistática se refere à interação entre alelos de diferentes locos, a qual pode ser detectada, erroneamente por métodos estatísticos, como uma variância aditiva (HOLLAND, 2001).

Segregação transgressiva foi observada para o teor de cobre em sementes de feijão e plantas F_2 com teores de cobre superiores ao genitor IAPAR 44 (alto teor de cobre: 5,28 mg kg^{-1} MS) foram obtidas. Sendo assim, o valor máximo verificado na geração F_2 foi de 7,75 mg kg^{-1} MS, representando um incremento de 46,78% no teor de cobre nas sementes de feijão por melhoramento genético. Esse é o primeiro registro de aumento do teor de cobre em sementes de feijão, por recombinação genética e seleção. Aumento de 94% no teor de ferro (JOST et al., 2009b) e de 37,26% no teor de zinco (ROSA, 2009) de sementes de feijão foram obtidos por melhoramento genético.

Em relação aos ganhos por seleção, considerando-se a pressão de seleção de 25%, podem ser esperados ganhos de 18,55% e de 29,03% para os cruzamentos IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito, respectivamente. Assim, a seleção precoce de germoplasma de feijão com elevado teor de cobre poderá ser empregada, com perspectivas futuras de sucesso, pois foram obtidos ganhos significativos já no primeiro ciclo após a seleção.

O aumento do teor de cobre em sementes de feijão, por melhoramento genético, poderá resultar em benefícios para a saúde, pois o cobre é um micromineral essencial para o organismo (CUNHA; CUNHA, 1998). Apesar dos valores verificados no presente estudo serem inferiores a maioria dos teores observados na literatura (BARAMPAMA; SIMARD, 1993; BEEBE; GONZALEZ; RENGIFO, 2000; MESQUITA et al., 2007), esses teores de cobre são capazes de suprir, aproximadamente, 20% das necessidades diárias de um indivíduo (ANDRADE et al., 2004). Além disso, o aumento do teor de cobre nas sementes poderá

contribuir para a sustentabilidade da agricultura, reduzindo a quantidade de fertilizantes à base de cobre e o acúmulo de metais pesados no solo.

Face ao exposto, o melhoramento genético pode ser utilizado como uma ferramenta de baixo custo (ao produtor) para melhorar a qualidade nutricional de sementes de feijão. Entretanto, como o feijão contém teores elevados de fibras, zinco e fitatos (DUTRA-DE-OLIVEIRA; MARCHINI, 1998), será necessário investigar a biodisponibilidade do cobre nas gerações obtidas. Isso porque a presença desses compostos, em grandes quantidades, pode reduzir a absorção do cobre pelo organismo. Para o teor de ferro, resultados obtidos demonstraram que o aumento da concentração desse elemento nas sementes de feijão, por melhoramento genético, resultou em um aumento significativo na biodisponibilidade do ferro (WELCH et al., 2000).

CONCLUSÕES

1. As cultivares de feijão BRS Expedito e Carioca apresentam mais de 64% do cobre e mais de 68% do zinco no embrião e de 51,06% a 60,12% do ferro no tegumento das sementes.

2. A partir dos cruzamentos dirigidos realizados entre as cultivares IAPAR 44 x IAPAR 31 e Diamante Negro x TPS Bonito, conclui-se que:

- não ocorre efeito materno significativo na expressão do teor de cobre em sementes de feijão;
- o teor de cobre em sementes de feijão apresenta herdabilidade em sentido restrito de moderada (51,98%) a alta (61,99%) magnitude, em gerações precoces;
- é possível aumentar em 46,78% o teor de cobre nas sementes de feijão, por melhoramento genético.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento sobre a acumulação dos minerais no tegumento ou no embrião das sementes de feijão é importante, pois a migração desses elementos ocorre de maneira diferenciada nas frações das sementes. No embrião das sementes de feijão das cultivares BRS Expedito e Carioca se concentraram mais de 80% do potássio, 64% do cobre e 68% do zinco e no tegumento se acumularam mais de 94% do cálcio e de 51,06% a 60,12% do ferro. A geração do embrião deverá ser considerada no processo de seleção para aumento do teor de minerais em sementes de feijão.

