

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

**SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO PARA
PRODUÇÃO E ACÚMULO DE CÁLCIO NA PLANTA**

TESE DE DOUTORADO

Lucas da Silva Domingues

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO PARA PRODUÇÃO E ACÚMULO DE CÁLCIO NA PLANTA

Lucas da Silva Domingues

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia,
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como
requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Agronomia.

Orientadora: Prof^a. Nerinéia Dalfollo Ribeiro

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Domingues, Lucas da Silva
Seleção de linhagens de feijão para produção e acúmulo de cálcio na planta / Lucas da Silva Domingues.-2013.
100 f.; 30cm

Orientadora: Nerinéia Dalfollo Ribeiro
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, RS, 2013

1. Phaseolus vulgaris. variabilidade genética. 2. produção de massa seca 3. componentes da produtividade 4. acúmulo de minerais 5. eficiência no uso de cálcio I. Ribeiro, Nerinéia Dalfollo II. Título.

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Lucas da Silva Domingues. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização do autor.

Endereço: Travessa Monteiro Lobato, 125, Bairro Centro, Santa Maria- RS. CEP 97015-420.

Endereço eletrônico: lucassdomingues@gmail.com

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Tese de Doutorado

**SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO PARA PRODUÇÃO E
ACÚMULO DE CÁLCIO NA PLANTA**

Elaborada por

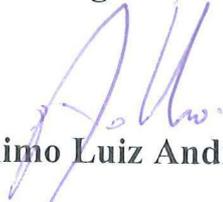
Lucas da Silva Domingues

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Agronomia

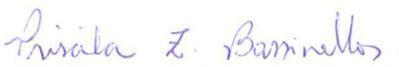
Comissão examinadora:


Nerinéia Dalfollo Ribeiro
(Presidente/Orientadora)


Alberto Cargnelutti Filho, Dr. (UFSM)


Jerônimo Luiz Andriolo Dr. (UFSM)


Patrícia Guimarães Santos Melo, Dr^a. (UFG)


Priscila Zaczuk Bassinello, Dr^a. (EMBRAPA)

Santa Maria, 25 de janeiro de 2013.

Dedico a Fabio Silva Domingues (*in memoriam*),
que tem iluminado meu caminho,
e a Milton Domingues Junior e Vera da Silva Oliveira,
por acreditarem que tudo isso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado força e paciência.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pela oportunidade de realização desse trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À professora Nerinéia Dalfollo Ribeiro por ter me recebido para orientação, pelos ensinamentos, conselhos e orientações que tanto me auxiliaram no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Ao meu irmão Milton Junior, meu pai Milton, meu sobrinho Fábio, minha cunhada Vanessa, Iria, Junior, tia Odete, meus avós Achylles e Noeli, meu irmão Pablo pelo amor carinho e apoio que sempre me motivaram a seguir em frente.

À família Oliveira, especialmente a minha tia Vera, ao meu tio Heron, Clarissa, Ary, Miguel, Leonardo, Marta, Vinícius, Maria Antonia e Jaquiele que me acolheram da melhor maneira possível, os quais sempre terão minha eterna gratidão.

À minha mãe Regiane por ter me criado e educado e aos demais familiares pelo incentivo e apoio.

Aos professores Jerônimo Andriolo, Rogério Bellé e Fernanda Backes pelo apoio na instalação e condução dos experimentos.

A professora Lia Reiniger e ao pessoal do laboratório do Núcleo de Biotecnologia e Melhoramento pela disponibilização do laboratório para as análises de minerais.

Ao pessoal do Grupo de Melhoramento de Feijão: Micheli Possobom, Allan Zemolin, Daniele Piano Rosa, Evandro Jost, Sandra Maziero, Ritieli Manbrin, Anderson Anversa, Hector Facco, Marina Pasquali e Fernanda Arns sem o apoio e amizade dos quais esse trabalho não aconteceria.

Aos amigos Cristiano Minetto, Eduardo Gruhn e Carlos Rodrigo Bigolin que, também, ajudaram muito para a realização desse trabalho.

Aos meus amigos Everton Scarsi, Gerson Dalla Corte, Diego Dalla Favera, Daniel Debona, Rafael e Leonardo Possebon, Guilherme Rubin, Gabriel Kirchner, Samuel Bianchi, Gustavo Nietidt, Juliano Ramos, Rafael Gai e Felipe Correa pela amizade e incentivo.

Ao João Colpo e demais funcionários do Departamento de Fitotecnia pelo auxílio e amizade.

A todos que contribuíram de alguma forma e não foram lembrados, meus sinceros agradecimentos.

“Não se constrói uma vida com base em sonhos e desejos. Uma vida boa não cai do céu. Você a ergue do chão, com trabalho duro e idéias claras. As coisas fazem sentido. Existem regras e realidades que não vão mudar para se adequarem às suas necessidades. Você tem a obrigação de entender essas regras. Se as compreender, batalhar e for esperto, vai se sair bem.”

Fernando Parrado

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO PARA PRODUÇÃO E ACÚMULO DE CÁLCIO NA PLANTA

AUTOR: LUCAS DA SILVA DOMINGUES

ORIENTADORA: NERINÉIA DALFOLLO RIBEIRO

Local e Data: Santa Maria/RS, 25 de janeiro de 2013

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma importante fonte de cálcio para a alimentação humana, sendo a avaliação da eficiência no uso de cálcio em feijão uma ferramenta relevante para a sustentabilidade da cultura. Foram objetivos desse trabalho avaliar a resposta de cultivares de feijão a diferentes concentrações de cálcio em solução nutritiva na produção de massa seca, nos componentes da produtividade de grãos e no acúmulo de cálcio, potássio e magnésio; investigar a associação entre esses caracteres; avaliar a variabilidade genética de linhagens de feijão quanto a disponibilidade de cálcio na solução e identificar linhagens eficientes no uso de cálcio e responsivas a aplicação deste mineral por diferentes índices. Para isso foram realizados três experimentos no período de março de 2011 a julho de 2012, em casa-de-vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas. Nos dois primeiros experimentos foram testadas concentrações de cálcio na solução nutritiva de 1,10 a 4,95 mmol L⁻¹ como componentes da parcela principal e as cultivares BRS Expedito, Carioca e Iraí nas subparcelas no primeiro experimento, com a exclusão da cultivar Iraí para o segundo experimento. No terceiro experimento foram avaliadas a eficiência no uso e a resposta de 12 linhagens de feijão em baixa (1,10 mmol L⁻¹) e em alta (3,85 mmol L⁻¹) concentração de cálcio na solução nutritiva. Maiores valores para massa seca e para os componentes da produtividade de grãos foram observados para as concentrações de 3,30 mmol L⁻¹ e de 4,95 mmol L⁻¹. As cultivares de feijão acumulam maior quantidade de cálcio nas folhas, seguido pelos caules, vagens e grãos. Maior acúmulo de cálcio nas folhas foi obtido na concentração de 4,95 mmol L⁻¹ de cálcio na solução nutritiva, quando a concentração de cálcio nas folhas é 21 vezes superior ao valor obtido nos grãos de feijão. O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva até a concentração de 4,95 mmol L⁻¹ não altera a absorção e o acúmulo de potássio e de magnésio nas folhas e nos grãos de feijão. A seleção indireta pela maior massa seca de parte aérea e maiores valores das variáveis que formam a produtividade de grãos em feijão será eficiente para aumentar o acúmulo de cálcio nos grãos de feijão. As linhagens L 15, L 234, L 246 e L 77 respondem ao aumento do suprimento de cálcio na solução, pois acumulam mais cálcio nos grãos em cultivo com alta concentração deste mineral. As linhagens L 246 e L 15 são eficientes no uso de cálcio na planta, na aquisição de cálcio e na produção de grãos, e não são responsivas à aplicação de cálcio. A linhagem L 77 é eficiente no uso de cálcio na planta e na produção de grãos e é responsiva à aplicação de cálcio na solução nutritiva.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris*, produção de massa seca, componentes da produtividade, acúmulo de minerais, eficiência no uso de cálcio, índice de resposta à aplicação de cálcio, variabilidade genética.

ABSTRACT

Doctor Thesis
Agronomy Post-graduation Program
Santa Maria Federal University

COMMON BEAN LINES SELECTION FOR PRODUCTION AND CALCIUM ACCUMULATION IN PLANT

AUTHOR: LUCAS DA SILVA DOMINGUES

ADVISER: NERINÉIA DALFOLLO RIBEIRO

Place and Date: Santa Maria/RS, January 25th, 2013

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is an important calcium source for human diet, thus the evaluation of the calcium use efficiency in common bean a relevant tool for crop sustainability. The aims of this study were to evaluate the response in common bean cultivars with different calcium concentrations in nutrient solution on dry matter production, yield components and calcium, potassium and magnesium accumulations; to investigate the association between these characters; to evaluate the genetic variability of lines for calcium availability in the solution; and identify lines of common bean-efficient and responsive to calcium application by different indexes. For this, three experiments were conducted from March 2011 to July 2012 in greenhouse, in a completely randomized design, in splitplots. In the first two experiments were tested calcium concentrations in nutrient solution from 1.10 to 4.95 mmol L⁻¹ as components of the main plot and the BRS Expedito, Carioca and Iraí cultivars on subplots in the first experiment, with the exclusion of the cultivar Iraí in the second experiment. The third experiment evaluated the efficiency and the response of the calcium use of 12 different common bean lines at low (1.10 mmol L⁻¹) and high (3.85 mmol L⁻¹) calcium concentrations in the nutrient solution. Higher values for dry matter and grain yield components were observed for 3.30 mmol L⁻¹ and 4.95 mmol L⁻¹ calcium concentrations in the solution. The common bean cultivars accumulate greater quantity of calcium in the leaves, followed by stems, pods and grains. Highest accumulation of calcium in the leaves was obtained at a 4.95 mmol L⁻¹ calcium concentration in the nutrient solution, and the calcium concentration in the leaves was 21 times higher than the value obtained in the bean grains. The increase of calcium concentration in the nutrient solution up to the concentration of 4.95 mmol L⁻¹ does not change the absorption and the accumulation of potassium and magnesium in leaves and grains. Indirect selection by greater dry matter and higher values of the variables that form the grain yield in common bean will be efficient to increase the accumulation of calcium in grains. The lines L 15, L 234, L 246 and L 77 respond to the increase on calcium supply in the solution, because more calcium accumulates in grain in the cultivation with high calcium concentration. The lines L 246 and L 15 are calcium use efficient in the plant, in the acquisition and grain production, and are not responsive to calcium application. The line L 77 is calcium use efficient in the plant and in the grain production and is responsive to the calcium application in the nutrient solution.

Key-words: *Phaseolus vulgaris*, dry matter production, yield components, mineral accumulation, calcium use efficiency, calcium response index applying, genetic variability.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

FIGURA 1 - Massa seca de caule (MS de caule, g) (A), massa seca de folhas (MS de folhas, g) (B), massa de parte aérea (MS de PA, g) (C), número de vagens por planta (D), número de grãos por planta (E) e número de grãos por vagem (F) de cultivares de feijão submetidas a cinco concentrações de cálcio na solução nutritiva..... 27

FIGURA 2 - Massa de grãos por planta (g) (A), concentração de cálcio (Ca) no caule (g kg^{-1} de matéria seca - MS) (B), concentração de cálcio nas folhas (g kg^{-1} de MS) (C) e concentração de cálcio nos grãos (g kg^{-1} de MS) (D) de cultivares de feijão submetidas a cinco concentrações de cálcio na solução nutritiva..... 30

ARTIGO 2

FIGURA 1 - Massa seca de parte aérea na floração (MS de PA em R6, A), massa seca de raízes na floração (MS raízes em R6, B), massa seca de parte aérea no enchimento de vagens (MS de PA em R8, C), massa seca de vagens no enchimento de vagens (MS de vagens em R8, D), massa seca na maturação (MS em R9, E) e massa de grãos por planta (F) de cultivares de feijão em função de diferentes concentrações de cálcio disponibilizados em solução nutritiva..... 61

FIGURA 2 - Concentração de cálcio (Ca) nas folhas no enchimento de vagens (R8) (A) e grãos (B), concentração de potássio (K) nas folhas no enchimento de vagens (R8) (C) e nos grãos (D), concentração de magnésio (Mg) nas folhas no enchimento de vagens (R8) (E) e nos grãos (F), em g kg^{-1} de matéria seca, de cultivares de feijão em função de diferentes concentrações de cálcio disponibilizadas em solução nutritiva..... 64

ARTIGO 3

FIGURA 1 - Classificação de 12 linhagens de feijão quanto à eficiência no uso de cálcio na parte aérea (EUPA) em relação ao índice de resposta de cálcio à produção de massa seca de parte aérea (IRPA) (A), eficiência no uso de cálcio na planta (EUP) em relação ao índice de resposta de cálcio à produção de massa seca pela planta (IRPP) (B), eficiência de aquisição de cálcio (EA) em relação ao índice de resposta de cálcio à produção de grãos (IRPG) (C) e eficiência no uso de cálcio na produção de grãos (EUPG) em relação ao índice de resposta de cálcio à produção de grãos (IRPG) (D) obtidas em baixa concentração de cálcio em solução nutritiva..... 89

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

TABELA 1 - Composição das soluções nutritivas com diferentes concentrações de cálcio (Ca) empregadas como tratamentos nas parcelas principais.....	22
TABELA 2 - Resumo da análise de variância e de regressão para as variáveis massa seca de caule (MSC, g), massa seca de folhas (MSF, g), massa seca de parte aérea (MSPA, g), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), número de grãos por vagem (NGV), massa de grãos por planta (MGP, g), concentração de cálcio no caule (Ca caule, g kg ⁻¹ de matéria seca - MS), concentração de cálcio nas folhas (Ca folhas, g kg ⁻¹ de MS) e concentração de cálcio nos grãos (Ca grãos, g kg ⁻¹ de MS), avaliadas em três cultivares de feijão submetidas a cinco concentrações de cálcio na solução nutritiva.....	25
TABELA 3 - Valores médios para a massa seca de caule (MSC, g), massa seca de folhas (MSF, g), massa seca de parte aérea (MSPA, g), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP, g) e concentração de cálcio nos grãos (Ca grãos, g kg ⁻¹ de matéria seca) avaliados em três cultivares de feijão submetidas a cinco concentrações de cálcio na solução nutritiva.....	32
TABELA 4 - Estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson entre os caracteres massa seca de caule (MSC), massa seca de folhas (MSF), massa seca de parte aérea (MSPA), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), número de grãos por vagem (NGV), massa de grãos por planta (MGP), concentração de cálcio no caule (Ca caule), concentração de cálcio nas folhas (Ca folhas) e concentração de cálcio nos grãos (Ca grãos), avaliados em três cultivares de feijão submetidas a cinco concentrações de cálcio na solução nutritiva.....	33

ARTIGO 2

TABELA 1 - Composição das soluções nutritivas com diferentes concentrações de cálcio empregadas como tratamentos nas parcelas principais.....	59
TABELA 2 - Resumo da análise de variância e de regressão para as variáveis nos diferentes estádios fenológicos: massa seca de parte aérea na terceira folha trifoliada (MSPA V4, g), massa seca de raízes na terceira folha trifoliada (MSR V4, g), massa seca de parte aérea na floração (MSPA R6, g), massa seca de raízes na floração (MSR R6, g), massa seca de parte aérea no enchimento das vagens (MSPA R8, g), massa seca de raízes no enchimento das vagens (MSR R8, g), número de vagens por planta no enchimento das vagens (NV R8), massa seca de vagens no enchimento das vagens (MSV R8, g), massa seca de parte aérea na maturação (MSPA R9, g), massa seca de raízes na maturação (MSR R9, g), número de grãos na maturação (NG R9) e massa de grãos por planta na maturação (MG R9, g), avaliada em duas cultivares de feijão submetidas a seis concentrações de cálcio na solução nutritiva.....	60
TABELA 3 - Valores médios para a massa seca de raízes na floração (MSR R6, g), número de vagens por planta no enchimento de vagens (NV R8), massa seca de vagens no enchimento de vagens (MSV R8, g) e massa seca de raízes na maturação (MSR R9, g) avaliados em duas cultivares de feijão submetidas a seis concentrações de cálcio em solução nutritiva.....	62

TABELA 4 - Resumo da análise de variância e de regressão para a concentração de minerais em diferentes estádios fenológicos de desenvolvimento: cálcio nas folhas na terceira folha trifoliada (Ca F V4, g kg⁻¹ de matéria seca - MS), cálcio nas folhas na floração (Ca F R6, g kg⁻¹ de MS), cálcio nas folhas no enchimento das vagens (Ca F R8, g kg⁻¹ de MS), cálcio nos grãos em R9 (Ca G R9, g kg⁻¹ de MS), potássio nas folhas no enchimento das vagens (K F R8, g kg⁻¹ de MS), potássio nos grãos na maturação (K G R9, g kg⁻¹ de MS), magnésio nas folhas no enchimento das vagens (Mg F R8, g kg⁻¹ de MS), magnésio nos grãos na maturação (Mg G R9 g kg⁻¹ de MS) avaliados em duas cultivares de feijão submetidas a seis concentrações de cálcio na solução nutritiva..... 63

ARTIGO 3

TABELA 1 - Coloração do tegumento dos grãos (cor), concentração de cálcio nos grãos (Ca, g kg⁻¹ de matéria seca) e produtividade de grãos (produtividade), obtidas previamente em experimento de campo, das linhagens de feijão avaliadas em baixa e em alta concentração de cálcio em solução nutritiva..... 84

TABELA 2 - Resumo da análise de variância para as variáveis: massa seca de parte aérea (MSPA, g), massa seca de vagens (MSV, g), massa seca de raízes (MSR, g), partição parte aérea/raízes (PA/R), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), número de grãos por vagem (NGV), massa de grãos por planta (MGP, g), concentração de cálcio nas folhas (Ca folhas, g kg⁻¹ de matéria seca - MS), concentração de cálcio no caule (Ca caule, g kg⁻¹ de MS), concentração de cálcio nas vagens (Ca vagens, g kg⁻¹ de MS), concentração de cálcio nos grãos (Ca grãos, g kg⁻¹ de MS), eficiência no uso de cálcio nos grãos (EUG, g² mg Ca⁻¹), eficiência no uso de cálcio na parte aérea (EUPA, g² mg⁻¹), eficiência no uso de cálcio na planta (EUP, g² mg⁻¹), eficiência de aquisição de cálcio (EA, g² mg⁻¹), eficiência no uso de cálcio na produção de grãos (EUPG, g² mg⁻¹), índice de resposta de cálcio à produção de grãos (IRPG), índice de resposta de cálcio à produção de massa seca de parte aérea (IRPPA) e índice de resposta de cálcio à produção de massa seca pela planta (IRPP) avaliadas em 12 linhagens de feijão submetidas a duas concentrações de cálcio na solução nutritiva..... 85

TABELA 3 - Valores médios para a massa seca de parte aérea (MSPA, g), massa seca de vagens (MSV, g), massa seca de raízes (MSR, g), partição parte aérea/raízes (PA/R), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), número de grãos por vagem (NGV) e massa de grãos por planta (MGP, g) obtidos para 12 linhagens de feijão submetidas a duas concentrações de cálcio na solução nutritiva..... 86

TABELA 4 - Valores médios para a concentração de cálcio nas folhas (Ca folhas, g kg⁻¹ de matéria seca - MS), concentração de cálcio no caule (Ca caule, g kg⁻¹ de MS), concentração de cálcio nas vagens (Ca vagens, g kg⁻¹ de MS) e concentração de cálcio nos grãos (Ca grãos, g kg⁻¹ de MS) obtidos para 12 linhagens de feijão submetidas a duas concentrações de cálcio na solução nutritiva..... 87

TABELA 5 - Valores médios para a eficiência no uso de cálcio nos grãos (EUG, g² mg Ca⁻¹), eficiência no uso de cálcio na parte aérea (EUPA, g² mg⁻¹), eficiência no uso de cálcio na planta (EUP, g² mg⁻¹), eficiência de aquisição de cálcio (EA, g² mg⁻¹), eficiência no uso de cálcio na produção de grãos (EUPG, g² mg⁻¹), índice de resposta de cálcio à produção de grãos (IRPG), índice de resposta de cálcio à produção de massa seca de parte aérea (IRPPA) e índice de resposta de cálcio à produção de massa seca pela planta (IRPP) obtidos para 12 linhagens de feijão submetidas a duas concentrações de cálcio na solução nutritiva..... 88

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
ARTIGO 1 - CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE GRÃOS DE PLANTAS DE FEIJÃO CULTIVADAS COM DIFERENTES DISPONIBILIDADES DE CÁLCIO.....	16
Resumo.....	16
Abstract.....	17
Introdução	17
Material e Métodos.....	20
Resultados e Discussão.....	24
Conclusões.....	34
Referências.....	35
ARTIGO 2 - CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO NA PRODUÇÃO E NA PARTIÇÃO DE MINERAIS EM CULTIVARES DE FEIJÃO.....	39
Resumo.....	39
Abstract.....	40
Introdução	40
Material e Métodos.....	42
Resultados e Discussão.....	47
Conclusões.....	55
Referências Bibliográficas.....	55
ARTIGO 3 - VARIABILIDADE GENÉTICA DE LINHAGENS DE FEIJÃO PARA EFICIÊNCIA E RESPOSTA AO CÁLCIO.....	65
Resumo.....	65
Abstract.....	65
Introdução	66
Material e Métodos.....	68
Resultados e Discussão.....	73
Conclusões.....	80
Referências Bibliográficas.....	81
DISCUSSÃO.....	90
CONCLUSÕES.....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das espécies mais presentes na alimentação humana, sendo a principal leguminosa consumida na forma natural em todo o mundo (TALUKDER et al., 2010). O Brasil é o maior consumidor e um dos principais produtores de feijão e o cultivo é realizado em praticamente todas as regiões do país, sendo possível a colheita de três safras por ano (EMBRAPA, 2010).

Dentre os fatores que impulsionam a grande produção de feijão no país, destaca-se o alto consumo de feijão que se deve, principalmente, aos fatores culturais. Além disso, a importância nutricional vem ganhando destaque, pois o feijão é fonte de proteínas, vitaminas e minerais (SATHE et al., 1984; RIBEIRO et al., 2007; RIBEIRO et al., 2008). Com relação aos minerais, o feijão foi a terceira melhor opção como fonte de cálcio para a dieta em um estudo realizado com 39 espécies vegetais (STEVENS, 1974). No entanto, a concentração de cálcio nos grãos de feijão pode variar de acordo com a cultivar. Mesquita et al. (2007) observaram valores de cálcio entre 0,30 a 2,80 g kg⁻¹ de matéria seca (MS) em 21 linhagens de feijão cultivadas no Brasil.

O cálcio presente nos grãos de feijão é importante para a alimentação humana e para o crescimento e desenvolvimento das plantas de feijão. Nestas, o cálcio é o terceiro mineral mais abundante nos tecidos, sendo superado apenas pelo nitrogênio e pelo potássio (BULISANI, 1987). Este mineral desempenha várias funções fisiológicas vitais para as plantas (DODD; KUDLA; SANDERS, 2010; GILLIHAM et al., 2011) e, em leguminosas, participa ativamente no processo de nodulação (OLDROYD; DOWNIE, 2008).

A deficiência de cálcio em solos agricultáveis é rara, entretanto a concentração de cálcio disponível para as plantas é muito influenciada pela acidez do solo (McLAUGHLIN; WIMMER, 1999). Por isso, os trabalhos relacionados à nutrição de cálcio para a cultura do feijão foram relacionados à interferência do alumínio na nutrição das plantas (SILVA; MORAES; SOUZA, 2011; SOUZA JÚNIOR; NASCIMENTO; MARTINEZ, 1998). Para plantas do gênero *Phaseolus*, principalmente para feijão vagem, estudos já foram realizados para explorar a importância da nutrição com cálcio (MIGLIORANZA et al., 1997; QUINTANA et al., 1999; FAVARO et al., 2007).

Estudos sobre a nutrição de cálcio são fundamentais para o entendimento da atividade e distribuição desse nutriente nas plantas. Esses trabalhos quando realizados em condições controladas, ou seja, com o uso de solução nutritiva com neutralidade de cargas como

alumínio, equilíbrio na concentração dos nutrientes e substratos inertes, fornecem informações com maior grau de confiabilidade, quando comparado aos estudos realizados em condições de campo em que a disponibilidade do cálcio sofre grande influência das características físico-químicas do solo.

Para a cultura do feijão são necessárias mais informações a respeito da distribuição desse mineral na planta, bem como sobre o comportamento de cultivares em diferentes disponibilidades de cálcio. O entendimento dessa relação permite o estudo pormenorizado da influência da disponibilidade de cálcio no desempenho agrônômico de cultivares de feijão, auxiliando, também, no processo de seleção de linhagens mais adaptadas a diferentes condições de cultivo.

O estudo do efeito da disponibilidade de cálcio para a cultura do feijão auxilia na obtenção de linhagens eficientes no uso do cálcio. A obtenção de linhagens com eficiência no uso de nutrientes é uma solução buscada por melhoristas a fim de obter linhagens adaptadas a condições limitantes quanto à fertilidade dos solos, ou que sejam capazes de obter maiores produtividades com o mesmo suprimento nutricional. Eficiência no uso de nutrientes pode ser definida como a relação entre a quantidade de massa seca produzida por unidade de nutriente absorvido pela planta (GOOD; SHRAWAT; MUENCH, 2004). Logo, linhagens com maior eficiência no uso de nutrientes são capazes de maximizar a produção em condições limitantes e alcançarem maiores produtividades por unidade de nutriente disponível.

A eficiência no uso de nutrientes já foi avaliada para cultura do feijão em relação ao uso de nitrogênio (SANTOS; FAGERIA, 2007; SOUZA et al., 2012), fósforo (FAGERIA; BARBOSA FILHO; COSTA, 2010) e potássio (FAGERIA et al., 2001), porém todos em experimentos realizados com solo. Já, a eficiência no uso de cálcio foi investigada para as culturas da soja (SPEHAR; GALWEY, 19997), tomate (LI; GABELMAN, 1990; CAINES; SHENNAN, 1999) e café (TOMAZ et al., 2003), em solução nutritiva.

Não foram encontrados registros de avaliação da eficiência no uso de cálcio para a cultura do feijão, embora o cálcio seja fundamental para o crescimento e o desenvolvimento dessa espécie e limitante para essa cultura, principalmente em áreas de baixa fertilidade do solo. A avaliação e a seleção de linhagens eficientes no uso de cálcio são importantes para o melhoramento genético da cultura, contribuindo para a sustentabilidade da produção de feijão, principalmente em um cenário futuro de reduzida disponibilidade de fertilizantes químicos e de cultivo em áreas degradadas.

Dessa forma, os objetivos deste trabalho foram avaliar a resposta de cultivares de feijão a diferentes concentrações de cálcio na solução nutritiva na produção de massa seca de

folhas, caules e parte aérea, nos componentes da produtividade de grãos e no acúmulo de cálcio, potássio e magnésio em folhas, caules e em grãos maduros de feijão; investigar a associação entre esses caracteres; avaliar a variabilidade genética de linhagens de feijão quanto aos caracteres de produção e ao acúmulo de cálcio em diferentes tecidos da planta, em solução nutritiva com baixa e alta concentração de cálcio; e identificar linhagens de feijão eficientes no uso de cálcio e responsivas a aplicação de cálcio na solução nutritiva por meio de diferentes índices.

A tese é composta de três artigos científicos, o primeiro intitulado “Crescimento e produção de grãos de plantas de feijão cultivadas com diferentes disponibilidades de cálcio.” é apresentado nas normas da revista *Ciência Agronômica*. O segundo artigo “Concentração de cálcio na produção e na partição de minerais em cultivares de feijão” atende as normas da revista *Journal of the Science of Food and Agriculture*. O terceiro artigo “Variabilidade genética de linhagens de feijão para eficiência e resposta ao cálcio” é apresentado nas normas da revista *Euphytica*.

1 **Crescimento e produção de grãos de plantas de feijão cultivadas com diferentes**
2 **disponibilidades de cálcio**

3 Growth and grain yield of common bean plants grown with different calcium availabilities

4
5 **RESUMO-** O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma importante fonte de cálcio para a
6 alimentação humana. O objetivo desse trabalho foi avaliar a resposta de três cultivares de
7 feijão a diferentes disponibilidades de cálcio no crescimento da planta, na produção de grãos e
8 no acúmulo de cálcio em folhas, caule e em grãos de feijão, bem como investigar a associação
9 entre esses caracteres. Um experimento foi conduzido em casa-de-vegetação, em
10 delineamento inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas. As parcelas principais
11 foram constituídas por cinco concentrações de cálcio fornecidas através de uma solução
12 nutritiva (1,10; 1,65; 2,20; 2,75 e 3,30 mmol L⁻¹) e nas subparcelas foram distribuídas as três
13 cultivares de feijão (BRS Expedito, Carioca e Iraí). Na concentração de 3,30 mmol L⁻¹ foram
14 obtidos os maiores valores para número de vagens por planta, número de grãos por planta,
15 massa de grãos na maturação e maior acúmulo de cálcio nos grãos para as três cultivares de
16 feijão. A maior concentração do nutriente nas folhas foi obtida com a concentração de 2,64
17 mmol L⁻¹ na solução nutritiva, nas três cultivares as plantas de feijão apresentam maior
18 concentração de cálcio nas folhas. As cultivares de feijão BRS Expedito, Carioca e Iraí
19 acumulam maior quantidade de cálcio nas folhas, seguido pelos caules e grãos. A seleção
20 indireta pela maior massa seca de parte aérea e maiores valores das variáveis que formam a
21 produtividade de grãos em feijão será eficiente para aumentar o acúmulo de cálcio nos grãos
22 de feijão.

23 **Palavras chave:** *Phaseolus vulgaris*. Massa seca. Componentes da produtividade. Acúmulo
24 de cálcio. Análise de correlação.

25 **ABSTRACT-** The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is an important source of calcium
26 for human diet. The aim of this study was to evaluate the response of three common bean
27 cultivars to different availabilities of calcium in plant growth, grain yield and calcium
28 accumulation in leaves, stems and common bean grains, as well as to investigate the
29 association between these characters. An experiment was conducted in a green house in a
30 completely randomized design with a split plot. The main plots consisted of five
31 concentrations of calcium supplied through a nutrient solution (1.10, 1.65, 2.20, 2.75 and 3.30
32 mmol L⁻¹) and the plots were allotted the three common bean cultivars (BRS Expedito,
33 Carioca and Iraí). At the concentration of 3.30 mmol L⁻¹ showed the highest values for
34 number of pods per plant, number of grains per plant, grain mass at maturity and greater
35 accumulation of calcium in the grains for the three cultivars. The highest concentration in the
36 leaves was obtained by concentration of 2.64 mmol L⁻¹ in nutrient solution, in three common
37 bean cultivars have a higher calcium concentration in leaves. The BRS Expedito, Carioca and
38 Iraí accumulate greater amount of calcium in the leaves, followed by stems and grains.
39 Indirect selection for higher dry shoot and highest values of the variables that form the grain
40 yield in beans will be efficient to increase the accumulation of calcium in common bean
41 grains.

42 **Keys words:** *Phaseolus vulgaris*. Dry matter. Yield components. Calcium accumulation.
43 Correlation analysis.

44

45

INTRODUÇÃO

46 As principais cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) disponíveis para o cultivo no
47 Brasil apresentam ciclo de 90 dias, ou seja, intermediário (MAPA, 2012; ZIMMERMANN *et*
48 *al.* 1996). Como esse período é curto quando comparado a outras culturas produtoras de
49 grãos, a disponibilidade de água e de nutrientes no solo é limitante ao crescimento e

50 desenvolvimento das plantas, pois o sistema radicular é pequeno e pouco desenvolvido
51 (SILVA; MORAES; SOUZA, 2011). Por isso, a elevação da concentração de cálcio no
52 ambiente radicular é importante, pois preserva a capacidade de absorção das raízes, devido à
53 manutenção da integridade da membrana plasmática, e previne as perdas de solutos para a
54 solução externa, aumentando o acúmulo de nutrientes na planta (MALAVOLTA, 2006).

55 A deficiência de cálcio no ambiente no ambiente radicular reduz a altura das plantas, a
56 área foliar e a produção de massa seca de folhas, caules e raízes de plantas de feijão (LEAL;
57 PRADO, 2008). Isso ocorre porque o cálcio desempenha funções fisiológicas vitais como
58 estruturação das paredes celulares, pelos pectatos de cálcio, estabilização de membranas,
59 sinalização celular, interação com fito-hormônios e, também, afeta a germinação do grão de
60 pólen, o crescimento do tubo polínico e a alongação das raízes (MARSCHNER, 1995; GE;
61 TIAN; RUSSEL, 2007; GILLIHAM *et al.* 2011).

62 O cálcio absorvido pelas raízes é translocado para as plantas de feijão e se acumula
63 principalmente nas folhas, seguido pelos caules e flores (POMPER; GRUSAK, 2004). As
64 folhas de feijão comum e de feijão vagem são grandes acumuladoras de cálcio (SOUZA
65 JÚNIOR; NASCIMENTO; MARTINEZ, 1998; POMPER; GRUSAK, 2004; FAVARO *et al.*
66 2007). Entretanto, parte do cálcio acumulado nas folhas das plantas de feijão pode estar na
67 forma de oxalato insolúvel, principalmente quando cultivadas em solução nutritiva com alta
68 concentração de cálcio (ZINDLER-FRANH *et al.* 2001). O oxalato de cálcio não é
69 prontamente absorvido no alimento e por isso pode diminuir a disponibilidade de cálcio para
70 o organismo humano (WHITE; BROADLEY, 2005).

71 O cálcio presente nas vagens e nos grãos imaturos do feijão vagem é prontamente
72 absorvido pelo organismo humano (GRUSAK *et al.* 1996). No entanto, a aplicação de cálcio
73 no solo não aumenta a concentração de cálcio nas vagens imaturas de feijão vagem
74 (MIGLIORANZA *et al.* 1997; QUINTANA *et al.* 1999). Isso ocorre porque o cálcio é

75 transportado pelo xilema, sendo baixa a sua mobilidade no floema (FROSSARD *et al.* 2000).
76 Portanto, o suprimento de cálcio no ambiente radicular não é a estratégia mais eficiente para
77 aumentar a concentração de cálcio nos grãos de feijão.

78 JOST *et al.* (2009) indicaram que é possível aumentar a concentração de cálcio nos
79 grãos de feijão através do melhoramento genético. Por meio de cruzamentos dirigidos entre
80 genitores contrastantes para a concentração de cálcio nos grãos, esses autores selecionaram
81 recombinantes com 33,64% mais cálcio nos grãos de feijão. No entanto, a obtenção de
82 linhagens de feijão com alta concentração de cálcio nos grãos e de alta produtividade de grãos
83 pode ser dificultada, pois estes caracteres apresentaram estimativa de correlação negativa e de
84 baixa magnitude ($r = -0,16$) (JOST *et al.* 2012).

85 A maior parte das pesquisas para avaliar a resposta de plantas de feijão ao cálcio tem
86 sido conduzida em condições de campo (MIGLIORANZA *et al.* 1997; QUINTANA *et al.*
87 1996; QUINTANA *et al.* 1999). No solo, o cálcio está envolvido em reações complexas com
88 os demais elementos químicos presentes na solução do solo. Por isso, os resultados obtidos
89 nesses trabalhos acabam estabelecendo relações a respeito do papel do cálcio como
90 neutralizador do solo, bem como a respeito de suas relações com outros cátions como potássio
91 e magnésio e não do seu papel como nutriente para a planta.

92 No entanto, em experimentos conduzidos em solução nutritiva é possível ter um maior
93 grau de controle dos fatores que controlam a absorção de água e nutrientes, como
94 disponibilidade de água, pH, salinidade e, também, isolar o efeito de variações dos outros
95 nutrientes sobre o crescimento e a produtividade. Assim, quando as plantas de feijão foram
96 cultivadas em solução nutritiva com concentrações elevadas de cálcio se observou aumentos
97 na produção de massa seca da parte aérea e das raízes e na concentração de cálcio na parte
98 aérea, nas vagens e nas raízes de plantas de feijão (FAVARO *et al.* 2007; SILVA; MORAES;
99 SOUZA, 2011; SOUZA JÚNIOR *et al.* 1998).

125 Sobre os dispositivos de cultivo foram dispostos os vasos de polipropileno de fundo
126 perfurado, com capacidade para 4 dm³. Os vasos foram preenchidos com areia média
127 (granulometria entre 1,2 a 2,4 mm), previamente lavada com solução de hipoclorito de sódio a
128 1%. Estes foram dispostos sobre as bancadas, espaçados a uma distância de 30 cm na linha e 5
129 cm entre as linhas. Em cada vaso foram semeadas quatro sementes de cada cultivar e no
130 estágio de V2 (folhas primárias abertas) foi realizado o desbaste para uma planta por vaso. A
131 unidade experimental foi constituída por um vaso com uma planta.

132 O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com parcelas
133 subdivididas, com seis repetições. As parcelas principais foram constituídas por cinco
134 concentrações de cálcio na solução nutritiva cinco dispositivos de cultivo, onde foram
135 empregadas cinco doses de cálcio: 1,10; 1,65; 2,20; 2,75 e 3,30 mmol L⁻¹ em solução nutritiva
136 de referência de Furlani; Fernandes Júnior (2004), modificada com objetivo de manter o
137 equilíbrio iônico da solução, apesar das variações na disponibilidade de cálcio (ANDRIOLO,
138 1999) (Tabela 1). A solução nutritiva com cada uma das cinco concentrações foi fornecida a
139 todas as plantas da bancada, havendo uma bancada para cada concentração.

140 Nas sub-parcelas foram dispostas três cultivares de feijão, com diferentes concentrações
141 de cálcio nos grãos, determinadas em experimento prévio conduzido em campo: Iraí (1,0 g kg⁻¹
142 de matéria seca - MS), BRS Expedito (2,0 g kg⁻¹ de MS) e Carioca (1,5 g kg⁻¹ de MS)
143 (JOST, 2011). A cultivar Iraí é do grupo gênico Andino, possui grãos do tipo manteigão
144 (fundo bege com rajadas vermelhas), hábito de crescimento determinado (tipo I) e ciclo precoce.
145 A BRS Expedito é do grupo gênico Mesoamericano, com grãos do grupo comercial preto,
146 hábito de crescimento indeterminado com guias curtas (tipo II) e ciclo intermediário. A
147 Carioca é do grupo gênico Mesoamericano, com grãos do tipo carioca (fundo bege com
148 estrias marrons), hábito de crescimento indeterminado com guias longas (tipo III) e ciclo
149 intermediário.

150 As soluções nutritivas foram fornecidas em quatro turnos de rega de 15 minutos,
 151 conforme estimado por Andriolo *et al.* (2010). A cada dois dias realizou-se o monitoramento
 152 da condutividade elétrica (CE) e do pH das soluções contidas nos reservatórios, Para
 153 condutividade elétrica os valores iniciais das soluções variaram entre 1,0 e 1,5 mS, já para pH
 154 esses valores ficaram entre 5,8 e 6,2. Sempre que a CE apresentou um desvio superior a 10%,
 155 em relação ao valor inicial, foi realizada a sua correção com adição de água ou de alíquotas de
 156 nova solução nutritiva, conforme a necessidade. O pH da solução foi mantido na faixa de 5,5
 157 a 6,5 mediante adição de NaOH ou H₂SO₄ na concentração de 1N. A solução nutritiva foi
 158 completamente renovada nos reservatórios sempre que o nível atingiu 33,3% da capacidade
 159 do reservatório.

160 Os tratamentos consistiram de soluções nutritivas contendo diferentes concentrações de
 161 cálcio, empregando os fertilizantes solúveis nitrato de potássio, nitrato de cálcio-Calclinit®,
 162 nitrato de amônio, sulfato de potássio, monofosfato de potássio e sulfato de magnésio. As
 163 concentrações dos demais nutrientes foram ajustadas de forma a manter o equilíbrio
 164 eletroquímico das soluções nutritivas.

165

166 **Tabela 1-** Composição das soluções nutritivas com diferentes concentrações de cálcio (Ca)
 167 empregadas como tratamentos nas parcelas principais.

Tratamentos	Concentrações (mmol L ⁻¹)					
	N total	K ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻
T1 (1,10 meq L ⁻¹ de Ca) ²	6,76	4,50	1,50	1,10	1,00	1,00
T2 (1,65 meq L ⁻¹ de Ca)	8,15	5,00	1,00	1,65	1,00	1,00
T3 (2,20 meq L ⁻¹ de Ca)	8,03	5,00	1,00	2,20	1,00	1,75
T4 (2,75 meq L ⁻¹ de Ca)	8,61	5,70	2,50	2,75	1,00	1,75
T5 (3,30 meq L ⁻¹ de Ca)	9,54	5,25	1,50	3,30	1,50	2,00

168 ^{*1}Em todos os tratamentos foram adicionados 0,1 ml L⁻¹ de solução com micronutrientes, exceto o ferro que foi
 169 fornecido na forma quelatizada (1 mg L⁻¹).

170 ²Houve o acréscimo de 40 mg L⁻¹ de NH₄NO₃.

171

172 Para cada cultivar foram cultivadas 12 plantas em cada dispositivo. Na floração
173 (estádio fenológico R6) foram coletadas seis plantas para a quantificação da massa seca. Para
174 isso, as plantas foram coletadas individualmente e fracionadas em parte aérea (caule + folhas)
175 e raízes. As raízes foram lavadas em água corrente para a remoção da areia. As frações da
176 planta (folhas, caule e raízes) foram acondicionadas individualmente em sacos de papel,
177 previamente identificados, e secas em estufa de secagem com circulação forçada (65 a 70°C),
178 até atingirem massa constante, quando se determinou a massa seca das frações de planta. As
179 demais seis plantas foram conduzidas até a maturação (estádio fenológico R9), quando se
180 quantificou o número de vagens por planta, o número de grãos por planta, o número de grãos
181 por vagem e a massa de grãos por planta.

182 Após a quantificação da massa seca, foi realizada a moagem das frações da planta para a
183 determinação da concentração de cálcio. Foram moídas 5 g de folhas, caule da coleta
184 realizada no estágio R6 e grãos (estádio R9) de cada planta, de forma individual, em moinho
185 analítico de faca até a obtenção de partículas de tecido vegetal inferiores a 1 mm. Para cada
186 tratamento, foram moídas amostras de três repetições.

187 A concentração de cálcio foi determinada em 0,1 g de amostra moída de folhas, de caule
188 e de grãos das plantas, separadamente. A digestão foi realizada com ácido perclórico e ácido
189 nítrico concentrado (1/5, w/v) a 60 °C por 12 horas, de acordo com a metodologia descrita por
190 Ribeiro *et al.* (2012). Posteriormente, as amostras foram diluídas 10 vezes com água
191 deionizada. As soluções amostrais foram alimentadas com uma bomba peristáltica, dentro de
192 um coletor, e, em seguida, na bobina de reação, onde foram vaporizados como cálcio livre e
193 varridos pelo gás de arraste inerte (argônio). A concentração de cálcio foi determinada por
194 espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICPE-900).

195 Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância considerando o modelo
196 inteiramente casualizado com parcelas subdivididas, com seis repetições para os caracteres da

197 produção e com três repetições para a concentração de minerais nos tecidos da planta. O teste
198 F (valor-p <0,05) foi usado para os testes das hipóteses dos efeitos principais e da interação
199 concentração de cálcio x cultivares, considerando todos os efeitos como fixos. Quando a
200 interação ou o efeito de concentração de cálcio foi significativo, foi realizada a análise de
201 regressão pelo método dos polinômios ortogonais, ajustando-se a equação de maior grau
202 significativo. Nos casos, em que o efeito de cultivares foi significativo, o teste Tukey foi
203 usado para a comparação de médias (valor-p <0,05).

204 Foi estimada a matriz com os coeficientes de correlação linear de Pearson entre os
205 caracteres avaliados e se verificou a significância dos coeficientes por meio do teste *t* (valor-p
206 <0,05). As análises estatísticas foram efetuadas com a planilha eletrônica Office Excel e com
207 os softwares Sigma Plot (SIGMAPLOT, 2008) e Genes (CRUZ, 2006).

208 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

209 Na análise de variância observou-se interação significativa da concentração de cálcio x
210 cultivares de feijão apenas para o número de grãos por vagem (valor-p <0,05) (Tabela 2).
211 Portanto, a resposta das cultivares de feijão BRS Expedito, Carioca e Iraí para o número de
212 grãos por vagem não foi paralela com a variação da concentração de cálcio na solução
213 nutritiva.

214 Os caracteres massa seca de caule, massa seca de folhas, massa seca de parte aérea,
215 número de vagens por planta, número de grãos por planta, massa de grãos por planta,
216 concentração de cálcio no caule, concentração de cálcio nas folhas e concentração de cálcio
217 nos grãos, apresentaram efeito significativo para concentração de cálcio na solução nutritiva
218 (Tabela 2). Os caracteres massa seca de caule, massa seca de folhas, massa seca de parte
219 aérea, número de vagens por planta, número de grãos por planta, número de grãos por vagem,
220 massa de grãos por planta e concentração de cálcio nos grãos foram significativos para
221 cultivares de feijão.

Os valores de coeficiente de variação variaram entre 8,12% (massa seca de folhas) a 18,95% (número de grãos por planta) (Tabela 2). Coeficientes de variação com amplitude semelhante foram observados para massa seca de parte aérea (FAVARO *et al.* 2007), massa seca de folhas e de caule e para a concentração de cálcio nas folhas (LEAL; PRADO, 2008) de feijão cultivado em solução nutritiva. Portanto, alta precisão experimental para os caracteres da produção e para o acúmulo de cálcio na planta foi verificada em experimentos com feijão cultivado em solução nutritiva.

Tabela 2 - Resumo da análise de variância e de regressão para as variáveis massa seca de caule (MSC, g), massa seca de folhas (MSF, g), massa seca de parte aérea (MSPA, g), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), número de grãos por vagem (NGV), massa de grãos por planta (MGP, g), concentração de cálcio no caule (Ca caule, g kg⁻¹ de matéria seca - MS), concentração de cálcio nas folhas (Ca folhas, g kg⁻¹ de MS) e concentração de cálcio nos grãos (Ca grãos, g kg⁻¹ de MS), avaliadas em três cultivares de feijão submetidas a cinco concentrações de cálcio na solução nutritiva.

		Quadrado Médio					
Fonte de Variação	G.L	MSC	MSF	MSPA	NVP	NGP	
Concentração (A)	4	2,20 *	3,46 *	10,79 *	47,28 *	1318,76 *	
Erro A	25	0,79	0,84	2,85	7,51	190,36	
Cultivar (B)	2	14,61 *	19,8 *	60,72 *	180,11 *	13149,9 *	
A X B	8	1,39 n.s.	0,77 n.s.	3,77 n.s.	10,81 n.s.	463,31 n.s.	
Erro B	50	0,70	1,57	3,87	8,58	238,07	
Grau 1	1	2,93 n.s.	4,60 n.s.	14,36 n.s.	63,04 *	1743,55 *	
Grau 2	1	1,99 n.s.	3,23 n.s.	10,39 n.s.	57,05 n.s.	1624,90 n.s.	
Grau 3	1	0,79 n.s.	1,08 n.s.	3,97 n.s.	5,60 n.s.	116,96 n.s.	
Desvio	1	3,08	4,93	14,35	63,45	1719,57	
Média		4,25	4,99	9,25	10,47	46,76	
C.V. (%)		19,62 ⁴ - 15,68 ⁵	18,37 ⁴ -8,12 ⁵	18,27 ⁴ -16,85 ⁵	16,17 ⁴ -17,96 ⁵	19,50 ⁴ -18,95 ⁵	
Fonte de Variação	G.L	NGV	MGP	G.L	Ca caule	Ca folhas	Ca grãos
Concentração (A)	4	0,25 n.s.	174,54 *	4	11,18 *	43,37 *	0,08 *
Erro A	25	0,21	18,03	10	1,17	12,19	0,43
Cultivar (B)	2	43,94 *	278,00 *	2	10,58 n.s.	52,22 n.s.	0,57 *
A X B	8	0,60 *	17,93 n.s.	8	0,97 n.s.	26,6 n.s.	0,53 n.s.
Erro B	50	0,23	28,97	20	0,69	15,09	0,5
Grau 1	1	0,28 ¹ -0,16 ² -0,03 ³ n.s.	241,27 *	1	22,93 n.s.	66,45 n.s.	0,05 *
Grau 2	1	0,25 ¹ -0,05 ² -0,02 ³ n.s.	227,92 n.s.	1	9,47 n.s.	34,11 *	0,04 n.s.
Grau 3	1	0,02 ¹ -0,05 ² -0,01 ³ n.s.	2,95 n.s.	1	3,46 n.s.	21,99 n.s.	0,03 n.s.
Desvio	1	0,01 ¹ -0,06 ² -0,01 ³	226,02	1	8,84	50,70	1,98
Média		4,40	14,52		5,60	16,16	0,95
C.V. (%)		10,43 ⁴ -8,26 ⁵	12,65 ⁴ -17,06 ⁵		19,33 ⁴ -14,85 ⁵	11,60 ⁴ -14,03 ⁵	14,36 ⁴ -11,75 ⁵

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. Ns = não significativo.

¹ Valor correspondente a cultivar BRS Expedito. ² Valor correspondente a cultivar Carioca. ³ Valor correspondente a cultivar Iraí. ⁴ Coeficiente de variação da parcela principal. ⁵ Coeficiente de variação da subparcela.

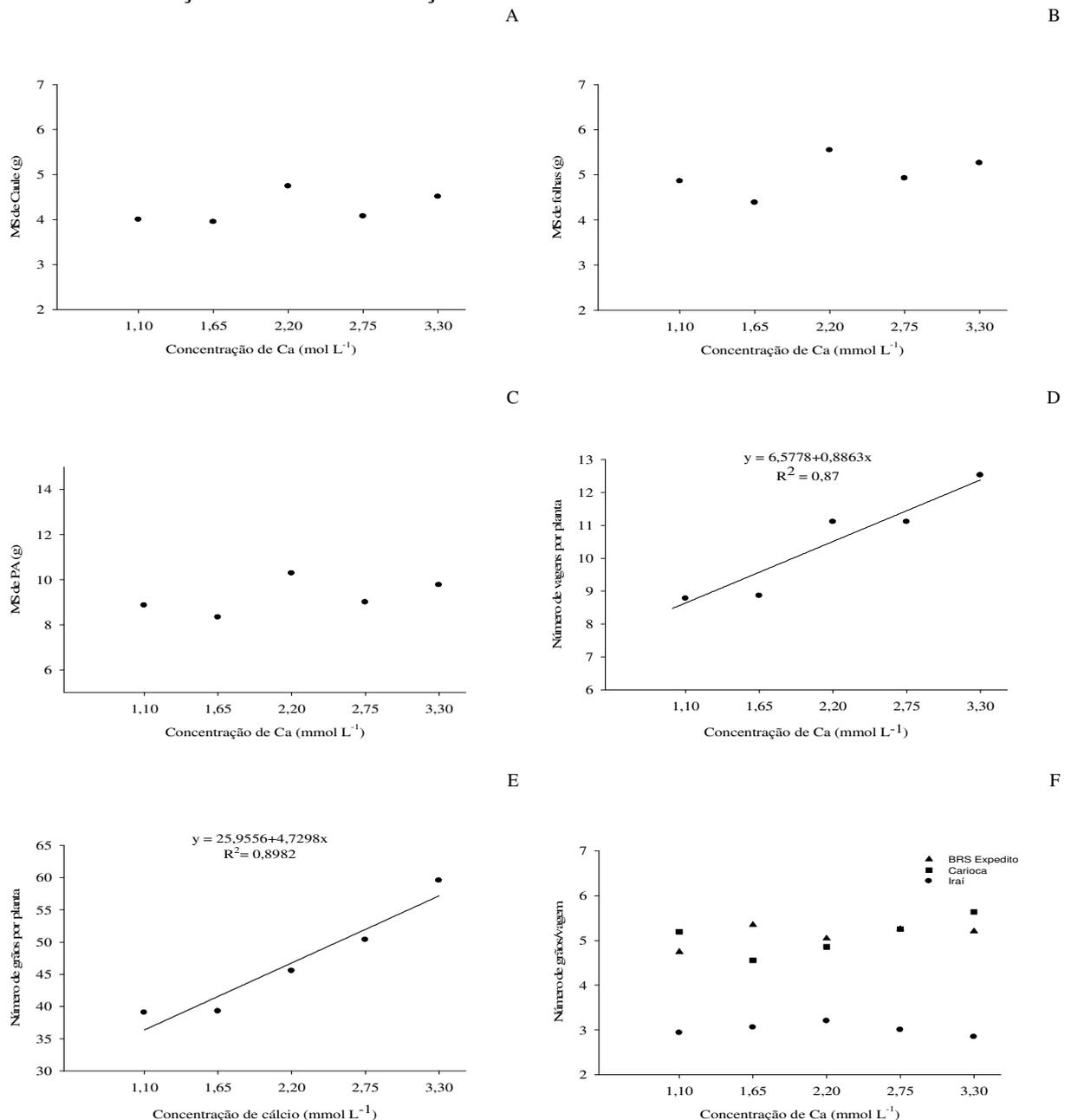
Para a massa seca de caule, de folhas e de parte aérea foi constatado efeito significativo para a concentração de cálcio na solução nutritiva, porém as regressões de 1º, 2º e 3º graus

242 não foram significativas (Tabela 2). Portanto, não se obteve resposta linear, quadrática ou
243 cúbica para a massa seca de caule, de folhas e de parte aérea de plantas de feijão na floração,
244 em resposta a concentração de cálcio na solução nutritiva. Como modelos não lineares,
245 normalmente, não apresentam explicação biológica, nas Figuras 1A, 1B e 1C foram
246 apresentados os valores obtidos para esses caracteres. No entanto, Silva; Moraes; Souza
247 (2011) observaram resposta quadrática para a massa seca de parte aérea de plantas de feijão
248 avaliadas aos 45 dias de cultivo em solução nutritiva, em presença de alumínio, com ponto de
249 máxima eficiência técnica estimado na concentração de 0,96 mmol L⁻¹ de cálcio. Souza
250 Júnior; Nascimento; Martinez (1998), de maneira similar, verificaram que a maior massa seca
251 de parte aérea de plantas de feijão com 30 dias de cultivo em solução nutritiva, em presença
252 de alumínio, foi obtida na concentração de 1,40 mmol L⁻¹ de cálcio e que concentrações
253 maiores de cálcio na solução reduziram a massa seca da parte aérea das plantas. As diferenças
254 de respostas observadas para a massa seca de parte aérea de plantas de feijão cultivadas em
255 solução nutritiva com diferentes concentrações de cálcio podem ser justificadas pela
256 composição química das soluções nutritivas, diferenças genéticas entre as cultivares e estágio
257 de desenvolvimento das plantas de feijão. Cabe resaltar que na presença do alumínio o efeito
258 do cálcio consiste em neutralizar os efeitos tóxicos desse elemento sobre o crescimento da
259 planta. No presente estudo não havia presença de alumínio na composição dos tratamentos,
260 sendo nesse caso possível determinar o efeito do cálcio sobre o crescimento e a produção, não
261 sendo encontrados resultados similares na literatura.