A genética do caráter a ser selecionado apresenta reflexos no sucesso do programa de melhoramento genético. Desse modo, um adequado entendimento do controle genético dos teores de potássio e de cobre em sementes de feijão é necessário para o desenvolvimento de genótipos com maior qualidade nutricional. Não foi observada presença de efeito materno significativo na expressão dos teores de potássio e de cobre em sementes de feijão. Portanto, a seleção de plantas, pode ser realizada na geração F_2 , pois maior segregação fenotípica foi constatada.

Estimativas de heterose e de heterobeltiose negativas foram obtidas para os teores de potássio e de cobre em todos os cruzamentos. Efeitos epistáticos podem ter atuado sobre essas características, uma vez que foram verificados fenótipos inferiores aos genitores nas gerações F_1 e F_2 (potássio) e na geração F_1 (cobre).

Predominância de efeitos ambientais, em relação aos genéticos, foram observados para o teor de potássio nas sementes de feijão, sugerindo dificuldades no processo de seleção para maior teor desse mineral. Assim, foram obtidas estimativas de herdabilidade em sentido restrito de baixa a moderada magnitude.

Estimativas de herdabilidade em sentido amplo e em sentido restrito de moderada a alta magnitude foram verificadas para o teor de cobre, sugerindo maior facilidade durante a seleção, visto que foi detectada maior variância genética na expressão desse caráter.

Segregação transgressiva foi constatada para o teor de cobre em sementes de feijão, indicando que é possível aumentar o teor desse mineral por melhoramento genético.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. C. B. et al. Comparação dos teores de cobre e zinco em leguminosas cruas e após processadas termicamente em meio salino e aquoso. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 24, n. 3, p. 316-318, 2004.

AUGUSTIN, J. et al. Variation in the vitamin and mineral content of raw and cooked commercial *Phaseolus vulgaris* classes. **Food Technology**, Chicago, v. 35, n. 3, p. 75-76, 1981.

BARAMPAMA, Z.; SIMARD, R. E. Nutrient composition, protein quality and antinutritional factors of some varieties of dry beans (*Phaseolus vulgaris*) grown in Burundi. **Food Chemistry**, Barking, v. 47, n. 2, p. 159-167, 1993.

BEEBE, S.; GONZALEZ, A. V.; RENGIFO, J. Research on trace minerals in the common bean. **Food and Nutrition Bulletin**, Harrison, v. 21, n. 4, p. 387-391, 2000.

BEVILAQUA, G. A. P. et al. Posição do fósforo e potássio na adubação da semente e no crescimento de plântulas de milho. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 2, n. 2, p. 87-92, 1996.

BORÉM, A.; VIEIRA, G. **Melhoramento de plantas**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2009. 529 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 20 dez. 2009.

CARVALHO, F. I. F. et al. **Estimativas e implicações da herdabilidade como estratégia de seleção**. Pelotas: UFPEL, 2001. 98 p.

CRUZ, C. D. **Princípios de genética quantitativa**. Viçosa: UFV, 2005. 394 p.

_____. **Programa Genes**. Viçosa: UFV, 2006. 382 p.

CUNHA, D. F.; CUNHA, S. F. C. Microminerais. In: DUTRA-DE-OLIVEIRA, J. E.; MARCHINI, J. S. (Ed.). **Ciências nutricionais**. São Paulo: Sarvier, 1998. cap. 9, p. 141-165.

DUTRA-DE-OLIVEIRA, J. E.; MARCHINI, J. S. **Ciências nutricionais**. São Paulo: Sarvier, 1998. 403 p.

ESTEVES, A. M. **Comparação química e enzimática de seis linhagens de feijão**. 2000. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; COSTA, J. G. C. Potassium-use efficiency in common bean genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, Madison, v. 24, n. 12, p. 1937-1945, 2001.

FAO. **Base de dados FAOSTAT**. Disponível em:<
<http://faostat.fao.org/site/609/default.aspx>>. Acesso em: 16 dez. 2009.

FENNEMA, O. R. **Química de los alimentos**. 2. ed. Zaragoza: Acribia, 2000. 1272 p.

FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. Cobre. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. **Micronutrientes na Agricultura**. Piracicaba, SP: POTAFÓS, 1983. 162 p.