262 O número de vagens por planta e o número de grãos por planta foram maiores com o
263 aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva (Figura 1D e 1E). Como a resposta foi
264 linear, a tendência indica que maior número de vagens e de grãos por planta em feijão poderia
265 ser obtido com concentrações de cálcio superiores a 3,30 mmol L⁻¹ na solução nutritiva. Em

266 feijão vagem, o número de vagens verdes, colhidas 10 – 12 dias após a antese, também,
 267 aumentou com a concentração de cálcio na solução nutritiva (FAVARO *et al.* 2007).

268 **Figura 1** - Massa seca de caule (MS de caule, g) (A), massa seca de folhas (MS de folhas, g)
 269 (B), massa de parte aérea (MS de PA, g) (C), número de vagens por planta (D), número de
 270 grãos por planta (E) e número de grãos por vagem (F) de cultivares de feijão submetidas a
 271 cinco concentrações de cálcio na solução nutritiva.



272

273 Isso ocorre porque o cálcio afeta a germinação do grão de pólen e o crescimento do tubo

274 polínico, contribuindo para a maior fertilidade das plantas em condições de maior suprimento

275 de cálcio (GE; TIAN; RUSSEL, 2007). Como consequência, houve maior fixação de flores e
276 de vagens e isso resultou no aumento do número de vagens e de grãos por planta nas
277 concentrações mais elevadas de cálcio na solução nutritiva (Figura 1D e 1E). Entretanto,
278 deverá haver uma concentração máxima acima da qual esse nutriente não mais aumentará o
279 número de vagens porque o número potencial de drenos da planta é limitado. Novos
280 experimentos serão necessários para determinar esses limites nas cultivares empregadas.

281 O número de grãos por vagem foi alterado com as cultivares de feijão em resposta a
282 concentração de cálcio na solução nutritiva, pois a interação entre esses dois fatores foi
283 significativa (Tabela 2). A cultivar Iraí apresentou em média 3,01 grãos por vagem, inferior
284 ao valor observado nas cultivares BRS Expedito e Carioca (5,12 e 5,10 grãos por vagem,
285 respectivamente). Esses valores obtidos estão de acordo com o que é esperado para as
286 cultivares de feijão da espécie *Phaseolus vulgaris* L., que se caracteriza por apresentar até oito
287 grãos por vagem. Porém, na análise de regressão não foram significativos o 1º, o 2º e o 3º
288 graus e, como consequência, não se observou resposta linear, quadrática ou cúbica da
289 concentração de cálcio na solução nutritiva para o número de grãos por vagem (Figura 1F).

290 A massa de grãos por planta apresentou resposta linear ao aumento da concentração de
291 cálcio na solução nutritiva (Figura 2A). Portanto, não foi possível estimar a concentração de
292 cálcio que proporciona a maior massa de grãos por planta. Todavia, na concentração de 3,30
293 mmol L⁻¹ de cálcio na solução nutritiva, a massa de grãos por planta foi de 18,57 g, o que
294 representa um incremento de quase duas vezes no valor observado na menor concentração de
295 cálcio (10,33 g). O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva contribuiu para um
296 aumento expressivo na produção de massa de grãos por planta (Figura 2A) e isso foi
297 conseguido devido ao aumento do número de vagens (Figura 1D) e de grãos por planta
298 (Figura 1E).

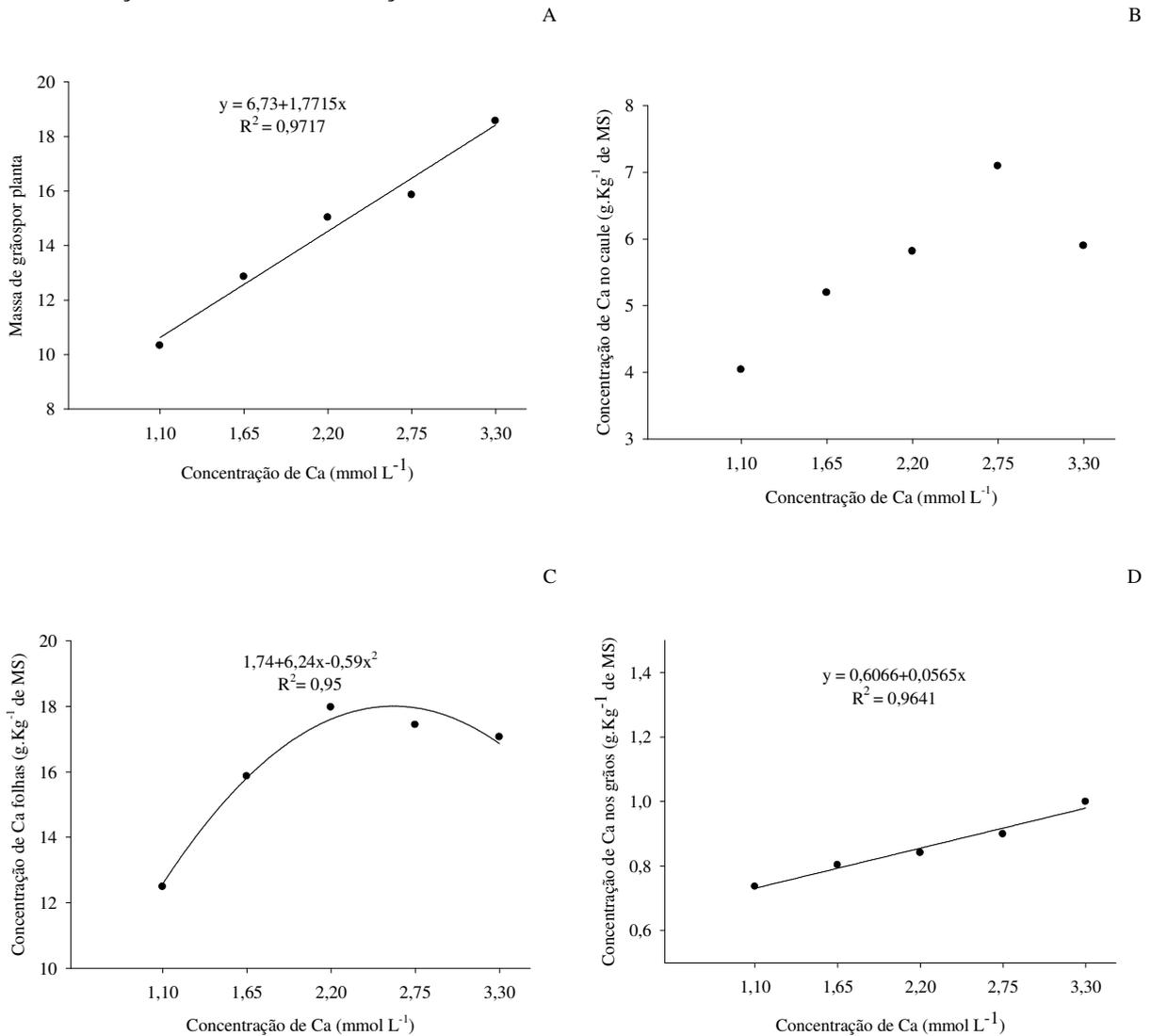
299 Não foram encontrados trabalhos em solução nutritiva em que as plantas de feijão
300 fossem conduzidas até o final do ciclo. Portanto, esse é o primeiro relato do efeito da
301 concentração de cálcio em condições onde não ocorre o efeito tóxico do alumínio e/ou de
302 outros elementos presentes na solução do solo com efeitos negativos sobre o crescimento e
303 produção de grãos de feijão. Concentrações de cálcio superiores precisam ser testadas para
304 verificar se é possível aumentar ainda mais os componentes da produtividade de grãos em
305 feijão com o suprimento de cálcio. Sob o ponto de vista de adubação, experimentos em
306 condições de solo devem ser realizados com doses maiores do que aquelas que têm sido
307 empregadas por outros autores, a fim de determinar o efeito do cálcio como nutriente e não
308 somente como corretivo para neutralizar o efeito de elementos tóxicos como o alumínio.

309 O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva resultou no maior acúmulo de
310 cálcio nas folhas até a concentração de 2,64 mmol L⁻¹ (ponto de máxima eficiência técnica)
311 (Figura 2C). Concentrações de cálcio superiores na solução nutritiva provocaram a
312 diminuição da concentração de cálcio nas folhas. A comparação com os resultados obtidos no
313 presente estudo é dificultada, pois nos experimentos de feijão conduzidos com diferentes
314 concentrações de cálcio na solução nutritiva, normalmente, se avalia a concentração de cálcio
315 na parte aérea (folhas e caules) das plantas (SOUZA JÚNIOR; NASCIMENTO; MARTINEZ,
316 1998 *et al.* 1998; FAVARO *et al.* 2007; SILVA; MORAES; SOUZA, 2011). Nesta condição,
317 o maior acúmulo de cálcio na parte aérea das plantas de feijão comum foi obtido na
318 concentração de 1,40 mmol L⁻¹ (SOUZA JÚNIOR; NASCIMENTO; MARTINEZ, 1998) e de
319 2,89 mmol L⁻¹ nas plantas de feijão vagem (FAVARO *et al.* 2007).

320 Na concentração de 2,20 mmol L⁻¹ de cálcio na solução nutritiva se obteve a maior
321 concentração de cálcio nas folhas (17,97 g kg⁻¹ de MS) das plantas de feijão, representando
322 um incremento de 43,87% em relação à concentração de cálcio obtida nas folhas na menor
323 concentração de cálcio avaliada na solução nutritiva (Figura 2C). Portanto, é possível

324 aumentar o acúmulo de cálcio nas folhas de feijão na floração com o suprimento de cálcio na
 325 solução nutritiva. Quando as plantas de feijão foram cultivadas em alta concentração de cálcio

326 **Figura 2-** Massa de grãos por planta (g) (A), concentração de cálcio (Ca) no caule (g kg^{-1} de
 327 matéria seca - MS) (B), concentração de cálcio nas folhas (g kg^{-1} de MS) (C) e concentração
 328 de cálcio nos grãos (g kg^{-1} de MS) (D) de cultivares de feijão submetidas a cinco
 329 concentrações de cálcio na solução nutritiva.



330

331 na solução nutritiva ($7,5 \text{ mmol L}^{-1}$) foi constatado que as folhas de feijão apresentaram
 332 maior quantidade de cálcio e de oxalato insolúveis (ZINDLER-FRANK; HONOW; HESSE,
 333 2001). Como o oxalato de cálcio não é prontamente absorvido no alimento (WHITE;

334 BROADLEY, 2005), a disponibilidade do cálcio presente nas folhas de feijão deverá ser
335 avaliada.

336 Não foram encontradas informações quanto ao uso de folhas de feijão como fonte de
337 cálcio para a alimentação humana. Todavia, é conhecido que as folhas verdes de feijão
338 apresentam alto valor nutricional, pois a concentração de ferro é sete vezes superior ao valor
339 encontrado em grãos de feijão (TRYPHONE; NCHIMBI-MSOLLA, 2010) e o teor de fibra é
340 duas vezes maior ao valor determinado em folhas de couve (FONSECA *et al.* 2002). No
341 presente estudo, se constatou que as folhas de feijão na floração são ricas em cálcio,
342 apresentando, aproximadamente, 18 vezes mais cálcio do que os grãos de feijão na maturação
343 (Figuras 2C e 2D). Portanto, a análise sensorial destas folhas precisa ser realizada para avaliar
344 a sua aceitação pelo consumidor.

345 A concentração de cálcio nos grãos aumentou com a concentração de cálcio na solução
346 nutritiva (Figura 2D), sendo de 0,74 g kg⁻¹ de MS (1,10 mmol L⁻¹) a 1,00 g kg⁻¹ de MS (3,3
347 mmol L⁻¹), representando um incremento de 35% no acúmulo de cálcio nos grãos. O acúmulo
348 de cálcio nos grãos foi reduzido se comparado às folhas, pois o cálcio é pouco móvel no
349 floema (FROSSARD *et al.* 2000). Por isso, a suplementação de cálcio via fertilização no solo
350 não foi eficiente para aumentar a concentração de cálcio nas vagens imaturas de feijão vagem
351 (MIGLIORANZA *et al.* 1997; QUINTANA *et al.* 1999). No entanto, por melhoramento
352 genético foi possível aumentar em 33,64% na concentração de cálcio nos grãos de feijão
353 (JOST *et al.* 2009), porcentual muito semelhante ao verificado no presente estudo. A
354 biofortificação através do melhoramento genético, que consiste no aumento da concentração
355 de elementos essenciais biodisponíveis em partes comestíveis das plantas (WHITE;
356 BROADLEY, 2005) é, portanto, uma estratégia promissora para o aumento da concentração
357 de cálcio em grãos de feijão sendo tão eficiente quanto a nutrição de cálcio via fertilização.

358 O desdobramento do efeito de cultivares é apresentado na Tabela 3. As cultivares BRS
 359 Expedito e Carioca apresentaram maior massa seca de caule, massa seca de folhas, massa seca
 360 de parte aérea, número de vagens por planta e número de grãos por planta do que a cultivar
 361 Iraí. Isso se justifica pelo fato das cultivares BRS Expedito e Carioca apresentarem hábito de
 362 crescimento indeterminado e, portanto, maior desenvolvimento vegetativo e reprodutivo. A
 363 maior massa de grãos por planta foi obtida pela cultivar Carioca.

364 As cultivares de feijão diferiram na habilidade de acumular cálcio nos grãos. A cultivar
 365 BRS Expedito apresentou maior concentração de cálcio nos grãos, diferindo
 366 significativamente, apenas da cultivar Iraí (menor acumuladora de cálcio nos grãos). Em
 367 feijão vagem, também, se observou que as linhagens diferem na habilidade de acumular cálcio
 368 nas vagens (QUINTANA *et al.* 1996; QUINTANA *et al.* 1999; MIGLIORANZA *et al.* 1997).
 369 Quintana *et al.* (1996) constataram, ainda, que as linhagens de feijão vagem que acumularam
 370 mais cálcio nas vagens, não exibiram, necessariamente, maior concentração de cálcio nas
 371 folhas.

372

373 **Tabela 3** - Valores médios para a massa seca de caule (MSC, g), massa seca de folhas (MSF,
 374 g), massa seca de parte aérea (MSPA, g), número de vagens por planta (NVP), número de
 375 grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP, g) e concentração de cálcio nos
 376 grãos (Ca grãos, g kg⁻¹ de matéria seca) avaliados em três cultivares de feijão submetidas a
 377 cinco concentrações de cálcio na solução nutritiva.

Cultivar	MSC	MSF	MSPA	NVP	NGP	MGP	Ca grãos
BRS Expedito	4,84 a*	5,11 a	9,94 a	10,88 a	54,57 a	14,27 b	1,27 a
Carioca	4,45 a	5,75 a	10,19 a	12,70 a	62,68 a	17,69 a	0,93 ab
Iraí	3,48 b	4,13 b	7,62 b	7,85 b	23,05 b	11,62 b	0,63 b
Média	4,26	5,00	9,25	10,48	46,77	14,53	0,94
C.V.%	15,68	8,12	16,85	17,96	18,95	17,06	11,75

378 *Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente (valor-p <0,05) pelo teste Tukey.

379 A maioria das estimativas de correlação obtidas entre pares de caracteres de produção e
 380 de concentração de cálcio em feijão foram positivas e de elevada magnitude (Tabela 4).
 381 Entretanto, a concentração de cálcio nas folhas de feijão não apresentou correlação
 382 significativa com nenhum dos caracteres avaliados neste estudo.

383 **Tabela 4-** Estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson entre os caracteres massa
 384 seca de caule (MSC), massa seca de folhas (MSF), massa seca de parte aérea (MSPA),
 385 número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), número de grãos por
 386 vagem (NGV), massa de grãos por planta (MGP), concentração de cálcio no caule (Ca caule),
 387 concentração de cálcio nas folhas (Ca folhas) e concentração de cálcio nos grãos (Ca grãos),
 388 avaliados em três cultivares de feijão submetidas a cinco concentrações de cálcio na solução
 389 nutritiva.

	MSF	MSPA	NVP	NGP	NGV	MGP	Ca caule	Ca folhas	Ca grãos
MSC	0,79 *	0,94 *	0,68 *	0,71 *	0,72 *	0,57 *	0,55 *	-0,06 ^{n.s.}	0,67 *
MSF		0,95 *	0,86 *	0,81 *	0,74 *	0,74 *	0,38 ^{n.s.}	-0,01 ^{n.s.}	0,61 *
MSPA			0,82 *	0,81 *	0,77 *	0,70 *	0,49 ^{n.s.}	-0,03 ^{n.s.}	0,67 *
NVP				0,93 *	0,74 *	0,92 *	0,50 ^{n.s.}	0,14 ^{n.s.}	0,76 *
NGP					0,91 *	0,84 *	0,51 *	0,09 ^{n.s.}	0,83 *
NGV						0,59 *	0,51 *	0,03 ^{n.s.}	0,83 *
MGP							0,55 *	0,26 ^{n.s.}	0,65 *
Ca caule								0,50 ^{n.s.}	0,63 *
Ca folhas									0,21 ^{n.s.}

390 * Significativo pelo teste t (valor-p <0,05). N.s.: não significativo. n = 150 observações.

391

392 A massa de grãos por planta apresentou estimativa de correlação positiva e de elevada
 393 magnitude com a massa seca de folhas (r= 0,74), a massa seca de parte aérea (r= 0,70), o
 394 número de vagens por planta (r= 0,92) e o número de grãos por planta (r= 0,84) e de
 395 moderada magnitude com a massa seca de caule (r= 0,57) e o número de grãos por vagem (r=
 396 0,59). Portanto, para aumentar a produção de grãos de feijão deve-se maximizar as variáveis
 397 que afetam a fotossíntese e, conseqüentemente, a produção de assimilados e também o
 398 tamanho do compartimento de estocagem representado pelo número de drenos (vagens) da
 399 planta. Nessa última variável, o aumento da adubação com cálcio poderá trazer contribuição
 400 importante.

401 O melhor conhecimento da associação entre a concentração de cálcio nos grãos de
 402 feijão com os caracteres da produção e com o acúmulo de cálcio na planta é importante para o
 403 desenvolvimento de cultivares biofortificadas. Neste estudo, foi constatado que a
 404 concentração de cálcio nos grãos apresentou correlação positiva com a massa seca de caule
 405 (r= 0,67), com a massa seca de folhas (r= 0,61), com a massa seca de parte aérea (r= 0,67),
 406 com o número de vagens por planta (r= 0,76), com o número de grãos por planta (r= 0,83),

407 com o número de grãos por vagem ($r= 0,83$), com a massa de grãos por planta ($r= 0,65$) e com
408 a concentração de cálcio no caule ($r= 0,63$). Portanto, a seleção indireta pelo maior
409 crescimento da parte aérea, ou seja, maior produção de massa seca de parte aérea, e maiores
410 valores das variáveis que formam a produtividade de grãos em feijão serão eficientes para
411 aumentar o acúmulo de cálcio nos grãos de feijão. Não foram encontrados na literatura
412 trabalhos de análise de correlação entre a concentração de cálcio nos grãos de feijão com a
413 produção de massa seca de parte aérea e com os componentes da produtividade de grãos, o
414 que restringiu a comparação dos resultados obtidos na presente pesquisa.

415 No entanto, a concentração de cálcio em grãos de feijão e a produtividade de grãos
416 apresentaram estimativa de correlação negativa e de baixa magnitude ($r= -0,16$) em linhagens
417 de feijão obtidas em experimento de campo (JOST *et al.* 2012). Em condições de campo, fica
418 muito difícil isolar e avaliar o efeito do cálcio no ambiente. Situação essa que é favorecida em
419 experimentos conduzidos em solução nutritiva com diferentes concentrações de cálcio e
420 demais fatores uniformes. No presente estudo, se obteve elevada associação entre a
421 concentração de cálcio nos grãos e massa de grãos por planta ($r= 0,65$). Portanto, o
422 desenvolvimento de cultivares de feijão biofortificadas para cálcio poderá contribuir, também,
423 para o aumento da produtividade de grãos.

424 CONCLUSÕES

- 425 1. Os maiores valores para número de vagens por planta, número de grãos por planta, massa
426 de grãos na maturação e acúmulo de cálcio nos grãos para as três cultivares de feijão
427 avaliadas são obtidos na concentração de $3,30 \text{ mmol L}^{-1}$ de cálcio em solução nutritiva.
- 428 2. Na concentração de $2,64 \text{ mmol L}^{-1}$ de cálcio na solução nutritiva as plantas de feijão têm
429 maior concentração de cálcio nas folhas.
- 430 3. As cultivares de feijão BRS Expedito, Carioca e Iraí acumulam maior quantidade de cálcio
431 nas folhas, seguido pelo caule e grãos.

432 4. Para a maioria dos pares de associações entre os caracteres analisados, as associações são
433 positivas e significativas, principalmente, em associações com os caracteres massa de grãos
434 por planta e concentração de cálcio nos grãos.

435 5. A seleção indireta pela maior massa seca de parte aérea e maiores valores das variáveis que
436 formam a produtividade de grãos em feijão será eficiente para aumentar o acúmulo de cálcio
437 nos grãos de feijão.

438 REFERÊNCIAS

- 439 ANDRIOLO, J.L. **Fisiologia das culturas protegidas**. Ed. UFSM, Santa Maria, 1999. 142p.
- 440 ANDRIOLO, J.L. Preparo e manejo da solução nutritiva na produção de mudas e de frutas do
441 morangueiro. *In*: SEMINÁRIO SOBRE O CULTIVO HIDROPÔNICO DE
442 MORANGUEIRO, 2007, Santa Maria, RS. **Anais...** UFSM, CCR, Departamento de
443 Fitotecnia, 2007. p.41-50.
- 444 ANDRIOLO, J.L. *et al.* Doses de potássio e cálcio no crescimento da planta, na produção e
445 na qualidade de frutas do morangueiro em cultivo sem solo. **Ciência Rural**, v.40, n.2, p.267-
446 272, 2010.
- 447 CRUZ, C.D. **Programa Genes: versão Windows, aplicativo computacional em genética e**
448 **estatística**. Ed. UFV, Viçosa, 2006. 648 p.
- 449 FAVARO, S.P. *et al.* Rates of calcium, yield and quality of snap bean. **Scientia Agricola**,
450 v.64, n.6, p.616-620, 2007.
- 451 FONSECA, S.V. *et al.* Folhas verdes de feijão na alimentação humana: avaliação sensorial,
452 adubação nitrogenada e desfolhamento. **Bragantia**, Campinas, v.61, n.2, p.161-167, 2002.

- 453 FROSSARD, E. *et al.* Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca
454 in plants for human nutrition. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.80, n.7,
455 p.861-879, 2000.
- 456 FURLANI, P.R.; FERNANDEZ JÚNIOR, F. Cultivo hidropônico de morango em ambiente
457 protegido. *In*: CORRÊA ANTUNEZ, L.E. *et al.* (Ed.). SIMPÓSIO NACIONAL DO
458 MORANGO & ENCONTRO DE PEQUENAS FRUTAS E FRUTAS NATIVAS DO
459 MERCOSUL, 2., 2004, Pelotas, RS. **Anais...** Pelotas: EMBRAPA, 2004. p.102-115.
460 (Documentos 124).
- 461 GE, L.L.; TIAN, H.Q.; RUSSEL, S.D. Calcium function and distribution during fertilization
462 in angiosperms, **American Journal of Botany**, v.94, n.6, p.1046–1060, 2007.
- 463 GRUSAK, M.A. *et al.* Intrinsic ⁴²Ca-Labeling of green bean pods for use in human
464 bioavailability studies. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.70, n.1, p.11-15,
465 1996.
- 466 GILLIHAM, M. *et al.* Calcium delivery and storage in plant leaves: exploring the link with
467 water flow, **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.7, p.2233–2250, 2011.
- 468 JOST, E. *et al.* Efeitos gênicos do teor de cálcio em grãos de feijão. **Ciência Rural**, v.39, n.1.
469 p.31-37, 2009.
- 470 JOST, E. **Seleção de famílias de feijão baseada em caracteres agronômicos e da**
471 **qualidade nutricional**. 2011. 52p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal
472 de Santa Maria, Santa Maria. 2011.
- 473 JOST, E. *et al.* Comparison among direct, indirect and index selections on agronomic traits
474 and nutritional quality traits in common bean. **Journal of the Science of Food and**
475 **Agriculture**. 2012 doi: 10.1002/jsfa.5856.

- 476 LEAL, R. M.; PRADO, R. M. Desordens nutricionais no feijoeiro por deficiência de
477 macronutrientes, boro e zinco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.4 p.301-306,
478 2008.
- 479 MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Editora Ceres, Campinas,
480 2006. 638 p.
- 481 Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, (MAPA). **Zoneamento agrícola de**
482 **risco climático: cultivares de feijão – ano – safra 2011/2012**. Disponível em:
483 <http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamentoagricola/portariassegmentadas>.
484 Acesso em :30/07/2012.
- 485 MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**, Academic Press, London, 1995. 889
486 p.
- 487 MIGLIORANZA, E. *et al.* Comparison of soil and genotypic effects of calcium concentration
488 of snap beans pods. **Hortscience**, v.32, n.1, p.68-70, 1997.
- 489 POMPER, K.W.; GRUSAK, M.A. Calcium uptake and whole-plant water use influence pod
490 calcium concentration in snap bean plants. **Journal of the American Society for**
491 **Horticultural Science**, v.129, n.6, p.890-895, 2004.
- 492 QUINTANA, J.M. *et al.* Variation in Calcium Concentration among Sixty S₁ Families and
493 Four Cultivars of Snap Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of the American Society of**
494 **Horticulture Science**, v.121, n.5, p.789–793, 1996.
- 495 QUINTANA, J.M. *et al.* Calcium fertilizers fail to affect pod calcium concentration and yield
496 of four snap bean cultivars. **HortScience**, v.34, n.4, p.646-647, 1999.

- 497 RIBEIRO, N.D. *et al.* Mineral concentrations in the embryo and seed coat of common bean
498 cultivars. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.26, n.1-2, p.86-95, 2012.
- 499 SIGMAPLOT, *Sigmaplot For windows version 11.0*. Systat Software, 2008.
- 500 SILVA, S.A.; MORAES, W.B.; SOUZA, G.S. Doses de cálcio no crescimento do feijoeiro
501 cultivado em solução nutritiva, na presença de alumínio. **Idesia**, v.29, n.3, p.53-58, 2011.
- 502 SOUZA JUNIOR, J.O; NASCIMENTO, C.W.A.; MARTINEZ. H.E.P. Resposta do feijoeiro
503 cultivado em solução nutritiva a níveis de cálcio e magnésio na presença de alumínio.
504 **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.7, p.1143-1148, 1998.
- 505 TRYPHONE, G.N.; NCHIMBI-MSOLLA, S. Diversity of common bean (*Phaseolus vulgaris*
506 *L.*) genotypes in iron and zinc contents under greenhouse conditions. **African Journal of**
507 **Agricultural Research**, v.5, n.8, p.738-747, 2010.
- 508 ZIMMERMANN, M.J.O.; *et al.* Melhoramento genético e cultivares. In: ARAUJO, R.S.;
509 RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.J.O. (Eds.). **Cultura do feijoeiro comum**
510 **no Brasil**, Piracicaba: Potafós, 1996. p.223-273.
- 511 ZINDLER-FRANK, E.; HONOW, R.; HESSE, A. Calcium and oxalate content of the
512 leaves of *Phaseolus vulgaris* at different calcium supply in relation to calcium oxalate
513 crystal formation. **Journal of Plant Physiology**, v.158, n.2, p.139-144, 2001.
- 514 WHITE, P.J.; BROADLEY, M.R. Biofortifying crops with essential mineral elements.
515 **Trends in Plant Science**, v.10, n.12, p.586-593, 2005.
- 516

1 **Concentração de cálcio na produção e na partição de minerais em** 2 **cultivares de feijão**

3
4 Lucas da Silva Domingues^a, Nerinéia Dalfollo Ribeiro^{a*}, Jerônimo Luiz Andriolo^a, Micheli
5 Thaise Della Flora Possobom^a, Allan Emanuel Mezzomo Zemolin^a
6

7 **Resumo**

8 JUSTIFICATIVA: O cálcio é um mineral essencial ao desenvolvimento das plantas e é um
9 dos minerais mais abundantes nos tecidos das plantas de feijão. Por isso, foi objetivo desse
10 trabalho foi avaliar a resposta de duas cultivares de feijão a concentrações elevadas de cálcio
11 no ambiente radicular no crescimento da planta em diferentes estádios de desenvolvimento, na
12 produção de grãos e na absorção de potássio e magnésio.

13 RESULTADOS: Os maiores valores de massa seca de parte aérea na floração e no estágio de
14 enchimento de vagens, de massa seca de raízes na floração e de massa de grãos na maturação
15 foram obtidos com 4,95 mmol L⁻¹ de cálcio na solução nutritiva, para as cultivares BRS
16 Expedito e Carioca. Maior acúmulo de cálcio nas folhas no estágio de enchimento de vagens e
17 nos grãos em maturação é obtido na concentração de 4,95 mmol L⁻¹ de cálcio na solução
18 nutritiva, quando a concentração de cálcio nas folhas é 21 vezes superior ao valor obtido nos
19 grãos de feijão. O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva até a concentração
20 de 4,95 mmol L⁻¹ não altera a absorção e o acúmulo de potássio e de magnésio nas folhas e
21 nos grãos de feijão.

22 CONCLUSÕES: O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva até a
23 concentração de 4,95 mmol L⁻¹ é eficiente para aumentar a produção e o acúmulo de cálcio e
24 não provoca sintomas de toxicidade e de salinidade nas plantas de feijão.

25 **Palavras chave:** *Phaseolus vulgaris*, solução nutritiva, produção de massa seca,
26 componentes da produtividade, acúmulo de minerais, estádios de desenvolvimento.

1

2 Abstract

3 **BACKGROUND:** Calcium is a mineral essential to the plant development and is one of the
4 most abundant mineral in the tissue of the common bean plants. So, was aim of this study to
5 evaluate the response of two common bean cultivars to high calcium concentrations in the
6 root environment on plant growth at different stages of development in grain production and
7 absorption of potassium and magnesium.

8 **RESULTS:** The highest values of shoot dry mass at flowering and pod filling stage, root dry
9 mass at flowering and grain mass at maturity were obtained with 4.95 mmol L⁻¹ of calcium in
10 nutrient solution for BRS Expedito and Carioca cultivars. Highest calcium accumulation in
11 the pod filling stage of leaves and of grains maturing is obtained at a concentration of 4.95
12 mmol L⁻¹ of calcium in the nutrient solution, when the calcium concentration in the leaves is
13 21 times the value obtained in the bean grains. The increase of calcium concentration in the
14 nutrient solution until the concentration of 4.95 mmol L⁻¹ does not change the absorption and
15 accumulation of potassium and magnesium in leaves and in common bean grains.

16 **CONCLUSION:** The increase of calcium concentration in the nutrient solution up to the
17 concentration of 4.95 mmol L⁻¹ results in increase in the production traits and calcium
18 accumulation and did not show symptoms of toxicity and salinity in bean plants.

19 **Key words:** *Phaseolus vulgaris* L, nutrient solution, dry matter production, yield
20 components, mineral accumulation, growth stages.

21 INTRODUÇÃO

22 O cálcio é um mineral essencial para as plantas, uma vez que desempenha diversas
23 funções vitais, como estruturação e integridade das paredes celulares, estabilização de
24 membranas, sinalização celular e interação com fito-hormônios.^{1,2,3} O cálcio, também, atua na

1 germinação do grão de pólen, no crescimento do tubo polínico e na alongação das raízes⁴ e,
2 em leguminosas, tem participação ativa no processo de nodulação.⁵

3 As plantas em seu ambiente natural possuem concentração de cálcio nos tecidos entre
4 0,1 a 5% da matéria seca, variando de acordo com a disponibilidade de cálcio no ambiente e
5 com a demanda das plantas.⁶ De maneira geral, as dicotiledôneas apresentam uma maior
6 concentração de cálcio em seus tecidos do que as monocotiledôneas.⁷ No feijão (*Phaseolus*
7 *vulgaris* L.), o cálcio foi o terceiro mineral mais abundante nos tecidos, sendo superado
8 apenas pelo nitrogênio e pelo potássio.⁸

9 As plantas se diferenciam, ainda, quanto ao crescimento em diferentes
10 disponibilidades de cálcio no ambiente. Conforme White e Broadley⁹, as espécies podem ser
11 classificadas como calcífugas, quando são adaptadas a condição de solos extremamente
12 ácidos e de baixa disponibilidade de cálcio, e calcícolas, quando são adaptadas a condição de
13 solos com maior disponibilidade de cálcio no ambiente. O feijão é classificado como espécie
14 calcícola, portanto se adapta a condições não limitantes de cálcio no ambiente e responde à
15 variação na disponibilidade desse mineral. Na ausência de cálcio, Leal e Prado¹⁰ observaram
16 que as plantas de feijão apresentaram redução no número de folhas, na altura das plantas, na
17 área foliar, na produção de massa seca das folhas, caules e raízes.

18 Os grãos de feijão apresentam alta concentração de minerais e proteína de
19 qualidade,^{11,12,13} por isso o hábito de consumir feijão é saudável. A concentração de cálcio nos
20 grãos de feijão varia com a cultivar. No Brasil, valores entre 0,30 a 2,80 g kg⁻¹ de matéria seca
21 (MS) foram obtidos em 21 linhagens de feijão¹⁴, enquanto que no México, a amplitude
22 observada para 70 linhagens foi de 1,7 a 4,0 g kg⁻¹ de MS.¹⁵

23 A existência de variabilidade genética para a concentração de cálcio em grãos de
24 feijão possibilita a biofortificação através do melhoramento genético. Em gerações precoces,
25 foi constatado incremento de 33,64% na concentração de cálcio em grãos de feijão.¹⁶

1 Entretanto, quando o cálcio foi aplicado no solo não se obteve aumento da concentração de
2 cálcio nas vagens imaturas de feijão vagem.^{17,18} Isso ocorre porque o cálcio é pouco móvel no
3 floema, sendo muito restrita a distribuição deste mineral para outros tecidos.¹⁹ Portanto, a
4 biofortificação através do melhoramento genético apresenta-se como uma estratégia
5 importante para o aumento da concentração de cálcio em vagens e em grãos de feijão.

6 Trabalhos conduzidos em solução nutritiva evidenciaram que as plantas de feijão são
7 responsivas ao aumento da concentração de cálcio e incrementos na produção de massa seca
8 em parte aérea e em raízes e na concentração desse nutriente na parte aérea, nas vagens e nas
9 raízes.^{20,21,22} Entretanto, o aumento da concentração de cálcio no meio radicular pode afetar a
10 absorção de outros nutrientes, especialmente o potássio e o magnésio. Em morangueiro, o
11 manejo da relação iônica K:Ca na solução nutritiva tem sido sugerido para reduzir a
12 proporção de frutos mal formados e também para melhorar a qualidade dos frutos.^{23,24,25}
13 Porém, não foram encontrados registros quanto à resposta de cultivares de feijão a
14 disponibilidade de cálcio no crescimento da planta em diferentes estádios de desenvolvimento
15 e na produção de grãos, bem como os teores mais adequados nos órgãos da planta. A melhor
16 compreensão da resposta destes caracteres a diferentes disponibilidades de cálcio poderá
17 contribuir para indicar critérios de manejo da adubação dessa cultura e também para a seleção
18 de cultivares de feijão com maior habilidade em acumular cálcio nos grãos.

19 O objetivo desse trabalho foi avaliar a resposta de duas cultivares de feijão a
20 concentrações elevadas de cálcio no ambiente radicular no crescimento da planta em
21 diferentes estádios de desenvolvimento, na produção de grãos e na absorção de potássio e
22 magnésio.

23

24 **MATERIAL E MÉTODOS**

25 **Local e dispositivos de cultivo**

1 O experimento foi conduzido durante os meses de setembro a dezembro de 2011 em
2 casa-de-vegetação do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria,
3 Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (latitude 29°42S, longitude 53°49W, a 95 m
4 acima do nível do mar). Para tanto, foi montado um dispositivo fechado de cultivo fora do
5 solo, adaptado de Andriolo.²⁶

6 O dispositivo foi constituído de seis bancadas de concreto, construídas a 0,85 m de
7 altura do nível do solo. Cada bancada de concreto recebeu uma telha de fibrocimento de 3,60
8 m de comprimento e 1,10 m de largura, totalizando uma área de 3,96 m². As telhas foram
9 dispostas com declividade de 1% e cobertas com um filme de polietileno preto de baixa
10 densidade. Os canais das telhas foram preenchidos com uma camada de brita basáltica média,
11 para facilitar a drenagem da solução nutritiva excedente. Os seis reservatórios de solução
12 nutritiva foram instalados na parte mais baixa das bancadas, na área externa da casa-de-
13 vegetação. Cada bancada recebeu um reservatório de fibra de vidro com capacidade para 310
14 L.

15 Vasos de polipropileno com capacidade para 4 L, de cor preta e perfurados na parte
16 inferior, foram distribuídos sobre as bancadas. Cada bancada comportou 48 vasos que foram
17 dispostos sob a camada de brita, espaçados a uma distância de 30 cm na linha e de 5 cm entre
18 as linhas. Os vasos foram preenchidos com areia média (granulometria entre 1,2 a 2,4 mm),
19 previamente lavada com solução de hipoclorito de sódio a 1%.

20

21 **Delineamento experimental e tratamentos**

22 O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com parcelas
23 subdivididas, com seis repetições. As parcelas principais foram constituídas por seis
24 concentrações de cálcio: 2,20; 2,75; 3,30; 3,85; 4,4 e 4,95 mmol L⁻¹. Cada bancada
25 (dispositivo de cultivo) recebeu uma concentração diferente de cálcio. Para tanto, a solução

1 nutritiva de referência de Furlani; Fernandes Júnior²⁷ foi modificada para manter o equilíbrio
2 iônico da solução, apesar das variações na concentração de cálcio (Tabela 1). O cálculo das
3 relações iônicas entre os macronutrientes e das quantidades de micronutrientes foi realizado
4 de acordo com a metodologia descrita por Andriolo.²⁸

5 Nas sub-parcelas foram dispostas as duas cultivares de feijão BRS Expedito e Carioca,
6 ambas originárias do grupo gênico Mesoamericano. A cultivar BRS Expedito apresenta grãos
7 pretos, massa de 100 grãos de 26,3 g, hábito de crescimento indeterminado com guias curtas
8 (tipo II), ciclo intermediário e alta concentração de cálcio nos grãos (2,0 g kg⁻¹ de MS). A
9 cultivar Carioca tem grãos do tipo carioca (fundo bege com estrias marrons), massa de 100
10 grãos de 28,5 g, hábito de crescimento indeterminado com guias longas (tipo III), ciclo
11 intermediário e concentração intermediária de cálcio nos grãos (1,5 g kg⁻¹ de MS).

12 Cada vaso recebeu quatro sementes de uma mesma cultivar. Posteriormente, no
13 estágio de primeira folha trifoliolada (V3) foi realizado o desbaste para uma planta por vaso.
14 A unidade experimental foi constituída por uma planta por vaso. Cada dispositivo de cultivo
15 foi composto por 24 unidades experimentais para cada cultivar, totalizando 48 unidades
16 experimentais.

17

18 **Manejo das soluções nutritivas**

19 As soluções nutritivas foram fornecidas de forma individual para cada tratamento
20 (concentração de cálcio) em quatro turnos diários de rega, com duração de 15 minutos, como
21 sugerido por Andriolo et al.²⁵ Para tanto, cada reservatório de solução nutritiva foi conectado
22 a uma motobomba, a qual foi controlada por um programador horário (timer) para realizar as
23 fertirrigações nos horários estipulados e de forma homogênea.

24 Os tratamentos consistiram de soluções nutritivas contendo diferentes concentrações
25 de cálcio, empregando os fertilizantes solúveis nitrato de potássio, nitrato de cálcio-Calcinit®,

1 nitrato de amônio, sulfato de potássio, monofosfato de potássio e sulfato de magnésio. As
2 concentrações dos demais nutrientes foram ajustadas de forma a manter o equilíbrio
3 eletroquímico das soluções nutritivas.

4 A condutividade elétrica (CE) e o pH das soluções nutritivas contidas nos
5 reservatórios foram quantificados a cada 48 horas. Para condutividade elétrica os valores
6 iniciais das soluções variaram entre 1,0 e 1,5 mS, já para pH esses valores ficaram entre 5,8 e
7 6,2. Sempre que a CE apresentou um desvio superior a 10%, em relação ao valor inicial, foi
8 realizada a sua correção com adição de água ou de alíquotas de nova solução nutritiva,
9 conforme a necessidade. O pH da solução foi mantido na faixa de 5,5 a 6,5 mediante adição
10 de NaOH ou H₂SO₄ na concentração de 1N. A solução nutritiva foi completamente renovada
11 nos reservatórios sempre que o nível atingiu 33,3% da capacidade do reservatório.

12

13 **Determinação dos caracteres de produção**

14 Nos estádios de desenvolvimento de terceira folha trifoliada (V4), floração (R6),
15 enchimento das vagens (R8) e maturação (R9), caracterizados de acordo com a escala
16 fenológica descrita em CIAT,²⁹ foram coletadas seis plantas (unidades experimentais) de cada
17 tratamento para a determinação da massa seca. Para tanto, cada planta foi fracionada em parte
18 aérea (folhas e caules) e raízes. As raízes foram lavadas em água corrente para a remoção da
19 areia. As diferentes frações da planta (parte aérea e raízes) foram acondicionadas,
20 individualmente, em sacos de papel. As amostras foram secas em estufa de secagem e de
21 esterilização (Odontobras 1.5; Odontobras, São Paulo, Brasil), com circulação forçada de ar
22 (65 a 70°C), até massa constante, quando se determinou a massa seca da parte aérea e das
23 raízes em cada um dos quatro estádios de desenvolvimento (V4, R6, R8 e R9).

24 No estádio de R8, também, foi avaliado o número de vagens por planta. Essas vagens
25 foram secas em estufa de secagem e de esterilização e após, massa constante, quantificou-se a

1 massa seca das vagens por planta em R8. Em R9 contou-se, ainda, o número de grãos por
2 planta e determinou-se a massa de grãos por planta a 13% de umidade.

3

4 **Determinação da concentração de minerais**

5 Após a determinação da massa seca das frações da planta nos estádios V4, R6, R8 e
6 R9, as amostras de folhas foram moídas para a determinação da concentração de minerais.
7 Aproximadamente, 5 g de amostra foram moídos em moinho analítico de faca (Q298A21;
8 Quimis, São Paulo, Brasil) até a obtenção de partículas inferiores a 1 mm. Para cada
9 tratamento, foram moídas amostras de três repetições (plantas).

10 Alíquotas de 0,5 g da farinha obtida foram digeridas em 5 ml de solução ácida
11 composta por ácido nítrico (HNO_3) e ácido perclórico (HClO_4), na proporção volumétrica de
12 3:1. O processo de digestão foi realizado a frio por 12 horas. Após, a temperatura do bloco
13 digestor (CPM 25, Marconi, São Paulo, Brasil) foi aumentada gradualmente, a cada 30
14 minutos em 30 °C, até atingir 180 °C. No final da digestão da amostra, restou no tubo uma
15 alíquota totalmente translúcida de aproximadamente 1 ml. Após, foi realizada a diluição da
16 amostra com 50 ml de água destilada, como recomendado por Miyazawa et al.³⁰

17 Para a determinação das concentrações de cálcio e de magnésio foi necessária mais
18 uma diluição, com solução de óxido de lantânio. A solução foi preparada com 30 ml de ácido
19 clorídrico e 12 g de óxido de lantânio dissolvidos em 1 L de água destilada. Assim, 9 ml de
20 solução de óxido de lantânio foi adicionada a 1 ml da diluição inicial. A determinação das
21 concentrações de cálcio, de potássio e de magnésio foi realizada com um espectrofotômetro
22 de absorção atômica (modelo 932 AA; GBC, Braeside, Austrália) utilizando comprimento de
23 onda de 422,70 nm para cálcio, 766,50 nm para potássio e de 202,50 nm para magnésio.

24

25 **Análises estatísticas**

1 Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância considerando o
2 delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas, com seis repetições para os
3 caracteres de produção e três repetições para as determinações de concentração de minerais. O
4 teste F (valor-p <0,05) foi usado para os testes das hipóteses dos efeitos principais e da
5 interação concentração de cálcio x cultivares, considerando todos os efeitos como fixos.
6 Sendo significativo o efeito de concentração de cálcio, foi realizada a análise de regressão
7 pelo método dos polinômios ortogonais, ajustando-se a equação de maior grau significativo.
8 Nos casos em que o segundo grau foi significativo pela análise de regressão foi estimado o
9 ponto de máxima eficiência técnica pela equação ($X = -\hat{b}_1 / 2\hat{b}_2$), sendo \hat{b}_1 e \hat{b}_2 os
10 coeficientes de primeiro e de segundo grau, respectivamente, obtidos através da equação
11 estimada na análise de regressão. As análises estatísticas foram efetuadas com a planilha
12 eletrônica Office Excel e com os softwares Sigma Plot³¹ e Genes.³²

13

14 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

15 **Caracteres de produção**

16 Na análise de variância, a interação concentração de cálcio x cultivares de feijão não
17 foi significativa para nenhum dos caracteres de produção, caracterizando resposta semelhante
18 das cultivares de feijão BRS Exedito e Carioca a variação da concentração de cálcio na
19 solução nutritiva (Tabela 2). No entanto, efeito significativo para a concentração de cálcio
20 (valor-p <0,05) foi observado em relação à massa seca de parte aérea em R6, em R8 e em R9,
21 à massa seca de raízes em R6 e em R9, à massa seca de vagens em R8 e à massa de grãos em
22 R9. Os caracteres massa seca de raízes em R6 e em R9, número de vagens em R8 e massa
23 seca de vagens em R8 apresentaram efeito significativo para cultivares (valor-p <0,05).

24 O coeficiente de variação experimental variou de 11,31% (massa seca de parte aérea
25 em V4) a 23,64% (massa seca de raízes em R6) (Tabela 2). Quando a massa seca de raízes foi

1 avaliada em V4 e em R6, os valores dos coeficientes de variação experimental foram
2 superiores a 20%, indicando uma menor precisão experimental para esses caracteres.
3 Coeficiente de variação experimental de 20,4% foi obtido para a massa seca de raízes em
4 feijão cultivado em solução nutritiva, com omissão de minerais.¹⁰ Os maiores valores de
5 coeficiente de variação experimental para a massa seca de raízes podem estar relacionados à
6 plasticidade do sistema radicular das plantas de feijão e a fragilidade das raízes secundárias
7 que, por apresentarem espessura reduzida, são facilmente rompidas quando são separadas do
8 substrato.

9 O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva provocou a redução da
10 massa seca de parte aérea em R6 até a concentração de 3,68 mmol L⁻¹ (ponto de mínima
11 eficiência técnica) (Figura 1A). Em concentrações maiores (3,85 a 4,95 mmol L⁻¹), se
12 observou um incremento na produção de massa seca de parte aérea em R6, caracterizando
13 uma resposta quadrática. Portanto, as concentrações de cálcio inferiores a 3,68 mmol L⁻¹ não
14 garantiram um suprimento adequado deste mineral para as plantas e, por isso, o crescimento
15 foi reduzido. Silva et al.,²¹ trabalhando com diferentes concentrações de cálcio na solução
16 nutritiva, na presença de alumínio, também, observaram que o crescimento das plantas de
17 feijão, avaliado aos 45 dias de cultivo, foi limitado nas menores concentrações de cálcio (0 a
18 0,46 mmol L⁻¹). Estes autores constataram, ainda, que o cálcio é um mineral fundamental para
19 a obtenção de plantas com maior área foliar, estabelecendo condições para alta atividade
20 fotossintética e, conseqüentemente, maior produção de massa foliar. No presente estudo, o
21 maior valor de massa seca de parte aérea em R6 (19,60 g) foi obtido na concentração de 4,95
22 mmol L⁻¹, quando se observou maior crescimento das plantas de feijão.

23 A massa seca de raízes em R6 e a massa seca de parte aérea em R8 apresentaram
24 acréscimo linear com o aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva (Figura 1B e
25 1C). Isso significa que o aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva resultou no

1 maior desenvolvimento do sistema radicular das plantas de feijão no período de floração (R6)
2 e no maior crescimento da parte aérea no período de enchimento de vagens (R8). Souza
3 Júnior et al.,²² também, verificaram que na maior concentração de cálcio (2,48 mmol L⁻¹), na
4 presença de alumínio na solução nutritiva, a produção de massa seca de raízes foi maior em
5 plantas de feijão com 30 dias de cultivo. Em feijão vagem, a maior produção de massa seca de
6 raízes de plantas colhidas aos 10 – 12 dias após a antese, foi obtida na concentração de 2,79
7 mmol L⁻¹.²⁰

8 O maior crescimento do sistema radicular das plantas de feijão foi diretamente
9 relacionado à concentração de cálcio na solução nutritiva (Figura 1B), concordando com os
10 resultados obtidos por Souza Junior et al.,²² Favaro et al.²⁰ e Silva et al.²¹ o aumento da
11 concentração de cálcio na solução nutritiva é favorável para o desenvolvimento das raízes,
12 pois diminuiu o efeito tóxico do alumínio, reduzindo a atividade do Al³⁺ na superfície externa
13 da membrana plasmática das células das raízes.³³ No presente estudo, não foi possível estimar
14 a concentração de cálcio que proporciona o maior crescimento do sistema radicular das
15 plantas de feijão das cultivares BRS Expedito e Carioca, pois se obteve uma resposta linear
16 (Figura 1B). Entretanto, na concentração de 4,95 mmol L⁻¹ se obteve a maior produção de
17 massa seca de raízes (3,3 g), sem que sintomas de toxicidade ou de salinidade fossem
18 constatados.