FLOREZ, A. et al. Genetic and environmental effects on chemical composition related to sensory traits in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Food Chemistry**, Barking, v. 113, n. 4, p. 950-956, 2009.

FRANCO, G. **Tabela de composição química dos alimentos**. 9. ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 2005. 307 p.

GALRÃO, E. Z. Métodos de aplicação de cobre e avaliação da disponibilidade para a soja num Latossolo Vermelho-Amarelo Franco-Argilo-Arenoso fase Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 265-272, 1999.

GONÇALVES-VIDIGAL, M. C. et al. Combining ability and heterosis in common bean cultivars. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 9, p. 1143-1150, 2008.

HOCKING, P. J.; PATE, J. S. Mobilization of minerals to developing seeds of legumes. **Annals of Botany**, Exeter, v. 41, n. 6, p. 1259-1977, 1977.

HOLLAND, J. B. Epistasis and plant breeding. **Plant Breeding Reviews**, New York, v. 21, n. 2, p. 27-92, 2001.

HOSFIELD, G. L. Genetic control of production and food quality factors in dry bean. **Food Technology**, Chicago, v. 45, n. 9, p. 98-103, 1991.

INSTITUTE OF MEDICINE. **Dietary reference intakes for water, potassium, sodium, chloride, and sulfate**. Washington: National Academies Press, 2004. 618 p.

IQBAL, A. et al. Nutritional quality of important food legumes. **Food Chemistry**, London, v. 97, n. 2, p. 331-335, 2006.

JOST, E. et al. Efeitos gênicos do teor de cálcio em grãos de feijão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 31-37, 2009a.

_____ et al. Potencial de aumento do teor de ferro em grãos de feijão por melhoramento genético. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 1, p. 35-42, 2009b.

LINDINGER, M. I. Potassium regulation during exercise and recovery in humans: implications for skeletal and cardiac muscle. **Journal of Molecular and Cellular Cardiology**, Copenhagen, v. 27, n. 4, p. 1011-1022, 1995.

LOUIS, C. J.; DOLAN, E. M. Removal of potassium in potatoes by leaching. **Journal of the American Dietetic Association**, Philadelphia, v. 57, n. 1, p. 42-43, 1970.

LUCHESE, E. B.; BOHEN, H. Levantamento dos teores de cobre nos solos do Rio Grande do Sul – Brasil. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, Curitiba, v. 30, p. 607-613, 1987.

MAHAN, L. K.; ESCOTT-STUMP, S. **Alimentos, nutrição e dietoterapia**. 9. ed. São Paulo: Roca, 1998. 1179 p.

MANTOVI, P. et al. Accumulation of copper and zinc from liquid manure in agricultural soils and crop plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 250, n. 2, p. 249-257, 2003.

MESQUITA, F. R. et al. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade protéica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1114-1121, 2007.

MESQUITA, I. A. **Efeito materno na determinação do tamanho da semente do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1989. 70 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1989.

MIYAZAWA, M. et al. Análises químicas de tecido vegetal. In: SILVA, F.C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Solos, 1999. p. 171-223.

MORAGHAN, J. T.; GRAFTON, K. Genetic diversity and mineral composition of common bean seed. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 81, n. 4, p. 404-408, 2001.

_____; _____. Distribution of selected elements between the seed coat and embryo of two black bean cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, Madison, v. 25, n. 1, p. 169-176, 2002.

_____ et al. Iron accumulation in seed of common bean. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 246, n. 2, p. 175-183, 2002.

_____; ETCHEVERS, J. D.; PADILHA, J. Contrasting accumulations of calcium and magnesium in seed coats and embryos of common bean and soybean. **Food Chemistry**, London, v. 95, n. 4, p. 554-561, 2006.

MORROW, B. The rebirth of legumes. **Food Technology**, Chicago, v. 45, n. 9, p. 96-121, 1991.

NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

PENNINGTON, J. A. T.; YOUNG, B. Sodium, potassium, calcium, phosphorus and magnesium in foods from the United States total diet study. **Journal of Food Composition and Analysis**, Roma, v. 3, n. 2, p. 145-165, 1990.