19 O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva propiciou o incremento da
20 produção de massa seca de vagens em R8 até a concentração de 3,55 mmol L⁻¹ (ponto de
21 máxima eficiência técnica) (Figura 1D). Nas concentrações maiores (3,85 a 4,95 mmol L⁻¹),
22 se observou um decréscimo na produção da massa seca de vagens em R8. Em feijão vagem,
23 não se obteve resposta na produção de massa seca de vagens, com o aumento da concentração
24 de cálcio em solução nutritiva (até 2,79 mmol L⁻¹).²⁰ As diferenças observadas podem ser
25 atribuídas às diferenças genéticas das cultivares, ao estágio fenológico de desenvolvimento

1 das plantas, a composição química da solução nutritiva e as concentrações de cálcio avaliadas
2 no presente estudo.

3 A massa seca de parte aérea em R9 e a massa seca de raízes em R9 apresentaram
4 efeito significativo para a concentração de cálcio na solução nutritiva, porém na análise de
5 regressão não foram significativos o 1º, o 2º e o 3º graus (Tabela 2). Portanto, na maturação
6 (R9) não se observou resposta linear, quadrática ou cúbica da concentração de cálcio na
7 solução nutritiva na produção da massa seca de parte aérea e de raízes das plantas de feijão
8 (Figura 1E). Provavelmente, em função do início da senescência das plantas e da restrição de
9 espaço físico dentro dos vasos para o crescimento das raízes.

10 A massa de grãos em R9 foi maior à medida que se aumentou a concentração de cálcio
11 na solução nutritiva (Figura 1F). Como a resposta foi linear, não foi possível estimar a
12 concentração de cálcio em que se obtém a maior produção de massa de grãos de feijão. Não
13 foram encontrados trabalhos em solução nutritiva em que as plantas de feijão fossem
14 conduzidas até o final do ciclo. Portanto, esse é o primeiro relato do efeito da concentração de
15 cálcio na solução nutritiva no aumento da massa de grãos em feijão.

16 As plantas de feijão das cultivares BRS Expedito e Carioca foram responsivas a
17 concentração de cálcio. As maiores produções de massa seca de parte aérea em R6 e em R8,
18 de massa seca de raízes em R6 e de massa de grãos em R9 foram obtidas na concentração de
19 $4,95 \text{ mmol L}^{-1}$ (Figuras 1A, 1B, 1C e 1F). Portanto, o maior crescimento de parte aérea e de
20 raízes de plantas de feijão na floração (R6), possibilitou o maior desenvolvimento das plantas
21 no período de enchimento de vagens (R8) e a produção de massa de grãos em R9 foi elevada.
22 Assim, foi possível aumentar a massa de grãos em R9 em 18,05% quando as plantas de feijão
23 foram cultivadas na concentração de $4,95 \text{ mmol L}^{-1}$ (Figura 1F).

24 Com relação às diferenças observadas entre as cultivares de feijão, foi possível
25 constatar que a produção de massa seca de raízes em R6 e em R9 e a massa seca de vagens

1 em R8 foi maior para a cultivar BRS Expedito (Tabela 3). No entanto, a cultivar Carioca
2 apresentou o maior número de vagens por planta em R8. A identificação de cultivares de
3 feijão com resposta diferenciada na habilidade de absorver e de usar o cálcio é de grande
4 importância para o melhoramento de feijão, pois possibilita a seleção de cultivares mais
5 eficientes no uso de cálcio.

6

7 **Concentração de minerais**

8 Na análise de variância constatou-se interação concentração de cálcio x cultivares de
9 feijão significativa em relação à concentração de potássio nas folhas em R8 e a concentração
10 de magnésio nos grãos em R9 (Tabela 4). Portanto, resposta diferenciada das cultivares de
11 feijão foi observada com a variação da concentração de cálcio na solução nutritiva para o
12 acúmulo de potássio nas folhas em R8 e de magnésio nos grãos em R9. Efeito significativo
13 para a concentração de cálcio na solução nutritiva foi constatado para as concentrações de
14 cálcio nas folhas em R8, cálcio nos grãos em R9, potássio nas folhas em R8, potássio nos
15 grãos em R9, magnésio nas folhas em R8 e magnésio nos grãos em R9. Para as concentrações
16 de potássio nas folhas em R8, potássio nos grãos em R9, magnésio nas folhas em R8 e
17 magnésio nos grãos em R9 se observou efeito significativo para cultivares de feijão.

18 Os valores de coeficiente de variação obtidos para a concentração de minerais nas
19 folhas e nos grãos podem ser considerados baixos, pois variaram entre 5,16% (concentração
20 de magnésio nas folhas em R8) a 15,64% (concentração de cálcio nas folhas em V4) (Tabela
21 4). Por isso, as inferências feitas a partir do conjunto de dados obtidos têm alta precisão
22 experimental.

23 A concentração de cálcio nas folhas em R8 aumentou com a concentração de cálcio na
24 solução nutritiva (Figura 2A). Assim, a concentração de cálcio nas folhas em R8 que era de
25 27,98 g kg⁻¹ de matéria seca (MS), na menor concentração de cálcio na solução nutritiva (2,20

1 mmol L⁻¹), pode ser elevada para 35,68 g kg⁻¹ de MS na maior concentração de cálcio (4,95
2 mmol L⁻¹), o que representa um incremento de 27,51% na concentração de cálcio nas folhas
3 de feijão. As folhas de feijão comum e de feijão vagem são grandes acumuladoras de
4 cálcio.^{22,34,20} Entretanto, em experimentos de feijão conduzidos com diferentes concentrações
5 de cálcio em solução nutritiva, normalmente, se avalia a concentração de cálcio na parte aérea
6 (folhas e caules) das plantas, dificultando a comparação com os resultados obtidos no presente
7 estudo.

8 Quando se avaliou o acúmulo de cálcio na parte aérea de plantas de feijão, se observou
9 que o aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva propiciou maior concentração
10 de cálcio na parte aérea das plantas de feijão comum até a concentração de 1,40 mmol L⁻¹, na
11 presença de alumínio,²² e de feijão vagem até a concentração de 2,79 mmol L⁻¹.²⁰ O uso de
12 folhas de feijão na alimentação é comum em alguns países da África.³⁵ Isso porque as folhas
13 verdes de feijão cruas apresentam sete vezes mais ferro do que é encontrado em grãos de
14 feijão³⁶ e, quando refogadas, o teor de fibras das folhas de feijão é duas vezes maior ao valor
15 encontrado nas folhas de couve, também, refogadas.³⁷ No presente estudo, foi possível
16 constatar que a concentração de cálcio nas folhas de feijão foi 21 vezes superior ao valor
17 obtido nos grãos (Figura 2A e 2B). Portanto, as folhas verdes de feijão apresentam alto valor
18 nutricional e seu uso na alimentação humana deve ser considerado.

19 A concentração de cálcio nos grãos em R9 apresentou resposta linear ao aumento da
20 concentração de cálcio na solução nutritiva (Figura 2B). A amplitude de aumento da
21 concentração de cálcio nos grãos em R9 variou de 1,41 g kg⁻¹ de MS (2,20 mmol L⁻¹) a 1,68 g
22 kg⁻¹ de MS (4,40 mmol L⁻¹), sendo inferior à variação observada nas folhas em R8 (Figura
23 2A). O acúmulo de cálcio nos grãos foi reduzido, pois o cálcio é transportado pelo xilema,
24 sendo baixa a sua mobilidade no floema.¹⁹ Por isso, a adição de cálcio no solo não alterou a
25 concentração de cálcio nas vagens imaturas de feijão vagem.^{17,18} Através do melhoramento

1 genético foi possível aumentar a concentração de cálcio nos grãos de feijão em 33,64%.¹⁶
2 Portanto, a biofortificação através do melhoramento genético parece ser uma alternativa tão
3 viável quanto a nutrição com cálcio via fertilização para aumentar o acúmulo de cálcio nos
4 grãos de feijão.

5 Para a concentração de potássio nas folhas em R8 e nos grãos em R9 foi constatado
6 efeito significativo para a concentração de cálcio na solução nutritiva, porém na análise de
7 regressão não foram significativos o 1º, o 2º e o 3º graus (Tabela 4). Por consequência, não se
8 obteve resposta linear, quadrática ou cúbica para o acúmulo de potássio em folhas e nos grãos
9 de feijão, em resposta a concentração de cálcio na solução nutritiva. Como modelos não
10 lineares, normalmente, não apresentam explicação biológica, os valores obtidos para
11 concentração de potássio nas folhas em R8 e nos grãos em R9 foram plotados nas Figuras 2C
12 e 2D. Com relação ao efeito principal cultivares de feijão, foi constatado que a cultivar BRS
13 Expedito acumulou maior concentração de potássio nos grãos em R9.

14 O potássio é um mineral muito móvel em feijão, pois 15 dias após a germinação, 91%
15 do potássio presente nos cotilédones já havia sido translocado para as plantas.³⁸ Em plantas de
16 sorgo cultivadas em solução nutritiva foi possível observar que o aumento da concentração de
17 cálcio em solução nutritiva resultou em incremento da concentração de potássio nas folhas.³⁹
18 No presente estudo, a concentração de potássio nas folhas em R8 e nos grãos em R9 variou
19 muito pouco, em resposta a alteração da concentração de cálcio na solução nutritiva (Figuras
20 2C e 2D). Isso indica que a variação nas concentrações de cálcio e dos demais íons, realizada
21 para a manutenção do equilíbrio iônico das soluções, não resultou em alterações significativas
22 na absorção e no acúmulo de potássio nas folhas e nos grãos de feijão.

23 A concentração de magnésio nas folhas em R8 na média das duas cultivares de feijão
24 (Figura 2E) e nos grãos em R9 para a cultivar Carioca (Figura 2F), a semelhança do
25 observado para potássio, não apresentou resposta linear, quadrática ou cúbica quanto a

1 concentração de cálcio na solução nutritiva. No entanto, o aumento da concentração de cálcio
2 na solução nutritiva provocou um incremento de baixa magnitude no acúmulo de magnésio
3 nos grãos em R9 para a cultivar BRS Expedito (Figura 2F). Portanto, a modificação da
4 solução nutritiva de Furlani; Fernandes Júnior,²⁶ realizada para manter o equilíbrio iônico das
5 soluções, não provocou alteração representativa na absorção e no acúmulo de magnésio nas
6 folhas e nos grãos de feijão.

7 Dentre as cultivares avaliadas, a BRS Expedito foi a maior acumuladora de magnésio
8 nas folhas em R8. O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva provoca
9 alteração na concentração de magnésio nas folhas de feijão, porém a quantidade de magnésio
10 acumulada nas folhas de feijão é muito inferior à quantidade de cálcio acumulada.²²

11 Considerando que o aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva até 4,95
12 mmol L⁻¹ resultou em aumento expressivo na concentração de cálcio nas folhas de feijão em
13 R8 (Figura 2A), será preciso determinar o conteúdo de oxalato de cálcio destas folhas para
14 avaliar seu valor nutritivo. Isso porque o oxalato de cálcio não é prontamente absorvido no
15 alimento e por isso pode diminuir a disponibilidade de cálcio.⁴⁰ Adicionalmente, foi possível
16 observar que o cálcio foi muito pouco translocado para os grãos em R9 (Figura 2B). Portanto,
17 a adição de cálcio no ambiente radicular foi pouco eficiente para aumentar a concentração de
18 cálcio nos grãos das cultivares BRS Expedito e Carioca. Como o feijão é muito consumido na
19 forma de grãos, a melhor qualidade nutricional dos grãos deverá ser obtida por melhoramento
20 genético, pois esta estratégia possibilitou um incremento de 33,64% na concentração de cálcio
21 nos grãos.¹⁶

22 As recomendações atuais de adubação quanto ao cálcio para a cultura do feijão visam,
23 principalmente, a correção do pH e a neutralização do alumínio presente no solo . Do ponto
24 de vista agrônomo, os resultados obtidos indicaram que o aumento na disponibilidade de
25 cálcio no ambiente radicular contribui para a correção da acidez do solo e para a nutrição da

1 planta. As concentrações mais elevadas de cálcio não prejudicam a absorção de potássio e de
2 magnésio e poderiam aumentar a produção de grãos, com efeitos indiretos, também, na
3 concentração de cálcio nos grãos.

4

5 **CONCLUSÕES**

6 As cultivares de feijão BRS Expedito e Carioca apresentam os maiores valores de
7 massa seca de parte aérea na floração e no estágio de enchimento de vagens, de massa seca de
8 raízes na floração e de massa de grãos na maturação com 4,95 mmol L⁻¹ de cálcio.

9 As variáveis massa seca de parte aérea em R6 e massa seca de vagens em R8
10 apresentaram segundo grau significativo pela análise de regressão com pontos de mínima e de
11 máxima eficiência técnica de 3,68 e 3,55 mmol L⁻¹, respectivamente.

12 Maior acúmulo de cálcio nas folhas no estágio de enchimento de vagens e nos grãos
13 em maturação é obtido na concentração de 4,95 mmol L⁻¹ de cálcio.

14 A concentração de cálcio nas folhas de feijão no estágio de enchimento de vagens é 21
15 vezes superior ao valor obtido nos grãos maduros de feijão na concentração de 4,95 mmol L⁻¹
16 de cálcio.

17 O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva até a concentração de 4,95
18 mmol L⁻¹ não altera a absorção e o acúmulo de potássio e de magnésio nas folhas e nos grãos
19 de feijão.

20

21 **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

22 1 Sanders D, Pelloux J, Brownlee C and Harper JF, Calcium at the Crossroads of Signaling.
23 *The Plant Cell* **14**:S401-S417, (2002).

24 2 Dodd AN, Kudla J and Sanders D, The language of calcium signaling. *Annu. Rev. Plant*
25 *Biol* **61**:593-620, (2010).

- 1 3 Gilliam M, Dayod M, Hocking BJ, Conn SJ, Kaiser BN, Leigh RA and Tyerman S,
2 Calcium delivery and storage in plant leaves: exploring the link with water flow, *J. Exp.*
3 *Bot.* **62**:2233-2250, (2011).
- 4 4 Barker AV and Pilbeam DJ, *Handbook of plant nutrition*, Crs Press. Boca Raton, (2007).
- 5 5 Oldroyd GED and Downie, JA, Coordinating nodule morphogenesis with rhizobial
6 infection in legumes. *Annu. Rev. Plant Biol* **59**:19-46, (2008).
- 7 6 Marschner, H, *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, London, (1995).
- 8 7 Conn S and Gilliam M, Comparative physiology of elemental distributions in plants. *Ann*
9 *Bot* **105**:1081-1102, (2010).
- 10 8 Bulisani EA, *Feijão: fatores de produção e qualidade*, Fundação Cargill, Campinas, (1987).
- 11 9 White PJ and Broadley MR, Calcium in Plants. *Ann Bot* **92**:487-511, (2003).
- 12 10 Leal RM and Prado RM, Desordens nutricionais no feijoeiro por deficiência de
13 macronutrientes, boro e zinco. *Rev. Bras. Ciênc. Agrár* **3**:301-306, (2008).
- 14 11 Jost E, Ribeiro ND, Cargnelutti AF and Antunes IF, Composição de macrominerais em
15 cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético. *Pesq. Agrop. Gaúcha*
16 **16**:31-38, (2010).
- 17 12 Ribeiro ND, Londero PMG, Cargnelutti AF, Jost E, Poersch NL and Mallmann CA,
18 Composição de aminoácidos de cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento
19 genético. *Pesq. Agrop. Bras* **42**:1393-1399, (2007).
- 20 13 Ribeiro ND, Jost E, Cerutti T, Mazieiro, SM and Poersch NL, Composição de
21 microminerais em cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético.
22 *Bragantia* **67**:267-273, (2008).
- 23 14 Mesquita, F.R. Correa AD, Abreu CMP, Lima RAZ and Abreu AFB, Linhagens de feijão
24 (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade protéica. *Ciênc. Agrotec.*
25 **31**:114-1121, (2007).
- 26 15 Guzmán-Maldonado SH, Acosta-Gallegos J and Paredes-López O, Protein and mineral
27 content of a novel collection of wild and weedy common bean (*Phaseolus vulgaris* L).
28 *J. Sci. Food Agric* **80**:1874-1881, (2000).
- 29 16 Jost E, Ribeiro ND, Mazieiro, SM, Cerutti T and Rosa DP, Efeitos gênicos do teor de
30 cálcio em grãos de feijão. *Ciênc Rural* **39**:31-37, (2009).
- 31 17 Miglioranza E, Barack, P, Kmiecik K and Nienhuis J, Comparison of soil and genotypic
32 effects of calcium concentration of snap beans pods. *Hortscience* **32**:68-70, (1997).

- 1 18 Quintana JM, Harison HC, Palta JP, Nienhuis J and Kmiecik K, Calcium fertilizers fail to
2 affect pod calcium concentration and yield of four snap bean cultivars. *HortScience*
3 **34**:646-647, (1999).
- 4 19 Frossard E, Bucher M, Machler F, Mozafar A and Hurrell R, Potential for increasing the
5 content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. *J. Sci. Food*
6 *Agric.* **80**:861-879, (2000).
- 7 20 Favaro SP, Braga Neto JA, Takahashi HW, Miglioranza E and Ida EI, Rates of calcium,
8 yield and quality of snap bean. *Sci. Agri* **64**:616-620, (2007).
- 9 21 Silva AS, Moraes WB and Souza GS, Doses de cálcio no crescimento do feijoeiro
10 cultivado em solução nutritiva, na presença de alumínio. *Idesia* **29**:53-58, (2011).
- 11 22 Souza Junior JO, Nascimento CWA and Martinez HEP, Resposta do feijoeiro cultivado
12 em solução nutritiva a níveis de cálcio e magnésio na presença de alumínio. *Pesq.*
13 *Agrop. Bras* **33**:1143-1148, (1998).
- 14 23 Lieten P, Effect of K:Ca:Mg ratio on performance of 'Elsanta' strawberries grown on peat.
15 *Acta Hort.* **708**:397-400, (2006).
- 16 24 Sharma RR, Singh R. Fruit nutrient content and lipoxygenase activity in relation to the
17 production of malformed and button berries in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.).
18 *Scie. Hort*, **119**:28-31, (2008).
- 19 25 Andriolo JL, Janisch DI, Shimitt OJ, Dal Pício M, Cardoso FL and Erpen L, Doses de
20 potássio e cálcio no crescimento da planta, na produção e na qualidade de frutas do
21 morangueiro em cultivo sem solo. *Ciênc Rural* **40**:267-272, (2010).
- 22 26 Andriolo JL, Preparo e manejo da solução nutritiva na produção de mudas e de frutas do
23 morangueiro, in: *Anais do Seminário Sobre o Cultivo Hidropônico de Morangueiro*, Ed.
24 UFSM, Santa Maria, pp.41-50, (2007).
- 25 27 Furlani, PR, Fernandez Júnior F, Cultivo hidropônico de morango em ambiente protegido.
26 in: *Anais do Simpósio Nacional do Morango & Encontro De Pequenas Frutas e Frutas*
27 *Nativas do Mercosul*, ed by Corrêa Antunez LE, Embrapa, Pelotas, pp.102-115, (2004).
- 28 28 Andriolo JL *Fisiologia das culturas protegidas*. Ed. UFSM, Santa Maria, (1999).
- 29 29 CIAT, *Standard system of evaluation of bean germoplasma*. CIAT, Cali (1987).
- 30 30 Miyazawa M, Pavan MA and Bloch MF Análises químicas de tecido vegetal. in: *Manual*
31 *de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*, Ed by Silva FC, Embrapa Solos,
32 Brasília, pp. 171-223, (1999).
- 33 31 Sigmaplot, *Sigmaplot For windows version 11.0*. Systat Software, (2008).
- 34 32 Cruz CD, *Programa Genes: biometria*. Imprensa Universitária UFV, Viçosa (2006).

- 1 33 Silva IR, Ferrufino A, Sanzonowicz C, Smyth TJ, Israel DW and Carter Júnior TE,
2 Interactions between magnesium, calcium and aluminum on soybean root elongation.
3 *Rev. Bras. Ciênc. Solo* **29**:747-754, (2005).
- 4 34 Pomper KW and Grusak MA, Calcium uptake and whole-plant water use influence pod
5 calcium concentration in snap bean plants. *J. Amer Soc. Hort. Sci.* **129**:890-895, (2004).
- 6 35 Lamb EM, Hardman LL, Clarke SA and Nyabyenda P, Survey of bean genotypes grown in
7 Rwanda. *Annu. Rep. Bean Improv. Coop.* **28**:17-18, (1985).
- 8 36 Tryphone GN and Nchimbi-Msolla S. Diversity of common bean (*Phaseolus vulgaris L.*)
9 genotypes in iron and zinc contents under greenhouse conditions. *AJAR* **5**:738-747,
10 (2010).
- 11 37 Fonseca SV, Vieira C, Minim VPR and Cardoso AA, Folhas verdes de feijão na
12 alimentação humana: avaliação sensorial, adubação nitrogenada e desfolhamento.
13 *Bragantia* **61**:161-167, (2002).
- 14 38 Boaro CSF, Moraes JAPV, Rodrigues JD, Ono EO, Pedras JF and Curi PR, Magnésio,
15 cálcio e potássio em sementes e cotilédones de feijoeiros e sua transferência para plantas
16 jovens. *Pesq. Agrop. Bras*, **33**:263-268, (1998).
- 17 39 Lacerda CF, Cambraia J, Oliva MA and Ruiz HA, Influência do cálcio sobre o crescimento
18 e solutos em plântulas de sorgo estressadas com cloreto de sódio. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*
19 **28**:289-295, (2004).
- 20 40 White PJ and Broadley MR, Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends*
21 *Plant Sci* **10**:586-593, (2005).
- 22

- 1 **Tabela 1** - Composição das soluções nutritivas com diferentes concentrações de cálcio
- 2 empregadas como tratamentos nas parcelas principais.

Tratamentos	Concentrações (mmol L ⁻¹)					
	N total	K ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻
T1 (2,20 mmol L ⁻¹ de Ca)	8,03	4,00	1,00	2,20	1,00	1,25
T2 (2,75 mmol L ⁻¹ de Ca)	8,61	3,20	1,00	2,75	1,00	1,25
T3 (3,30 mmol L ⁻¹ de Ca)	9,54	3,25	1,00	3,30	1,50	2,00
T4 (3,85 mmol L ⁻¹ de Ca)	9,67	2,00	1,00	3,85	1,50	2,00
T5 (4,40 mmol L ⁻¹ de Ca)	11,06	2,00	1,00	4,40	2,00	2,50
T6 (4,95 mmol L ⁻¹ de Ca)	12,44	2,00	1,00	4,95	2,00	2,50

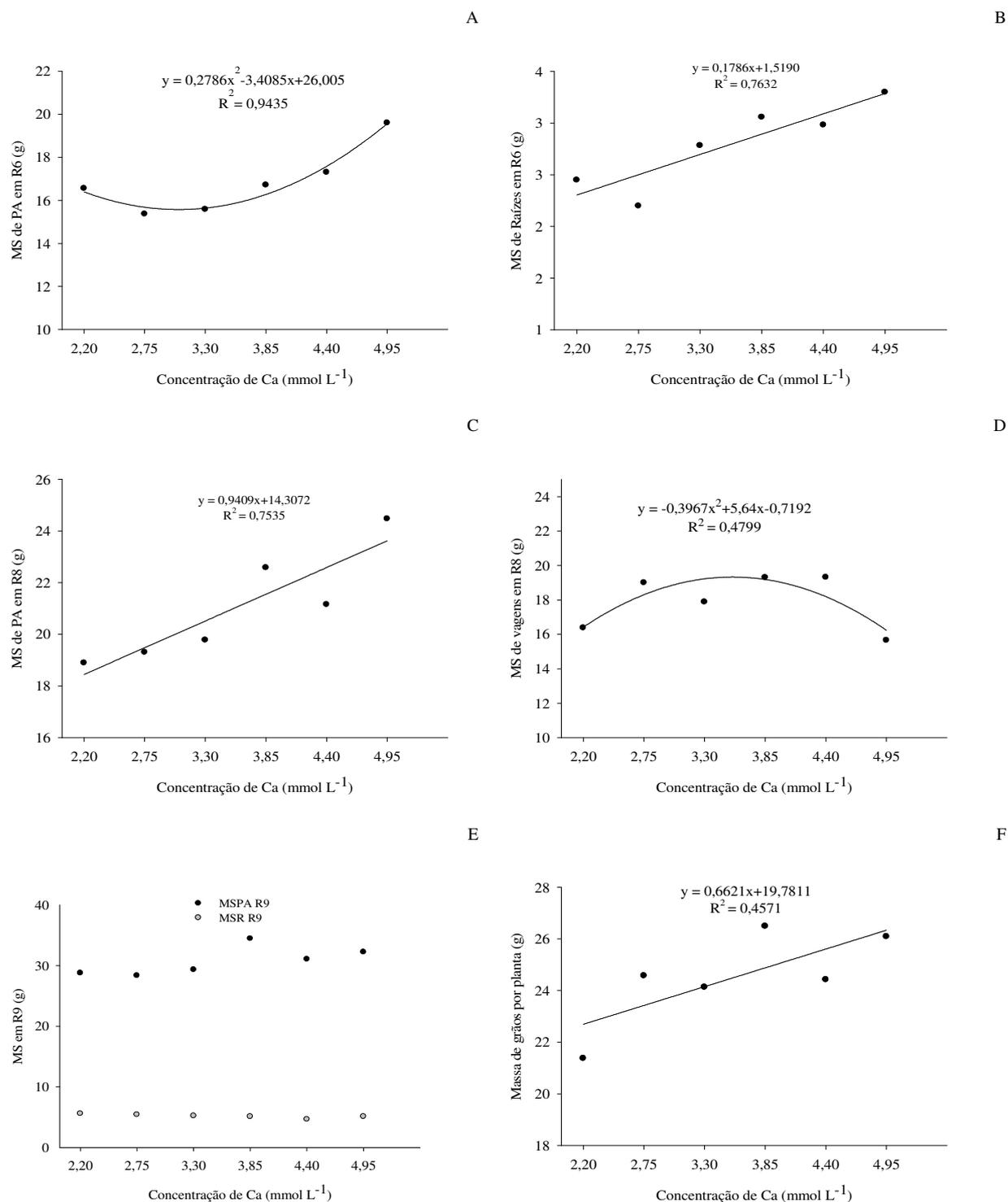
- 3 *
- 4 Em todos os tratamentos foram adicionados 0,1 ml L⁻¹ de solução de micronutrientes e 1 mg L⁻¹ de ferro na forma
- 5 quelatizada.

1 **Tabela 2** - Resumo da análise de variância e de regressão para as variáveis nos diferentes
 2 estádios fenológicos: massa seca de parte aérea na terceira folha trifoliada (MSPA V4, g),
 3 massa seca de raízes na terceira folha trifoliada (MSR V4, g), massa seca de parte aérea na
 4 floração (MSPA R6, g), massa seca de raízes na floração (MSR R6, g), massa seca de parte
 5 aérea no enchimento das vagens (MSPA R8, g), massa seca de raízes no enchimento das
 6 vagens (MSR R8, g), número de vagens por planta no enchimento das vagens (NV R8), massa
 7 seca de vagens no enchimento das vagens (MSV R8, g), massa seca de parte aérea na
 8 maturação (MSPA R9, g), massa seca de raízes na maturação (MSR R9, g), número de grãos
 9 na maturação (NG R9) e massa de grãos por planta na maturação (MG R9, g), avaliada em
 10 duas cultivares de feijão submetidas a seis concentrações de cálcio na solução nutritiva.

		Quadrado Médio					
Fonte de Variação	G.L.	MSPA V4	MSR V4	MSPA R6	MSR R6	MSPA R8	MSR R8
Concentração (A)	5	0,38 ^{n.s.}	0,03 ^{n.s.}	27,92 [*]	1,99 [*]	56,04 [*]	0,54 ^{n.s.}
Erro A ¹	30	0,63	0,02	5,36	0,59	10,93	0,49
Cultivar (B)	1	0,45 ^{n.s.}	0,02 ^{n.s.}	8,00 ^{n.s.}	21,23 [*]	0,11 ^{n.s.}	0,10 ^{n.s.}
A X B	5	0,39 ^{n.s.}	0,005 ^{n.s.}	6,16 ^{n.s.}	0,47 ^{n.s.}	5,13 ^{n.s.}	0,21 ^{n.s.}
Erro B ²	30	0,21	0,009	4,77	0,43	8,67	0,54
Grau 1	1	0,85 ^{n.s.}	0,006 ^{n.s.}	41,99 [*]	4,05 [*]	112,47 [*]	0,69 ^{n.s.}
Grau 2	1	0,94 ^{n.s.}	0,002 ^{n.s.}	25,45 [*]	0,77 ^{n.s.}	23,73 ^{n.s.}	0,59 ^{n.s.}
Grau 3	1	0,10 ^{n.s.}	0,001 ^{n.s.}	2,40 ^{n.s.}	0,18 ^{n.s.}	3,84 ^{n.s.}	0,08 ^{n.s.}
Desvios	1	0,83	0,14	69,80	4,99	140,11	1,35
Média		1,30	0,14	16,85	2,79	21,03	4,33
C.V. (%)		19,31 ³ -11,31 ⁴	22,05 ³ -21,50 ⁴	17,18 ³ -12,96 ⁴	13,74 ³ -23,64 ⁴	15,72 ³ -14,00 ⁴	16,20 ³ -17,06 ⁴
Fonte de Variação	G.L.	NV R8	MSV R8	MSPA R9	MSR R9	NG R9	MG R9
Concentração (A)	5	19,55 ^{n.s.}	30,09 [*]	66,41 [*]	1,28 [*]	287,42 ^{n.s.}	39,38 [*]
Erro A ¹	30	9,92	9,94	22,21	0,53	138,62	8,46
Cultivar (B)	1	84,5 [*]	93,16 [*]	34,03 ^{n.s.}	34,72 [*]	320,88 ^{n.s.}	6,90 ^{n.s.}
A X B	5	2,26 ^{n.s.}	7,12 ^{n.s.}	77,09 ^{n.s.}	3,10 ^{n.s.}	306,02 ^{n.s.}	11,06 ^{n.s.}
Erro B ²	30	8,70	8,12	25,67	0,71	230,16	10,61
Grau 1	1	28,00 [*]	39,08 [*]	80,21 ^{n.s.}	2,14 ^{n.s.}	366,42 ^{n.s.}	55,70 [*]
Grau 2	1	34,83 [*]	51,62 [*]	66,42 ^{n.s.}	1,05 ^{n.s.}	128,51 ^{n.s.}	14,33 ^{n.s.}
Grau 3	1	6,03 ^{n.s.}	4,54 ^{n.s.}	22,97 ^{n.s.}	0,83 ^{n.s.}	223,68 ^{n.s.}	7,70 ^{n.s.}
Desvios	1	28,89	55,24	106,04	2,40	718,56	98,46
Média		19,13	17,92	30,69	5,18	28,27	24,51
C.V. (%) ³		16,46 ³ -15,41 ⁴	17,59 ³ -15,90 ⁴	15,35 ³ -16,51 ⁴	14,05 ³ -16,29 ⁴	13,01 ³ -16,77 ⁴	11,87 ³ -13,29 ⁴

11 *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. ns = não significativo. ¹ Erro A: erro da parcela principal. ² Erro B = erro
 12 da subparcela. ³ Coeficiente de variação da parcela principal. ⁴ Coeficiente de variação da subparcela.

13
 14



1 **Figura 1-** Massa seca de parte aérea na floração (MS de PA em R6, A), massa seca de raízes
 2 na floração (MS raízes em R6, B), massa seca de parte aérea no enchimento de vagens (MS de
 3 PA em R8, C), massa seca de vagens no enchimento de vagens (MS de vagens em R8, D),
 4 massa seca na maturação (MS em R9, E) e massa de grãos por planta (F) de cultivares de
 5 feijão em função de diferentes concentrações de cálcio disponibilizados em solução nutritiva.

1 **Tabela 3** - Valores médios para a massa seca de raízes na floração (MSR R6, g), número de
2 vagens por planta no enchimento de vagens (NV R8), massa seca de vagens no enchimento de
3 vagens (MSV R8, g) e massa seca de raízes na maturação (MSR R9, g) avaliados em duas
4 cultivares de feijão submetidas a seis concentrações de cálcio em solução nutritiva.

Cultivar	Variável			
	MSR R6	NV R8	MSV R8	MSR R9
BRS Expedito	3,51 *	17,44 *	18,34 *	6,24 *
Carioca	2,11	21,19	15,82	4,19
Média	2,81	19,35	17,08	5,21
C.V. (%)	23,64	15,41	15,90	16,29

5 *Significativo a 5% pelo teste F. Ns = não significativo.

6 C.V.(%): coeficiente de variação experimental.

7
8
9
10
11
12
13
14
15
16

1 **Tabela 4** - Resumo da análise de variância e de regressão para a concentração de minerais em
 2 diferentes estádios fenológicos de desenvolvimento: cálcio nas folhas na terceira folha
 3 trifoliada (Ca F V4, g kg⁻¹ de matéria seca - MS), cálcio nas folhas na floração (Ca F R6, g kg⁻¹
 4 de MS), cálcio nas folhas no enchimento das vagens (Ca F R8, g kg⁻¹ de MS), cálcio nos
 5 grãos em R9 (Ca G R9, g kg⁻¹ de MS), potássio nas folhas no enchimento das vagens (K F R8,
 6 g kg⁻¹ de MS), potássio nos grãos na maturação (K G R9, g kg⁻¹ de MS), magnésio nas folhas
 7 no enchimento das vagens (Mg F R8, g kg⁻¹ de MS), magnésio nos grãos na maturação (Mg
 8 G R9 g kg⁻¹ de MS) avaliados em duas cultivares de feijão submetidas a seis concentrações
 9 de cálcio na solução nutritiva.

Fonte de Variação	G.L	Quadrado Médio							
		Ca F V4	Ca F R6	Ca F R8	Ca G R9	K F R8	K G R9	Mg F R8	Mg G R9
Concentração (A)	5	10,54 ^{n.s.}	18,67 ^{n.s.}	96,71*	0,56*	959,95*	21,91*	3,86*	1,14*
Erro A ¹	12	5,40*	7,18	3,92	0,07	13,72	2,13	0,27	0,41
Cultivar (B)	1	17,05 ^{n.s.}	3,82 ^{n.s.}	16,88 ^{n.s.}	0,21 ^{n.s.}	1887,7*	136,11*	14,68*	2,68*
A X B	5	1,57 ^{n.s.}	12,41 ^{n.s.}	9,25 ^{n.s.}	0,02 ^{n.s.}	150,09*	5,41 ^{n.s.}	0,62 ^{n.s.}	0,47*
Erro B ²	12	6,01	4,13	4,12	0,01	8,52	8,79	0,23	0,48
Grau 1	1	18,69*	14,32*	175,07*	0,15*	410,5 ⁴ -81,6 ⁵ ^{n.s.}	75,30 ^{n.s.}	5,65 ^{n.s.}	0,57- 0,58 ^{*3}
Grau 2	1	9,77*	54,45 ^{n.s.}	63,52 ^{n.s.}	0,54 ^{n.s.}	245,9 ⁴ -590,7 ⁵ ^{n.s.}	23,40 ^{n.s.}	2,93 ^{n.s.}	0,64- 0,50 ^{n.s.}
Grau 3	1	8,92 ^{n.s.}	5,29 ^{n.s.}	86,62 ^{n.s.}	0,01 ^{n.s.}	222,8 ⁴ -161,3 ⁵ ^{n.s.}	0,38 ^{n.s.}	2,47 ^{n.s.}	0,42- 0,72 ^{n.s.}
Desvios	1	15,32	1,34	158,41	0,09	151,7 ⁴ -221,7 ⁵	10,47	8,28	1,22- 1,46
Média		15,66	19,58	32,39	1,51	50,83	31,44	9,42	2,10
C.V. (%) ⁶		14,84 ⁶ -15,64 ⁷	13,68 ⁶ -10,38 ⁷	6,11 ⁶ -6,27 ⁷	5,76 ⁶ -6,81 ⁷	7,28 ⁶ -5,74 ⁷	4,64 ⁶ -9,43 ⁷	5,55 ⁶ -5,16 ⁷	9,62 ⁶ -10,42 ⁷

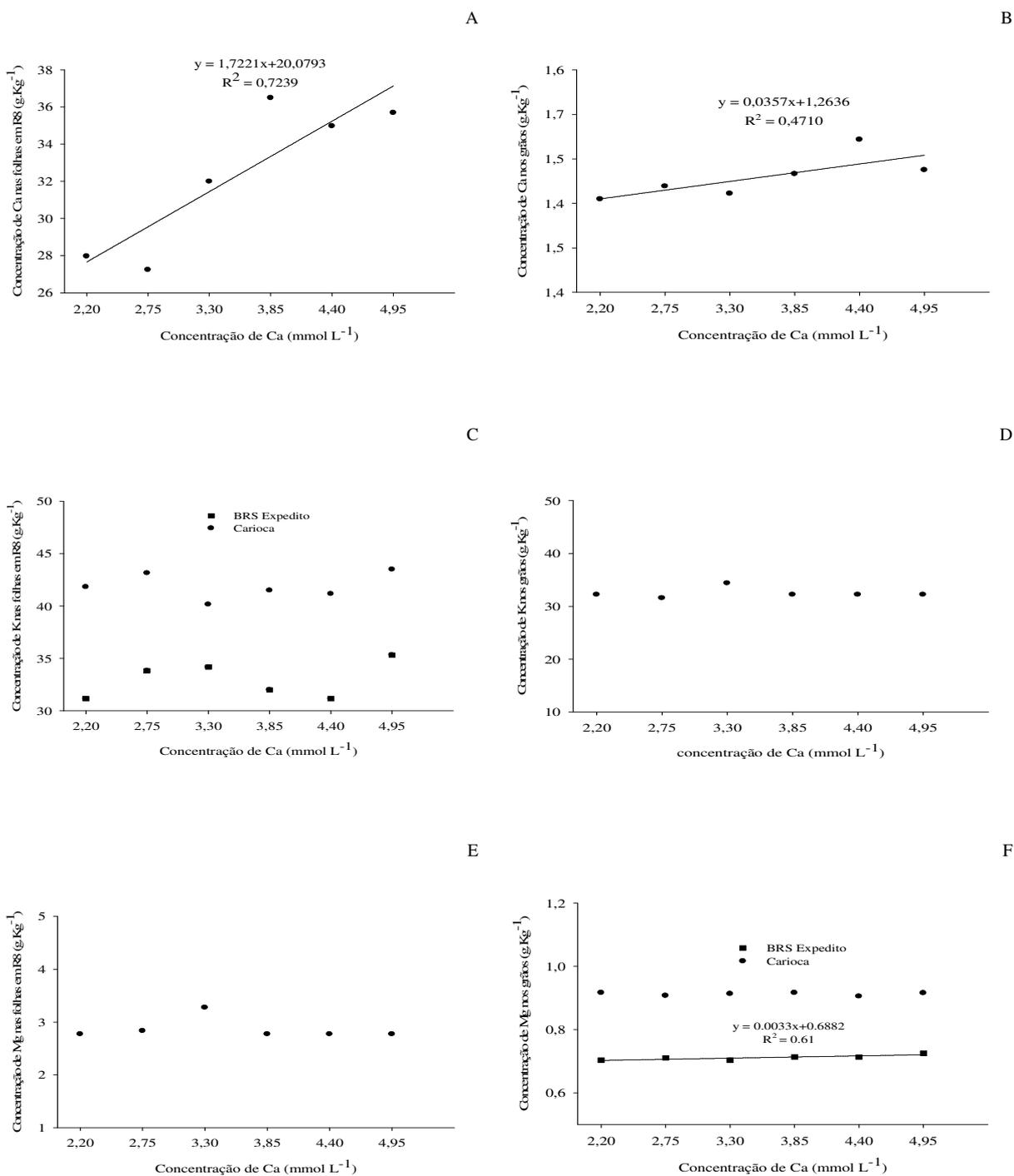
10 *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. Ns = não significativo.

11 ¹ Erro A: erro da parcela principal. ² Erro B = erro da subparcela..

12 ³ Significativo somente para a cultivar BRS Expedito. ⁴ Valor para a cultivar BRS Expedito. ⁵ Valor para a cultivar Carioca.

13 ⁶ Coeficiente de variação da parcela principal. ⁷ Coeficiente de variação da subparcela.

14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31



1 **Figura 2-** Concentração de cálcio (Ca) nas folhas no enchimento de vagens (R8) (A) e grãos
 2 (B), concentração de potássio (K) nas folhas no enchimento de vagens (R8) (C) e nos grãos
 3 (D), concentração de magnésio (Mg) nas folhas no enchimento de vagens (R8) (E) e nos
 4 grãos (F), em g kg⁻¹ de matéria seca, de cultivares de feijão em função de diferentes
 5 concentrações de cálcio disponibilizadas em solução nutritiva.

Variabilidade genética de linhagens de feijão para eficiência e resposta ao cálcio

Lucas da Silva Domingues· Nerinéia Dalfollo Ribeiro· Micheli Thaise Della Flora Possobom·

Allan Emanuel Mezzomo Zemolin

Resumo A avaliação da eficiência de uso de cálcio é inédita em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e é relevante para a sustentabilidade da produção de feijão na agricultura familiar. Portanto, foram objetivos deste trabalho avaliar a variabilidade genética de linhagens de feijão quanto aos caracteres de produção e ao acúmulo de cálcio nos tecidos da planta em solução nutritiva com baixa e alta concentração de cálcio e identificar linhagens eficientes no uso de cálcio e responsivas a aplicação deste mineral por diferentes índices. Para tanto, 12 linhagens de feijão diferentes quanto à concentração de cálcio nos grãos foram avaliadas em baixa (1,10 mmol L⁻¹) e em alta (3,85 mmol L⁻¹) concentração de cálcio na solução nutritiva. Interação concentração de cálcio x linhagens significativa foi observada para os caracteres da produção, concentração de cálcio nos tecidos e para os índices de eficiência no uso de cálcio. A linhagem L 15 produziu a maior massa seca de parte aérea, os maiores números de vagens por planta, de grãos por planta e de grãos por vagem e a maior massa de grãos por planta em baixa concentração de cálcio na solução nutritiva. As linhagens de feijão acumularam, em média, mais cálcio nas folhas, seguidas pelos caules, vagens e grãos. As linhagens L 15, L 234, L 246 e L 77 respondem ao aumento do suprimento de cálcio na solução, pois acumulam mais cálcio nos grãos em cultivo com alta concentração de cálcio. As linhagens L 246 e L 15 são eficientes no uso de cálcio na planta, na aquisição de cálcio e na produção de grãos, e não são responsivas à aplicação de cálcio. A linhagem L 77 é eficiente no uso de cálcio na planta e na produção de grãos e é responsiva à aplicação de cálcio na solução nutritiva.

Palavras chave: *Phaseolus vulgaris* L., disponibilidade de cálcio, eficiência no uso de cálcio, índice de resposta à aplicação de cálcio, seleção.

Abstract The evaluation of the calcium use efficiency is unprecedented in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and is relevant to the sustainability of bean production on family farms. Therefore, the objectives of this study were to evaluate the genetic variability of common bean lines regarding the production traits and the calcium accumulation in the plant tissues in nutrient solution with low and high calcium concentration and identify calcium use efficient lines and responsive to the application of this mineral by different indexes. For this purpose, 12 common bean lines different whit calcium concentration in the grains were evaluated at low (1.10

mmol L⁻¹) and high (3.85 mmol L⁻¹) calcium concentrations in the nutrient solution. Interaction between calcium concentration x lines significant was observed for the production traits, calcium concentration in tissues and for the calcium use efficient indexes. The L 15 line produced the highest shoot dry matter, the highest number of pods per plant, seeds per plant and seeds per pod and higher grain mass per plant in low calcium concentration in the nutrient solution. The common bean lines accumulated, on average, more calcium in the leaves, followed by stems, pods and grains. The L 15, L 234, L 246 and L 77 lines responded to increasing supply of calcium in the solution, because they accumulated more calcium in grain in the cultivation with high calcium concentration. The L 246 and L 15 lines were calcium use efficient in the plant, in the acquisition of calcium and in the grain production, and are not responsive to calcium application. The L 77 line were calcium use efficient in the plant and in the grain production and were responsive to the application of calcium in the nutrient solution.

Key words: *Phaseolus vulgaris* L., calcium availability, calcium use efficiency, index response to calcium application, selection.

Introdução

A presença de alumínio tóxico e a falta de cálcio no solo limitam o desenvolvimento radicular das plantas cultivadas (Ritchey et al., 1980). Embora a deficiência de cálcio nos solos agricultáveis seja rara, a concentração de cálcio disponível para as plantas é muito influenciada pela acidez do solo (McLaughlin and Wimmer, 1999).

O cultivo de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no Brasil é realizado, predominantemente, em áreas marginais e em agricultura de subsistência (Hungria et al., 2000). Nestas condições, normalmente não se realiza a correção da fertilidade do solo de forma adequada, o que limita a disponibilidade do cálcio e de outros minerais para as plantas. Além disso, a ampliação da área de cultivo, pela utilização de áreas degradadas em função de sua baixa fertilidade e elevada acidez dos solos, contribui para a restrição do cálcio aos cultivos agrícolas.

Nesse cenário, o melhoramento genético apresenta-se como uma alternativa para o desenvolvimento de uma agricultura com menor consumo energético e ecologicamente sustentável (Tomaz et al., 2003). Isso passa pela seleção e desenvolvimento de cultivares mais eficientes no uso de nutrientes. A eficiência no uso de nutrientes pode ser definida como a relação entre a quantidade de massa seca produzida por unidade de nutriente absorvido pela planta (Graham, 1984; Good et al., 2004). As cultivares com maior eficiência no uso de nutrientes apresentam maior produtividade em condições de restrição do nutriente no ambiente.

Dentre os minerais, a seleção para eficiência no uso de cálcio é extremamente importante para o melhoramento genético do feijão. Isso porque mais de 30 desordens fisiológicas da planta foram associadas à

deficiência de cálcio (Maynard, 1979). Existem várias maneiras para se determinar a eficiência no uso de nutrientes. É possível quantificar a biomassa ou o produto final produzido pelas plantas em função da quantidade de nutriente disponibilizado (Fageria, 1998) ou relacionar a eficiência no uso de nutrientes aos processos fisiológicos de absorção e de utilização de nutrientes (Bailian et al., 1991). Baligar et al. (2001) e Rose and Wissuwa (2012) apresentaram os principais índices empregados para a obtenção de estimativas da eficiência de uso de nutrientes em culturas agrícolas.

O índice proposto por Siddiqui and Glass (1981) é um dos mais utilizados para avaliar a eficiência no uso de nutrientes. Como relaciona a eficiência no uso de nutrientes ao crescimento das plantas, evita a seleção de linhagens eficientes e de baixa produção de biomassa (Castro, 2009). Este índice tem sido empregado para identificar linhagens eficientes e ineficientes no uso de nutrientes nas culturas do feijão (Vale et al., 1998), arroz (Mendonça et al., 2003), soja (Furlani et al., 2002) e milho (Gondin et al., 2010), em experimentos conduzidos em solução nutritiva. Nestes casos, a avaliação da eficiência no uso de nutrientes foi avaliada pela produção de biomassa de parte aérea em experimentos de curta duração (30 a 50 dias).

A resposta à aplicação de nutrientes, por sua vez, é estimada pela relação entre as diferenças de produção de biomassa e a disponibilidade do nutriente, e foi inicialmente conceituada para fósforo por Fox (1978) e aprimorado por Furtini (2008) para a produção de grãos. A resposta à aplicação de nutrientes visa à observação do comportamento das linhagens em ambientes contrastantes quanto à disponibilidade do nutriente.

Espécies de plantas agrícolas, bem como linhagens dentro da mesma espécie, podem diferir quanto à eficiência nutricional (Vance et al., 2003). De acordo com Baligar et al. (2001), fatores genéticos e fisiológicos estão diretamente relacionados com a maior capacidade das plantas em absorver e utilizar os nutrientes. As linhagens de feijão diferem quanto à eficiência no uso de nitrogênio (Santos and Fageria, 2007; Souza et al., 2012), fósforo (Fageria et al., 2010; Henry et al., 2010) e potássio (Fageria et al., 2001). Não há registros de diferenças genéticas entre linhagens de feijão quanto à eficiência no uso de cálcio.

No entanto, a identificação de linhagens eficientes no uso de cálcio foi possível para as culturas da soja (Spehar and Galwey, 1997), tomate (Behling et al., 1989; Li and Gabelman, 1990; Caines and Shennan, 1999) e café (Tomaz et al., 2003). Como o cálcio é fundamental para o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Marschner, 1995) e considerando o fato de que mais de 70% da produção de feijão no Estado do Rio Grande do Sul se concentra em pequenas e médias propriedades agrícolas (Emater, 2012), a identificação de linhagens de feijão eficientes no uso de cálcio é relevante para a sustentabilidade da produção de feijão na agricultura familiar. Sendo assim, foram objetivos desse trabalho: (1) avaliar a variabilidade genética de linhagens de feijão

quanto aos caracteres de produção e ao acúmulo de cálcio em diferentes tecidos da planta em solução nutritiva com baixa e alta concentração de cálcio; (2) identificar linhagens de feijão eficientes no uso de cálcio e responsivas a aplicação de cálcio na solução nutritiva por meio de diferentes índices.

Material e métodos

Local e descrição dos dispositivos de cultivo

O trabalho foi conduzido durante os meses de março a junho de 2012 um experimento em casa-de-vegetação do Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. Santa Maria está localizada na depressão central do Estado do Rio Grande do Sul a 95 m de altitude, latitude 29°42S e longitude 53°49W. O experimento foi realizado em dispositivos fechados de cultivo fora do solo, adaptado de Andriolo (2007).

Foram empregados seis dispositivos de cultivo, instalados a 0,85 m de altura. Cada dispositivo foi constituído de uma telha de fibrocimento, com 3,60 m de comprimento e 1,10 m de largura, totalizando uma área de 3,96 m². Cada telha de fibrocimento foi disposta sobre uma bancada de concreto, com declividade de 1%. Sobre a telha de fibrocimento foi colocado um filme de polietileno de baixa densidade e uma camada de brita basáltica média, com a finalidade de auxiliar na drenagem da solução nutritiva excedente. A solução nutritiva foi acondicionada em um reservatório de fibra de vidro com capacidade para 310 dm³, localizado na parte mais baixa dos dispositivos de cultivo, e colocado na parte externa da casa-de-vegetação.

Sobre os dispositivos de cultivo foram dispostos os vasos de polipropileno pretos com capacidade para 4 L, furados na parte inferior. Os vasos foram preenchidos com areia média, previamente lavada com solução de hipoclorito de sódio a 1%. Cada dispositivo foi constituído por 48 vasos, com espaçamento de 30 cm na linha e de 5 cm entre as linhas.

Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas e seis repetições. As parcelas principais foram constituídas por duas concentrações de cálcio na solução nutritiva: baixa

concentração de cálcio ($1,10 \text{ mmol L}^{-1}$) e alta concentração de cálcio ($3,85 \text{ mmol L}^{-1}$). Três dispositivos de cultivo receberam baixa concentração de cálcio e os outros três, alta concentração de cálcio. Nas sub-parcelas foram dispostas 12 linhagens contrastantes para a concentração de cálcio nos grãos e produtividade de grãos, sendo dez linhagens F_8 obtidas por Jost et al. (2012) e duas linhagens comerciais de feijão (cultivares testemunhas) (Tabela 1).

Cada vaso recebeu três sementes de uma mesma linhagem. Posteriormente, no estágio de primeira folha trifoliolada (V3) foi realizado o desbaste para uma planta por vaso. A unidade experimental foi constituída por uma planta por vaso. Em cada dispositivo de cultivo foram conduzidas quatro unidades experimentais para cada linhagem, totalizando 12 unidades experimentais para cada tratamento.