PETERNELLI, L. A.; BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. Híbridaç o em feijão. In: BORÉM, A. **Híbridaç o artificial de plantas**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2009. p. 320-348.

POLIGNANO, G. B. Breeding for protein percentage and seed weight in *Phaseolus vulgaris* L. **The Journal Agricultural Science**, Aberdeen, v. 99, n. 1, p. 191-197, 1982.

RAMALHO, M.; SANTOS, J. B.; PINTO, C. B. **Genética na agropecuária**. 4. ed. Lavras: UFLA, 2008. 464 p.

RENGEL Z.; DAMOM, P. M. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. **Physiologia Plantarum**, Lund, v. 133, n. 4, p. 624-636, 2008.

RIBEIRO, N. D.; SANTOS, O. S. Germinação de sementes de milho tratadas com manganês e cobre. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 99-100, 1993.

_____ et al. Composição de aminoácidos em gerações precoces de feijão obtidas a partir de cruzamentos controlados com parental de alto teor de cisteína. **Ciência Rural**, v.39, n.2, p.364-370, 2009.

ROSA, S. S. **Genética dos teores de fósforo e de zinco em sementes de feijão**. 2009. 45 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

SATHE, S. K.; DESHPANDE, S. S.; SALUNKHE, D. K. Dry beans of *Phaseolus* a review. Part 2. Chemical composition: carbohydrates, fiber, minerals, vitamins and lipids. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Cleveland, v. 21, n. 1, p. 41-91, Jan. 1984.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. **Tabela brasileira de composição de alimentos**. 2. ed. Campinas: NEPA-UNICAMP, 2006. 113 p.

WARNER, J. N. A method for estimating heritability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 44, n. 8, p. 427-430, 1952.

WELCH, R. M.; GRAHAN, R. D. A new paradigm for world agriculture: meeting human needs productive, sustainable, nutritious. **Field Crops Research**, Phoenix, v. 60, n. 1-2, p. 1-10, 1999.

_____ et al. Genetic selection for enhanced bioavailable levels of iron in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 48, n. 8, p. 3576-3580, 2000.

YIN, X.; VYN, T. J. Potassium placement effects on yield and seed composition of no-till soybean seeded in alternate row widths. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 1, p. 126-132, 2003.

ANEXO 1 – Hábito de crescimento (HC), tipo de grão, Programa de Melhoramento obtentor/mantenedor da cultivar e genealogia das cultivares de feijão utilizadas nos estudos de acumulação de minerais e da genética dos teores de potássio e de cobre em sementes de feijão. Santa Maria – RS, UFSM, 2010

Cultivar	HC*	Tipo de grão	Obtentor**	Genealogia***
IAPAR 44	II	Preto	IAPAR	(BAC 2 / RAI 12) // (Rio Tibagi / Cornell 49242)
BRS Exedito	II	Preto	Embrapa – CPCT	(CNF 5491 / FT Tarumã)
Guapo Brilhante	II	Preto	Embrapa – CPCT	XAN 125 / [BAT 336 /// (A83 / ICA Pijao)]
BRS Valente	II	Preto	Embrapa – CNPAF	[(Emgopa 201-Ouro / Ônix) /// AN 512586]
IAPAR 31	III	Carioca (Rajado)	IAPAR	[(BAC 4 / RAI 46) // (BAC 2 / Iguaçú)] / (BAT 93 / BAC 4)
Diamante Negro	II	Preto	Embrapa – CNPAF	(XAN 87 / A 367)
TPS Bonito	III	Carioca	FT Sementes	(IAPAR 14 / Carioca 80)
Carioca	III	Carioca	IAC	Seleção de amostras coletadas em campo

*HC: II: hábito de crescimento indeterminado com guias curtas; III: hábito de crescimento indeterminado com guias longas.

**Obtentor/mantenedor: IAPAR: Instituto Agrônomo do Paraná, Londrina, PR; Embrapa – CPCT: Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado, Pelotas, RS; Embrapa – CNPAF: Centro Nacional de Pesquisa em Arroz e Feijão, Goiânia, GO; FT Sementes: Francisco Terasawa Sementes, Ponta Grossa, PR.; IAC: Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, SP.

***Genealogia: /: cruzamento simples; //: cruzamento duplo; ///: cruzamento triplo.