Manejo das soluções nutritivas

A solução nutritiva de Furlani and Fernandes Júnior (2004) foi modificada para manter o equilíbrio iônico da solução, apesar da variação na concentração de cálcio. Na solução de baixa concentração de cálcio ($1,10 \text{ mmol L}^{-1}$) foram utilizadas as seguintes concentrações de sais fertilizantes: $227,6 \text{ mg L}^{-1}$ de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $246,5 \text{ mg L}^{-1}$ de MgSO_4 , 40 mg L^{-1} de NH_4NO_3 , $204,15 \text{ mg L}^{-1}$ de KH_2PO_4 e $303,3 \text{ mg L}^{-1}$ de KNO_3 . Na solução de alta concentração de cálcio ($3,85 \text{ mmol L}^{-1}$), os sais fertilizantes foram empregados nas seguintes concentrações: $796,6 \text{ mg L}^{-1}$ de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $369,75 \text{ mg L}^{-1}$ de MgSO_4 , $87,15 \text{ mg L}^{-1}$ de K_2SO_4 e $136,1 \text{ mg L}^{-1}$ de KH_2PO_4 . Na sequência, foi adicionada às duas soluções formuladas, $0,1 \text{ ml L}^{-1}$ de solução contendo os micronutrientes, exceto o ferro que foi fornecido na forma quelatizada na concentração de 20 mg L^{-1} . O cálculo das relações iônicas entre os macronutrientes e das quantidades de micronutrientes utilizadas foi realizado de acordo com a metodologia descrita por Andriolo (1999).

As soluções nutritivas foram fornecidas de forma individual para cada tratamento (concentração de cálcio) em quatro turnos diários de rega, com duração de 15 minutos, como sugerido por Andriolo et al. (2010). Para tanto, cada reservatório de solução nutritiva foi conectado a uma motobomba, a qual foi controlada por um programador diário (timer) para realizar as fertirrigações nos horários estipulados e de forma homogênea.

A condutividade elétrica (CE) e o pH das soluções nutritivas contidas nos reservatórios foram quantificados a cada 48 horas. Para condutividade elétrica os valores iniciais das soluções variaram entre 0,8 e 1,6 mS, já para pH esses valores ficaram entre 5,7 e 6,4. Sempre que a CE apresentou um desvio superior a 10%, em relação ao valor inicial, foi realizada a sua correção com adição de água ou de alíquotas de nova solução

nutritiva, conforme a necessidade. O pH da solução foi mantido na faixa de 5,5 a 6,5 mediante adição de NaOH ou H₂SO₄ na concentração de 1N. A solução nutritiva foi completamente renovada nos reservatórios sempre que o nível atingiu 33,3% da capacidade do reservatório.

Determinação dos caracteres de produção

No estágio de desenvolvimento de enchimento das vagens (R8), caracterizado de acordo com a escala fenológica descrita em CIAT (1987), foram coletadas seis plantas (unidades experimentais) de cada tratamento para a determinação da massa seca. Para tanto, cada planta foi fracionada em parte aérea (folhas e caules), vagens e raízes. As raízes foram lavadas em água corrente para a remoção da areia. As diferentes frações da planta (parte aérea, vagens e raízes) foram acondicionadas, individualmente, em sacos de papel. As amostras foram secas em estufa de secagem e de esterilização (Odontobras1.5; Odontobras, São Paulo, Brasil), com circulação forçada de ar (65 a 70°C), até massa constante, quando se determinou a massa seca da parte aérea, das vagens e das raízes em R8. A partição parte aérea/raízes foi obtida pela razão entre a massa seca de parte aérea e a massa seca das raízes da planta.

Seis plantas (unidades experimentais) de cada tratamento, também, foram coletadas no estágio de desenvolvimento de maturação (R9), que é caracterizado pela perda de pigmentação das vagens, que começam a secar (Ciat, 1987). Em R9 foram quantificados os números de vagens por planta, de grãos por planta, de grãos por vagem e a massa de grãos por planta.

Determinação da concentração de cálcio

A concentração de cálcio foi determinada em amostras da massa seca das folhas, do caule e das vagens (em estágio R8) e dos grãos (em estágio R9). Para tanto, aproximadamente, 5 g de amostra de cada uma das diferentes frações da planta, foram moídas em moinho analítico de faca (Q298A21; Quimis, São Paulo, Brasil) até a obtenção de partículas inferiores a 1 mm. Para cada tratamento, foram moídas amostras de três repetições (plantas).

Uma amostra aleatória de 0,5 g da farinha obtida foi digerida em 5 ml de solução ácida composta por ácido nítrico (HNO₃) e ácido perclórico (HClO₄), na proporção volumétrica de 3:1. O processo de digestão foi realizado a frio por 12 horas. Após, a temperatura do bloco digestor (CPM 25, Marconi, São Paulo, Brasil) foi

aumentada gradualmente, a cada 30 minutos em 30 °C, até atingir 180 °C. No final da digestão da amostra, restou no tubo uma alíquota totalmente translúcida de aproximadamente 1 ml. Após, foi realizada a diluição da amostra com 50 ml de água destilada, como recomendado por Miyazawa et al. (1999).

Na sequência, realizou-se uma diluição adicional com solução de óxido de lantânio. Para tanto, preparou-se uma solução com 30 ml de ácido clorídrico e 12 g de óxido de lantânio dissolvidos em 1 L de água destilada. Uma alíquota de 9 ml de solução de óxido de lantânio foi adicionada ao tubo que continha 1 ml da diluição inicial. A determinação da concentração de cálcio foi realizada em um espectrofotômetro de absorção atômica (modelo 932 AA; GBC, Braeside, Austrália), utilizando comprimento de onda de 422,70 nm.

Estimativas dos índices de eficiência no uso de cálcio e de resposta ao cálcio na solução

A eficiência no uso de cálcio foi determinada com o emprego dos seguintes índices propostos e adaptados de Siddiqi; Glass (1981):

(1) eficiência no uso de cálcio nos grãos (EUG) = (g de massa seca de grãos)² · (mg de Ca acumulado nos grãos)⁻¹.

(2) eficiência no uso de cálcio na parte aérea (EUPA) = (g de massa seca de parte aérea)² · (mg de Ca acumulado na parte aérea)⁻¹.

(3) eficiência no uso de cálcio na planta (EUP) = (g de massa seca de parte aérea e grãos)² · (mg de Ca acumulado na parte aérea e grãos)⁻¹.

(4) eficiência de aquisição de cálcio (EA) = (mg de Ca acumulado na parte aérea e grãos)² · (mg de Ca disponibilizado na solução nutritiva)⁻¹.

(5) eficiência no uso de cálcio na produção de grãos (EUPG) = (g de massa seca de grãos)² · (mg de Ca acumulado na parte aérea e grãos)⁻¹.

A resposta das linhagens de feijão à aplicação de cálcio na solução nutritiva foi avaliada por metodologia adaptada de Furtini (2008), a partir da seguinte expressão:

$$IR = [(MS_A - MS_B) (A - B)^{-1}]$$

em que: MS_A e MS_B correspondem a massa seca obtida em ambientes de alta e de baixa concentração de cálcio; A-B é a diferença de disponibilidade do cálcio entre as diferentes concentrações de cálcio na solução nutritiva.

A partir da expressão geral de Furtini (2008), foram estimados os seguintes índices de resposta:

(1) índice de resposta de cálcio à produção de grãos (IRPG) = [(MGP_A - MGP_B) (A - B)⁻¹]

em que: MGP_A e MGP_B correspondem a massa de grãos por planta (g) em alta e em baixa concentração de cálcio; $A-B$ é a diferença entre as diferentes concentrações de cálcio na solução nutritiva ($mg L^{-1}$).

(2) índice de resposta de cálcio à produção de massa seca de parte aérea (IRPA) = $[(MSPA_A - MSPA_B) (A-B)^{-1}]$

em que: $MSPA_A$ e $MSPA_B$ correspondem a massa seca de parte aérea (g) em alta e em baixa concentração de cálcio; $A-B$ é a diferença entre as diferentes concentrações de cálcio na solução nutritiva ($mg L^{-1}$).

(3) índice de resposta de cálcio à produção de massa seca pela planta (IRPP) = $[(MSP_A - MSP_B) (A-B)^{-1}]$

em que: MSP_A e MSP_B correspondem a massa seca de parte aérea e de grãos (g) em alta e em baixa concentração de cálcio; $A-B$ é a diferença entre as diferentes concentrações de cálcio na solução nutritiva ($mg.L^{-1}$).

Com base nos índices de eficiência no uso de cálcio e de resposta à aplicação de cálcio na solução nutritiva foram confeccionados os gráficos relacionando a eficiência e a capacidade de resposta e das linhagens. Para isso, foi plotado no eixo x , o índice de eficiência em baixa concentração de cálcio, uma vez que o objetivo era a seleção para condição de baixa disponibilidade. No eixo y foi plotado o índice de resposta à aplicação de cálcio. Os eixos x e y tiveram a origem transposta nos valores das médias dos índices de eficiência e de resposta. Foram confeccionados quatro gráficos relacionando a eficiência e a resposta para a massa seca de parte aérea, a eficiência e a resposta pela planta (parte aérea e grãos), a eficiência de aquisição e a resposta à produção de grãos e a eficiência e a resposta à produção de grãos. Assim, as linhagens de feijão foram classificadas de acordo com Batten et al. (1984) em quatro categorias: eficientes e responsivas (ER), não eficientes e responsivas (NER), não eficientes e não responsivas (NENR) e eficientes e não responsivas (ENR).

Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância considerando o delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas, com seis repetições para os caracteres de produção e três repetições para a determinação da concentração de cálcio nos tecidos e estimativas de índices de eficiência de uso e de resposta ao cálcio. O teste F (valor- $p < 0,05$) foi usado para os testes das hipóteses dos efeitos principais e da interação concentração de cálcio x linhagens.

A comparação das médias entre as duas concentrações de cálcio foi realizada pelo teste t de Student, enquanto que as médias obtidas pelas diferentes linhagens foram comparadas entre si pelo teste de Scott-Knott. Para ambos os testes de médias foi considerado o nível de significância de 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram efetuadas com a planilha eletrônica Office Excel e com o software GENES (Cruz, 2006).

Resultados e discussão

Resultados gerais

Na análise de variância observaram-se efeitos significativos para concentração de cálcio, linhagens de feijão e interação concentração de cálcio x linhagens para os caracteres da produção (massa seca de parte aérea, massa seca de vagens, massa seca de raízes, partição parte aérea/raízes, número de vagens por planta, número de grãos por planta, número de grãos por vagem e massa de grãos por planta), concentração de cálcio (nas folhas, caules, vagens e grãos) e para os índices de eficiência no uso de cálcio (eficiência no uso de cálcio nos grãos, eficiência no uso de cálcio na parte aérea, eficiência no uso de cálcio na planta, eficiência de aquisição de cálcio e eficiência no uso de cálcio na produção de grãos) (Tabela 2). Neste caso, as concentrações de cálcio na solução nutritiva foram diferentes, possibilitando a seleção de linhagens de feijão para cultivo em baixo e alto cálcio no ambiente; há variabilidade genética entre as linhagens de feijão, permitindo a seleção para eficiência no uso de cálcio e resposta à aplicação deste mineral na solução nutritiva; e houve resposta diferenciada das linhagens de feijão em função da variação da concentração de cálcio na solução nutritiva.

Para os índices de resposta das linhagens de feijão à aplicação de cálcio na solução nutritiva (índice de resposta de cálcio à produção de grãos, índice de resposta de cálcio à produção de massa seca de parte aérea e índice de resposta de cálcio à produção da massa seca pela planta) se constatou efeito significativo para linhagens (Tabela 2). Portanto, as linhagens de feijão diferem quanto à resposta a aplicação de cálcio na solução nutritiva e isso favorece a seleção de linhagens mais e menos exigentes a aplicação de cálcio no ambiente.

Caracteres da produção

Quando o cultivo foi realizado com baixa concentração de cálcio, a linhagem L 15 produziu a maior massa seca de parte aérea, enquanto que em alta concentração de cálcio na solução, a linhagem L 221 se destacou na produção de massa seca de parte aérea (Tabela 3). Além disso, as linhagens de feijão apresentaram resposta diferenciada na produção de massa seca de parte aérea em resposta ao aumento da concentração de cálcio

na solução nutritiva. As linhagens Carioca, L 236, L 175, L 15, L 200, L 221, L 159 e L 77 produziram mais massa seca de parte aérea quando as plantas foram cultivadas em solução com alta concentração de cálcio. Silva et al. (2011) também verificaram maior produção de massa seca de parte aérea de plantas de feijão com o aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva. No entanto, as linhagens L 74 e L 246 apresentaram redução da massa seca de parte aérea na solução com alta concentração de cálcio. Já, as linhagens BRS Expedito e L 234 não responderam ao aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva.

Plantas de tomate cultivadas em solução nutritiva com baixa e alta concentração de cálcio, de maneira similar, apresentaram diferenças na produção de massa seca total entre as linhagens cultivadas na mesma concentração de cálcio e entre linhagens cultivadas em diferentes concentrações de cálcio na solução (Li and Gabelman, 1990). Portanto, é possível identificar linhagens de feijão com alta produção de massa seca de parte aérea em ambiente com baixa e alta concentração de cálcio. No presente estudo, constatou-se que as linhagens L 74, L 246, BRS Expedito e L 234 não apresentaram limitação no crescimento da parte aérea das plantas em cultivo com baixa disponibilidade de cálcio, o que pode representar vantagens mercadológicas na produção em áreas agrícolas com restrição de cálcio.

Para a maioria das linhagens, o aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva não foi eficiente para aumentar a massa seca de vagens e de raízes (Tabela 3), concordando com os resultados obtidos por Favaro et al. (2007) em feijão vagem. Quando a concentração de cálcio na solução foi alta verificou-se maior produção de massa seca de vagens para as linhagens L 236 e L 159 e maior produção de massa seca de raízes apenas para a linhagem L 159.

A linhagem L 77 apresentou a maior produção de massa seca de vagens em baixa e em alta concentração de cálcio na solução. As linhagens que exibiram maior produção de massa seca de raízes em baixa concentração de cálcio foram L 74, L 221, L 246 e L77 e em alta concentração de cálcio, L 221 e L 159. Interação significativa entre concentração de cálcio na solução nutritiva x cultivares de soja foi observada para a alongação de raízes e o crescimento de raízes secundárias e isso ocorreu porque as cultivares de soja apresentaram requerimento de cálcio diferente para o crescimento das raízes (Spehar and Galwey, 1997). As linhagens L 74, L 221, L 246 e L77 apresentaram baixo requerimento de cálcio para o crescimento das raízes. Por isso, a seleção destas linhagens é promissora para o programa de melhoramento, pois o maior desenvolvimento do sistema radicular possibilita a exploração de áreas mais profundas e extensas do solo, viabilizando a produção de feijão em condições de restrição de cálcio no ambiente.

Para a partição parte aérea/raízes foi observada diferença significativa favorável a maior concentração de cálcio na solução para todas as linhagens, exceto para a L 175 (Tabela 3). Como consequência, para a maioria das linhagens, a condição de alta disponibilidade de cálcio na solução nutritiva proporcionou maior desenvolvimento de parte aérea em relação ao desenvolvimento radicular.

O feijão responde ao aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva, pois incremento no número de vagens verdes, colhidas 10 – 12 dias após a antese de flores de feijão vagem, foi constatado na maior concentração de cálcio (Favaro et al., 2007). Como o cálcio atua na germinação do grão de pólen e no crescimento do tubo polínico, foi constatada maior fertilidade de plantas em alto suprimento de cálcio (Ge et al., 2007). Portanto, o aumento do número de vagens por planta, do número de grãos por planta, do número de grãos por vagem e da massa de grãos por planta em feijão se justifica pelo menor abortamento das flores, vagens e grãos na maior concentração de cálcio na solução nutritiva.

A linhagem L 15 produziu os maiores números de vagens por planta, de grãos por planta, de grãos por vagem e a maior massa de grãos por planta em baixa concentração de cálcio na solução nutritiva. Isso pode ser atribuído ao maior crescimento da parte aérea das plantas desta linhagem em condições de restrição de cálcio (Tabela 3). A linhagem L 15 apresentou um baixo requerimento de cálcio para a produção de massa seca de parte aérea e para o aumento dos componentes da produtividade de grãos de feijão, por isso será selecionada pelo programa de melhoramento e avaliada em condições de campo, visando o desenvolvimento de cultivar adaptada para produção em baixa tecnologia.

A linhagem L 77 exibiu grande capacidade de fixação de grãos por vagem em baixa (5,4) e em alta concentração de cálcio (5,1) e apresentou incremento de 63,95% na massa de grãos por planta quando cultivada em solução com alta concentração de cálcio (Tabela 3). As linhagens BRS Expedito, Carioca, L 236, L 175, L 200, L 74, L 221, L 159 e L 234, também, foram responsivas ao aumento da concentração de cálcio na solução, ou seja, para essas linhagens é possível aumentar a produtividade de grãos com o suprimento de cálcio no ambiente. Entretanto, as linhagens L 15 e L 246 apresentaram redução na massa seca de grãos quando o cultivo foi realizado em solução com alta concentração de cálcio. Por isso, o cultivo destas linhagens será restrito aos ambientes com baixa disponibilidade de cálcio, onde a produtividade de grãos será superior.

Concentração de cálcio

As linhagens de feijão acumularam, em média, mais cálcio nas folhas, seguido pelos caules, vagens e grãos (Tabela 4). Em feijão vagem cultivado em solução nutritiva, também, foi possível verificar que as folhas de feijão foram as maiores acumuladoras de cálcio, seguidas pelos caules (Pomper and Grusak, 2004). Quando o cultivo das linhagens de feijão foi realizado em alta concentração de cálcio, foi possível obter incrementos na concentração de cálcio nas folhas, caules, vagens e grãos.

A concentração média de cálcio nas folhas de feijão foi de 16,39 g kg⁻¹ de matéria seca (MS), em baixa concentração de cálcio na solução. Quando as plantas foram cultivadas em solução com alta concentração de cálcio, esse valor passou para 26,78 g kg⁻¹ de MS, representando um incremento de 63,39% no acúmulo de cálcio nas folhas de feijão. As folhas de feijão obtidas de plantas cultivadas em solução nutritiva com alta concentração de cálcio apresentaram, em média, 27 vezes mais cálcio do que os grãos colhidos na mesma condição de cultivo. Portanto, numa avaliação preliminar foi possível constatar que as folhas de feijão são ricas em cálcio e que o seu uso na alimentação humana precisa ser avaliado.

Com exceção das linhagens BRS Expedito, L 236 e L 175, todas as demais linhagens exibiram alta concentração de cálcio nas folhas quando cultivadas em solução com baixa concentração de cálcio. Portanto, foi possível selecionar linhagens de feijão com maior habilidade de acumular cálcio nas folhas (Carioca, L 15, L 200, L 74, L 221, L 159, L 234, L 246 e L77), mesmo quando cultivadas em ambiente com restrição de cálcio.

Em cultivo realizado com baixa concentração de cálcio na solução, as linhagens BRS Expedito, Carioca, L 236, L 175, L 200 e L 159 apresentaram os maiores valores para a concentração de cálcio nos grãos (Tabela 4). Quando a solução foi formulada com alta concentração de cálcio, apenas as linhagens BRS Expedito, L 175 e L 159 mostraram alta concentração de cálcio nos grãos. Portanto, as linhagens BRS Expedito, L 175 e L 159 produzem grãos de feijão que acumulam mais cálcio, em baixa e em alta concentração de cálcio no ambiente.

A concentração média de cálcio nos grãos das linhagens cultivadas em baixa concentração de cálcio na solução foi de 0,86 g kg⁻¹ de MS. Um acréscimo de 13,95% no acúmulo médio de cálcio nos grãos foi obtido em cultivo em alta concentração de cálcio na solução (0,98 g kg⁻¹ de MS). Como o cálcio é transportado pelo xilema, a sua mobilidade no floema é baixa (Frossard et al., 2000), por isso, o acúmulo de cálcio nos grãos das linhagens de feijão foi bastante reduzido. Sendo assim, o aumento do suprimento de cálcio na solução não foi eficiente para aumentar o acúmulo de cálcio nos grãos de feijão das linhagens BRS Expedito, Carioca, L 236, L 175, L 200, L 74, L 221 e L 159. Em feijão vagem, a adição de cálcio no solo, também, não contribuiu para aumentar a concentração de cálcio nas vagens imaturas (Miglioranza et al., 1997; Quintana et al., 1999).

Entretanto, as linhagens L 15, L 234, L 246 e L 77 responderam ao aumento do suprimento de cálcio na solução, pois acumularam mais cálcio nos grãos quando o cultivo foi realizado em alta concentração de cálcio. Para estas linhagens, o mecanismo de absorção, transporte e acúmulo de cálcio nos grãos foi mais eficiente. Esse é o primeiro relato de aumento da concentração de cálcio nos grãos de feijão com o suprimento de cálcio no ambiente.

Índices de eficiência no uso de cálcio e resposta à aplicação de cálcio na solução

As linhagens L 15 e L 246 apresentaram maior eficiência no uso de cálcio nos grãos (Tabela 5), ou seja, exibiram maior massa de grãos por planta na menor concentração de cálcio na solução nutritiva (Tabela 3). Além disso, essas linhagens produziram 3,48 vezes mais massa de grãos do que a média das linhagens (0,184 g), quando a concentração de cálcio na solução foi baixa. Portanto, essas linhagens são promissoras para cultivo em ambientes com restrição de cálcio.

As linhagens L 15 e L 77 exibiram os maiores valores para eficiência no uso de cálcio na parte aérea, diferindo significativamente das demais linhagens, em cultivo realizado em baixa concentração de cálcio na solução (Tabela 5). As linhagens BRS Expedito, Carioca, L 236, L 175, L 200, L 74, L 221, L 159, L 234 e L 246 foram ineficientes no uso de cálcio na parte aérea. Usando este mesmo índice foi possível identificar linhagens de tomate eficientes e ineficientes no uso de cálcio (Behling et al., 1989; Li and Gabelman, 1990; Caines and Shennan, 1999). De acordo com Behling et al. (1989), as linhagens de tomate eficientes no uso de cálcio na parte aérea, mostraram habilidade para manter alta proporção do cálcio total na forma solúvel e continuar o crescimento e o metabolismo em todas as partes da planta, mesmo sob baixa concentração de cálcio em seus tecidos. Já, as linhagens ineficientes no uso de cálcio na parte aérea, segundo os mesmos autores, apresentaram alta concentração de cálcio insolúvel nos tecidos da parte aérea das plantas. Plantas de feijão cultivadas em alta concentração de cálcio na solução nutritiva acumularam maior quantidade de cálcio e de oxalato de cálcio insolúveis (Zindler-Frank et al., 2001). Por isso, acredita-se que as linhagens de feijão ineficientes no uso de cálcio na parte aérea, a semelhança do observado para as plantas de tomate, tenham maior quantidade de cálcio insolúvel nas folhas.

A linhagem L 15, além de apresentar eficiência no uso de cálcio nos grãos e na parte aérea, foi a que exibiu maior eficiência no uso de cálcio na planta (Tabela 5). Isso ocorre porque a L15 produziu alta massa de grãos por planta e de parte aérea em baixa concentração de cálcio na solução nutritiva (Tabela 3). A linhagem L

15 poderia ser utilizada para duplo propósito, consumo de grãos e de folhas, em ambientes de baixa disponibilidade de cálcio.

As linhagens L 15, L 234 e L 246 mostraram eficiência de aquisição de cálcio, diferindo significativamente das demais linhagens em baixa concentração de cálcio na solução nutritiva (Tabela 5). Essas linhagens apresentaram alta capacidade de absorção e de acúmulo de cálcio na parte aérea. Entretanto, este índice não foi eficiente para selecionar linhagens de cafeeiro com eficiência no uso de cálcio (Tomaz et al., 2003). As diferenças observadas podem ser justificadas pela ampla variabilidade genética das linhagens de feijão avaliadas neste estudo (Tabela 1).

As linhagens L 15 e L 246 apresentaram maior eficiência no uso de cálcio na produção de grãos em baixa concentração de cálcio (Tabela 5). Essas linhagens foram mais eficientes na conversão do cálcio para a produção de grãos em baixa disponibilidade de cálcio (Tabela 3), portanto são promissoras para o cultivo em ambientes com restrição de cálcio.

A identificação de linhagens de feijão responsivas à aplicação de cálcio na solução diferiu com o índice empregado (Tabela 5). O índice de resposta de cálcio à produção de grãos identificou as linhagens BRS Expedito, Carioca, L 236, L 175, L 200, L 74, L 221, L 159, L 234 e L77 como responsivas à aplicação de cálcio na solução. Já, o índice de resposta de cálcio à produção de massa seca de parte aérea e o índice de resposta de cálcio à produção de massa seca pela planta foram concordantes na identificação de linhagens de feijão responsivas a aplicação de cálcio na solução: L 221 e L 159.

A relação entre a eficiência no uso de cálcio na parte aérea e o índice de resposta de cálcio à produção de massa seca de parte aérea é apresentada na Figura 1A. Quatro grupos de linhagens foram formados: (1) eficiente e responsiva: L 15; (2) não eficiente e responsiva: L 221, L 159, Carioca, L 236 e L 200; (3) não eficiente e não responsiva: L 175 e BRS Expedito; e (4) eficiente e não responsiva: L 234, L 77, L 246 e L 74.

As linhagens dos grupos 1 e 4 foram classificadas como eficientes no uso de cálcio na parte aérea, pois em cultivo com baixa concentração de cálcio na solução apresentaram produção de massa seca de parte aérea superior a média geral (Tabela 3). As linhagens de feijão L 15, L 234, L 77, L 246 e L 74 podem ser indicadas para as situações em que não se realiza a correção da acidez do solo de forma adequada, devido ao custo da calagem para a produção na agricultura familiar. A linhagem L 15, além de ser indicada para o cultivo em baixo nível tecnológico, é responsiva a aplicação de cálcio no ambiente (Figura 1A) e, por isso, a sua produção em alta tecnologia, também, é apropriada.

As linhagens dos grupos 1 e 2 foram enquadradas como responsivas a aplicação de cálcio na solução (Figura 1A). Sendo assim, o cultivo das linhagens L 15, L 221, L 159, Carioca, L 236 e L 200 será satisfatório em ambientes que fazem o uso recomendado da calagem. Nessa situação, a produção de massa seca de parte aérea destas linhagens de feijão será favorecida.

A relação entre a eficiência no uso de cálcio na planta (parte aérea e grãos) e o índice de resposta de cálcio à produção de massa seca pela planta é apresentada na Figura 1B. Nesta condição apenas dois grupos de linhagens foram formados: eficiente e responsiva (L 221, L 159, L 236, Carioca, L 200, L 77, L 175, L 234 e BRS Expedito) e eficiente e não responsiva (L 74, L 15 e L 246). De acordo com este índice todas as linhagens foram eficientes no uso de cálcio na planta. No entanto, foi possível identificar cultivares de feijão eficientes e não eficientes no uso de nitrogênio em solos de várzea, usando este mesmo índice (Santos and Fageria, 2007).

No presente estudo, as linhagens diferiram somente quanto ao grau de resposta à aplicação de cálcio na solução (Figura 1B). As linhagens L 221, L 159, L 236, Carioca, L 200, L 77, L 175, L 234 e BRS Expedito foram responsivas a aplicação de cálcio, portanto em condições de adequada disponibilidade de cálcio no ambiente, a produção de massa seca de parte aérea e de grãos destas linhagens de feijão será favorecida. Entretanto, as linhagens L 74, L 15 e L 246 produziram alta massa seca de parte aérea + grãos no ambiente com baixa concentração de cálcio, mas quando foram submetidas à concentração de cálcio elevada não responderam satisfatoriamente à aplicação de cálcio na solução.

De acordo com a relação entre a eficiência de aquisição de cálcio e o índice de resposta de cálcio a produção de grãos, foram formados três grupos de linhagens: eficiente e responsiva (L 200, Carioca, L 159 e L 74), não eficiente e responsiva (L 236, BRS Expedito, L 175, L 221 e L 77) e eficiente e não responsiva (L 15, L 246 e L 234) (Figura 1C). As linhagens eficientes na aquisição de cálcio (L 200, Carioca, L 159, L 74, L 15, L 246 e L 234) devem possuir uma maior capacidade de assimilação do cálcio, que foi convertido em maior produção de grãos. De acordo com Caines and Shennan (1999), a relação entre uso eficiente de cálcio e o crescimento da planta é bastante complexa, envolvendo uma série de controles fisiológicos específicos, como a capacidade de retranslocação interna do cálcio compartimentalizado em membranas e órgãos celulares de armazenamento (retículo endoplasmático, cloroplastos e vacúolo).

A relação entre a eficiência no uso de cálcio na produção de grãos e o índice de resposta de cálcio a produção de grãos, possibilitou a formação de três grupos de linhagens: eficiente e responsiva: L 77; não eficiente e responsiva: Carioca, L 236, L 200, L 74, L 221, BRS Expedito, L 175, L 159 e L 234; e (4) eficiente e não responsiva: L 246 e L 15 (Figura 1D).

Apenas a linhagem 77 obteve incremento expressivo na massa de grãos por planta em resposta ao acréscimo da concentração de cálcio na solução (Tabela 3). Portanto, essa linhagem poderá apresentar adaptação tanto a condições de baixa disponibilidade de cálcio como em condições de ótima disponibilidade deste mineral. Em experimento conduzido a campo, Souza et al. (2012), identificaram duas cultivares de feijão eficientes e responsivas ao nitrogênio, usando essa mesma metodologia.

As linhagens L 246 e L 15 apresentaram massa de grãos por planta acima da média geral em cultivo em baixa concentração de cálcio, mas a massa de grãos por planta foi reduzida quando a concentração de cálcio na solução foi alta (Tabela 3). Portanto, essas linhagens deverão ser indicadas para cultivos em que não é possível utilizar a quantidade de calcário recomendada para controlar a acidez do solo ou para produtores de feijão de baixo nível tecnológico. Cultivares de feijão eficientes no uso de nitrogênio e não responsivas a aplicação de nitrogênio no ambiente, também foram identificadas por Souza et al. (2012).

Considerando que as linhagens L 246 e L 15 foram eficientes no uso de cálcio na planta (Figura 1B), na aquisição de cálcio (Figura 1C) e na produção de grãos (Figura 1D), e não foram responsivas a aplicação de cálcio na solução nutritiva, essas linhagens têm potencial de uso na agricultura familiar. Isto porque as linhagens L 246 e L 15 apresentaram maior massa seca de parte aérea e de grãos, maior acúmulo de cálcio na parte aérea das plantas e maior produção de grãos por planta em condição de baixo suprimento de cálcio no ambiente. Portanto, o programa de melhoramento irá avaliar essas cultivares em condições de campo para validar a indicação destas linhagens para o cultivo na agricultura familiar.

A linhagem L 77 foi eficiente no uso de cálcio na planta (Figura 1B) e na produção de grãos (Figura 1D) e foi responsiva à aplicação de cálcio na solução nutritiva. Como a linhagem 77 apresentou alta produção de massa seca de parte aérea e de grãos e alta produção de grãos por planta, tanto em cultivo em baixa como em alta concentração de cálcio na solução, o seu cultivo poderá ser adequado tanto para baixo como alto nível tecnológico. Como esses resultados foram obtidos em condições ótimas de disponibilidade de cálcio no ambiente para o desenvolvimento das plantas, a avaliação destas linhagens em ambiente de campo é necessária. Se os resultados apresentarem repetibilidade em condições de campo, a linhagem L 77 será indicada para o cultivo em baixa e em alta tecnologia. Além disso, a L 77 será utilizada em programas de hibridação dirigida para o desenvolvimento de novas linhagens de feijão com eficiência no uso de cálcio.

Conclusões

As linhagens de feijão apresentam variabilidade genética em baixa e em alta concentração de cálcio no ambiente e apresentaram resposta diferenciada para os caracteres de produção e para o acúmulo de cálcio nos tecidos.

As linhagens L 246 e L 15 são eficientes no uso de cálcio na planta, na aquisição de cálcio e na produção de grãos e não são responsivas à aplicação de cálcio.

A linhagem L 77 é eficiente no uso de cálcio na planta e na produção de grãos e é responsiva à aplicação de cálcio.

Referências bibliográficas

Andriolo JL (1999) Fisiologia das culturas protegidas. Ed.UFSM, Santa Maria.

Andriolo JL (2007) Preparo e manejo da solução nutritiva na produção de mudas e de frutas do morangueiro. In: Anais do Seminário sobre o cultivo hidropônico de morangueiro, Ed. UFSM, Santa Maria, pp 41-50.

Andriolo JL, Janisch DI, Shimitt OJ, Dal Pício M, Cardoso FL, Erpen L (2010) Doses de potássio e cálcio no crescimento da planta, na produção e na qualidade de frutas do morangueiro em cultivo sem solo. Ciênc Rural 40:267-272. doi: 10.1590/S0103-84782010000200003.

Bailian L, Mckeand SE, Allen HL (1991) Genetic variation in nitrogen use efficiency of lobeolly pine seedlings. Forest Sci 37:613- 626.

Baligar VC, Fageria NK, He ZL (2001) Nutrient use efficiency in plants. Commun Soil Sci Plan 32:921-950. doi: 10.1081/CSS-100104098.

Batten GD et al. (1984) Yield responses by modern wheat genotypes to phosphate fertilizer for breeding. Euphytica 33:81-89.

Behling JP, Gabelman WH, Gerloff GC (1989) The distribution and utilization of calcium by tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) lines differing in calcium efficiency when grown under low-Ca stress. Plant Soil 113:189-196.

Caines AM, Shennan C (1999) Growth and nutrient composition of Ca²⁺ use efficient and Ca²⁺ use inefficient genotypes of tomato. Plant Physiol Biochem 37:559-567.

Castro G (2009) Eficiência de absorção e utilização de fósforo em batata cultivada in vitro. Dissertação, Universidade Federal de Santa Maria.

Ciat (1987) Standard system of evaluation of bean germoplasma. CIAT, Cali.

Cruz CD (2006) Programa Genes: biometria. Imprensa Universitária UFV, Viçosa.

Emater (2012) Acompanhamento da safra: safra 2011/2012: tabelas. EMATER, Porto Alegre.

Fageria NK (1998) Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient 2:6-16.

Fageria NK, Barbosa Filho MP, Costa JGC (2001) Potassium-use efficiency in common bean genotypes. J Plant Nut 24:1937-1945. doi: 10.1081/PLN-100107605.

- Fageria NK, Baligar VC, Moreira A, Portes TA (2010) Dry bean genotypes evaluation for growth, yield components and phosphorus use efficiency'. *J Plant Nut* 33:2167-2181. doi: 10.1080/01904167.2010.519089.
- Favaro SP, Braga Neto JA, Takahashi HW, Miglioranza E, Ida EI (2007) Rates of calcium, yield and quality of snap bean. *Sci. Agri* 64:616-620. doi: 10.1590/S0103-90162007000600009.
- Fox R H (1978) Selection for phosphorus efficiency in corn. *Commun Soil Sci Plan* 9:13-37.
- Frossard E, Bucher M, Machler F, Mozafar A, Hurrell R (2000) Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. *J. Sci. Food Agric.* 80:861-879. doi: 10.1002/(SICI)1097-0010(20000515)80:7<861::AID-JSFA601>3.0.CO;2-P.
- Furlani PR, Fernandez Júnior F (2004) Cultivo hidropônico de morango em ambiente protegido. In: Corrêa Antunez LE (Ed.). *Anais do 2º Simpósio nacional do morango & encontro de pequenas frutas e frutas nativas do mercosul*. EMBRAPA, Pelotas pp 102-115.
- Furlani AMC, Furlani, PR, Tanaka, RT, Mascarenhas HAA, Delgado MDP (2002) Variability of soybean germplasm in relation to phosphorus uptake and use efficiency. *Sci. Agri* 59:529-536. doi: 10.1590/S0103-90162002000300018.
- Furtini IV (2008) Implicações da seleção no feijoeiro efetuada em ambientes contrastantes em níveis de nitrogênio. *Dissertação, Universidade Federal de Lavras*.
- GE LL, Tian HQ, Russel, SD (2007) Calcium function and distribution during fertilization in angiosperms, *Am J Bot.* 94:1046–1060. doi: 10.3732/ajb.94.6.1046.
- Gondin ARO, Prado RM, Alves AU, Fonseca IM (2010) Eficiência nutricional do milho cv. BRS 1030 submetido à omissão de macronutrientes em solução nutritiva. *Rev. Ceres* 57:539-544. doi: 10.1590/S0034-737X2010000400017.
- Good AG, Shrawat AK, Muench DG (2004) Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends Plant Sci* 9:597–605. doi: 10.1016/j.tplants.2004.10.008.
- Graham RD (1984) Breeding for nutritional characteristics in cereals. In: Tinker PB, Läuchli A (Eds.). *Advances in plant nutrition*, Praeger, New York pp 57-102.
- Henry A, Chaves NF, Kleinman PJA, Lynch JP (2010) Will nutrient-efficient genotypes mine the soil? Effects of genetic differences in root architecture in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on soil phosphorus depletion in a low-input agro-ecosystem in Central America. *Field Crops Res* 115:67-78. doi: 10.1016/j.fcr.2009.10.004.
- Hungria MA, Andrade DS, Chueire LM, Probanza A, Gutierrez Manero FJ, Mejias M (2000) Isolation and characterization of new efficient in competitive bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizobia from Brazil. *Soil Biol Biochem* 32:1515-1528. doi: 10.1016/S0038-0717(00)00063-8.
- Jost E, Ribeiro ND, Mazieiro SM, Possobom MTD, Rosa DP, Domingues, L da S (2012) Comparison among direct, indirect and index selections on agronomic traits and nutritional quality traits in common bean. *J. Sci. Food Agric.* doi: 10.1002/jsfa.5856.
- Li YM, Gabelman WH (1990) Inheritance of calcium use efficiency in tomatoes grown under low-calcium stress. *J Amer Soc. Hort. Sci.* 115:835-838.
- McLaughlin SL, Wimmer R (1999) Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. *New Phytol* 142:373-417.
- Maynard DN (1979) Nutritional disorders of vegetable crops: A review. *J Plant Nut* 1:1-23.

- Marschner H (1995) Mineral nutrition of higher plants, Academic Press, London.
- Mendonça RJ, Cambraia J, Oliveira JA, Oliva MA (2003) Efeito do alumínio na absorção e na utilização de macronutrientes em duas cultivares de arroz. *Pesq. Agrop. Bras* 38:843-848. doi: 10.1590/S0100-204X2003000700008.
- Miglioranza E, Barack, P, Kmiecik K, Nienhuis J (1997) Comparison of soil and genotypic effects of calcium concentration of snap beans pods. *Hortscience* 32:68-70.
- Miyazawa M, Pavan MA and Bloch MF (1999) Análises químicas de tecido vegetal. In: Silva FC (Ed) Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes, Ed. Embrapa Solos, Brasília, pp. 171-223.
- Pomper KW, Grusak MA (2004) Calcium uptake and whole-plant water use influence pod calcium concentration in snap bean plants. *J Amer Soc Hort Sci* 129:890-895.
- Quintana JM, Harison HC, Palta JP, Nienhuis J, Kmiecik K (1999) Calcium fertilizers fail to affect pod calcium concentration and yield of four snap bean cultivars. *HortScience* 34:646-647.
- Ritchey KD, Sousa DMG, Lobato E, Correa O (1980) Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah oxisol. *Agron J*, 72:40-43.
- Rose, TJ, Wissuwa M (2012) Rethinking Internal Phosphorus Utilization Efficiency: A New Approach Is Needed to Improve PUE in Grain Crops. *Adv Agron* 116:185-217. doi: 10.1016/B978-0-12-394277-7.00005-1.
- Santos AB, Fageria NK (2007) Manejo do nitrogênio para eficiência de uso por cultivares de feijoeiro em várzea tropical. *Pesq. Agrop. Bras* 42:1237-1248. doi: 10.1590/S0100-204X2007000900004.
- Siddiqi M Y, Glass ADM (1981) Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *J Plant Nut* 4:289-302.
- Silva SA, Moraes WB, Souza GS (2011) Doses de cálcio no crescimento do feijoeiro cultivado em solução nutritiva, na presença de alumínio. *Idesia* 29:53-58. doi: 10.4067/S0718-34292011000300008.
- Souza SA, Silva, J, Ramos DP, Oliveira TC, Gonzaga LAM, Fidelis RR (2012) Eficiência e resposta à aplicação de nitrogênio de genótipos de feijão comum cultivados em várzea tropical do Estado do Tocantins. *J Biotec. Biodivers.* 3:31-37.
- Spehar CR, Gawey NW (1997) Screening soya beans [*Glycine max* (L.) Merrill] for calcium efficiency by root growth in low-Ca nutrient solution. *Euphytica* 94:113-117.
- Tomaz MA, Silva, SR, N. S. Sakiyama NS, Martinez HEP (2003) Eficiência de absorção, translocação e uso de cálcio, magnésio e enxofre por mudas enxertadas de *Coffea arabica*. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 27:885-892. doi: 10.1590/S0100-06832003000500013.
- Vale FR, Guazelli EMF, Furtini Neto AE, Fernandes LA (1998) Cultivo do feijoeiro em solução nutritiva sob proporções variáveis de amônio e nitrato. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 22:35-42.
- Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL (2003) Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing nonrenewable resource. *New Phytol* 157:423-447.
- Zindler-Frank E, Honow R, Hesse A (2001) Calcium and oxalate content of the leaves of *Phaseolus vulgaris* at different calcium supply in relation to calcium oxalate crystal formation. *J Plant Physiol* 158:139-144. doi:10.1078/0176-1617-00045.

Tabela 1 Coloração do tegumento dos grãos (cor), concentração de cálcio nos grãos (Ca, g kg⁻¹ de matéria seca) e produtividade de grãos (produtividade), obtidas previamente em experimento de campo, das linhagens de feijão avaliadas em baixa e em alta concentração de cálcio em solução nutritiva.

Linhagem	Cor	Ca (g kg ⁻¹)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
BRS Expedito	Preto	2,05	902,50
Carioca	Carioca	1,47	540,00
L 236	Carioca	1,84	978,00
L 175	Preto	2,23	758,00
L 15	Carioca	1,15	2594,00
L 200	Carioca	1,94	1680,50
L 74	Carioca	1,17	2809,00
L 221	Preto	0,79	520,00
L 159	Preto	1,80	1279,00
L 234	Chocolate	1,84	1310,00
L 246	Carioca	1,32	2644,50
L 77	Preto	1,25	2596,50

Tabela 2 Resumo da análise de variância para as variáveis: massa seca de parte aérea (MSPA, g), massa seca de vagens (MSV, g), massa seca de raízes (MSR, g), partição parte aérea/raízes (PA/R), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), número de grãos por vagem (NGV), massa de grãos por planta (MGP, g), concentração de cálcio nas folhas (Ca folhas, g kg⁻¹ de matéria seca - MS), concentração de cálcio no caule (Ca caule, g kg⁻¹ de MS), concentração de cálcio nas vagens (Ca vagens, g kg⁻¹ de MS), concentração de cálcio nos grãos (Ca grãos, g kg⁻¹ de MS), eficiência no uso de cálcio nos grãos (EUG, g² mg Ca⁻¹), eficiência no uso de cálcio na parte aérea (EUPA, g² mg⁻¹), eficiência no uso de cálcio na planta (EUP, g² mg⁻¹), eficiência de aquisição de cálcio (EA, g² mg⁻¹), eficiência no uso de cálcio na produção de grãos (EUPG, g² mg⁻¹), índice de resposta de cálcio à produção de grãos (IRPG), índice de resposta de cálcio à produção de massa seca de parte aérea (IRPPA) e índice de resposta de cálcio à produção de massa seca pela planta (IRPP) avaliadas em 12 linhagens de feijão submetidas a duas concentrações de cálcio na solução nutritiva.

Quadrado Médio							
Fonte de variação	G.L.	MSPA	MSV	MSR	PA/R	NVP	
Concentração (C)	1	667,71 *	269,51 *	1,10 *	189,89 *	269,51 *	
Erro A	10	1,95	1,15	0,72	12,47	1,15	
Linhagem (L)	11	164,25 *	88,29 *	1,28 *	165,67 *	88,29 *	
C X L	11	118,12 *	52,45 *	1,21 *	70,74 *	52,45 *	
Erro B	110	1,43	1,44	0,37	7,94	1,44	
Média		14,41	11,44	1,45	15,79	11,44	
C.V. (%)		9,69 ¹ -8,30 ²	10,33 ¹ -10,49 ²	18,50 ¹ -13,28 ²	22,35 ¹ -17,84 ²	9,38 ¹ -10,49 ²	
Fonte de variação	G.L.	NGP	NGV	MGP	G.L.	Ca Folhas	Ca Caule
Concentração (C)	1	7788,06 *	3,31 *	1000,35 *	1	1941,63 *	343,08 *
Erro A	10	33,21	0,11	1,42	10	0,98	0,29
Linhagem (L)	11	1336,47 *	4,90 *	124,18 *	11	16,29 *	6,63 *
C X L	11	1086,74 *	1,01 *	68,47 *	11	6,18 *	5,77 *
Erro B	110	43,97	0,14	1,31	44	1,49	0,17
Média		50,81	4,50	12,16		21,59	6,52
C.V. (%)		11,34 ¹ -13,05 ²	7,52 ¹ -8,35 ²	9,79 ¹ -9,43 ²		4,58 ¹ -5,66 ²	8,23 ¹ -6,26 ²
Fonte de variação	G.L.	Ca Vagens	Ca Grãos	EUG	G.L.	EUPA	EUP
Concentração (C)	1	40,82 *	0,23 *	0,05683 *		0,00103 *	0,001261 *
Erro A	10	0,05	0,03	0,00357		0,00001	0,00004
Linhagem (L)	11	0,89 *	0,34 *	0,13037 *		0,00063 *	0,003076 *
C X L	11	1,08 *	0,07 *	0,06076 *		0,00028 *	0,001202 *
Erro B	44	0,05	0,01	0,00204		0,00001	0,000021
Média		2,56	0,92	0,21		0,02	0,041
C.V. (%)		8,74 ¹ -9,11 ²	19,77 ¹ -8,12 ²	18,18 ¹ - 21,29 ²		13,97 ¹ -11,79 ²	15,30 ¹ -11,02 ²
Fonte de variação	G.L.	EA	EUPG	G.L.	IRPG	IRPPA	IRPP
Concentração (C)	1	10339,35 *	0,000014 *	-	-	-	-
Erro A	10	1,49	0,000002	-	-	-	-
Linhagem (L)	11	50,93 *	0,000053 *	11	0,0048 *	0,0224 *	0,0337 *
C X L	11	31,19 *	0,000028 *	-	-	-	-
Erro B	44	3,14	0,000001	24	0,0002	0,0003	0,0006
Média		24,77	0,005		0,047	0,010	0,057
C.V. (%)		4,97 ¹ -7,15 ²	15,23 ¹ - 21,31 ²		21,09	17,50	24,65

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

¹ Coeficiente de variação da parcela principal. ² Coeficiente de variação da subparcela.

Tabela 3 Valores médios para a massa seca de parte aérea (MSPA, g), massa seca de vagens (MSV, g), massa seca de raízes (MSR, g), partição parte aérea/raízes (PA/R), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), número de grãos por vagem (NGV) e massa de grãos por planta (MGP, g) obtidos para 12 linhagens de feijão submetidas a duas concentrações de cálcio na solução nutritiva.

Linhagem	MSPA		MSV		MSR		PA/R	
	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca
BRS Expedito	10,4 d A	9,4 f A	4,6 f A	2,0 e B	1,5 b A	0,8 b B	10,4 d B	15,1 b A
Carioca	10,2 d B	19,5 c A	5,8 e A	6,2 c A	1,4 b A	1,4 b A	11,4 d B	18,2 a A
L 236	9,8 d B	17,3 d A	4,7 f B	5,8 c A	1,6 b A	1,2 b A	9,5 d B	20,5 a A
L 175	8,5 e B	11,3 e A	5,4 e A	3,6 d B	0,8 b A	1,1 b A	17,9 c A	13,8 c B
L 15	19,8 a B	22,5 b A	13,4 b A	9,7 b B	1,5 b A	1,6 b A	23,6 a A	20,7 a A
L 200	8,3 e B	17,6 d A	11,7 c A	6,6 c B	1,0 b A	1,2 b A	20,3 b A	21,2 a A
L 74	12,4 c A	7,7 g B	13,8 b A	2,6 e B	1,7 a A	0,9 b B	15,2 c A	12,4 c A
L 221	10,1 d B	26,3 a A	2,9 g A	3,4 d A	2,1 a A	2,1 a A	6,3 e B	14,1 c A
L 159	7,6 e B	17,2 d A	5,3 e B	9,0 b A	1,1 b B	2,3 a A	11,9 d A	11,6 c A
L 234	16,7 b A	17,1 d A	10,6 d A	6,7 c B	1,5 b A	1,4 b A	18,9 c A	17,2 b A
L 246	16,6 b A	12,4 e B	14,0 b A	6,2 c B	2,4 a A	1,1 b B	12,7 d B	16,3 b A
L 77	16,7 b B	20,4 c A	16,2 a A	10,6 a B	2,0 a A	1,4 b A	17,8 c B	22,3 a A
Média	12,25	16,56	9,03	6,04	1,54	1,37	14,65	16,94
C.V.%	8,30		10,17		13,28		17,84	
Linhagem	NVP		NGP		NGV		MGP	
	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca
BRS Expedito	8,0 d B	10,7 e A	30,7 d B	46,7 c A	3,8 c B	4,4 b A	6,58 d B	14,51 d A
Carioca	15,5 a A	15,5 b A	44,5 c B	64,0 b A	2,9 d B	4,1 c A	9,31 c B	16,56 b A
L 236	7,7 d A	9,2 f A	33,2 d B	42,7 c A	4,3 b B	4,7 b A	5,87 e B	15,29 c A
L 175	6,5 d B	7,5 g A	31,2 d B	39,8 c A	4,8 b B	5,3 a A	5,09 e B	10,54 f A
L 15	15,7 a A	10,5 e B	80,8 a A	58,8 b B	5,2 a A	5,6 a A	19,06 a A	12,79 e B
L 200	9,0 c B	21,7 a A	28,2 d B	89,3 a A	3,1 d B	4,1 c A	4,49 e B	12,61 e A
L 74	9,8 c B	13,7 c A	47,8 c B	61,3 b A	4,9 b A	4,5 b B	6,62 d B	13,62 d A
L 221	7,8 d B	12,0 d A	35,8 d B	55,0 b A	4,6 b A	4,6 b A	7,16 d B	14,12 d A
L 159	8,2 d B	10,8 e A	38,5 c B	59,2 b A	4,7 b B	5,5 a A	7,06 d B	14,98 c A
L 234	8,7 c B	13,8 c A	41,5 c B	55,7 b A	4,8 b A	4,0 c B	11,48 b B	16,11 b A
L 246	11,8 b B	16,2 b A	43,5 c B	62,7 b A	3,7 c A	3,9 c A	19,84 a A	17,17 b B
L 77	12,2 b A	12,2 d A	65,8 b A	62,8 b A	5,4 a A	5,1 a A	11,76 b B	19,28 a A
Média	10,07	12,81	43,46	58,17	4,35	4,65	9,53	14,80
C.V.%	10,49		13,05		8,35		9,43	

* Médias não seguidas pela mesma letra minúscula na coluna diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (valor-p <0,05) e maiúscula na linha, pelo teste de *t* de Student (valor-p <0,05).

Tabela 4 Valores médios para a concentração de cálcio nas folhas (Ca folhas, g kg⁻¹ de matéria seca - MS), concentração de cálcio no caule (Ca caule, g kg⁻¹ de MS), concentração de cálcio nas vagens (Ca vagens, g kg⁻¹ de MS) e concentração de cálcio nos grãos (Ca grãos, g kg⁻¹ de MS) obtidos para 12 linhagens de feijão submetidas a duas concentrações de cálcio na solução nutritiva.

Linhagem	Ca Folhas		Ca Caule		Ca Vagens		Ca grãos	
	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca
BRS Expedito	14,0b B	27,0b A	3,4d B	8,5d A	2,3a B	3,0b A	1,4a A	1,3a A
Carioca	16,9a B	26,9b A	3,2d B	9,2c A	2,5a A	3,0b A	1,0a A	1,0b A
L 236	12,5b B	23,3c A	3,8c B	6,7e A	2,2a B	3,3b A	1,1a A	0,9b A
L 175	14,4b B	27,4b A	4,1c B	10,0b A	1,4a B	2,8b A	1,1a A	1,4a A
L 15	17,6a B	23,8c A	5,5b B	8,3d A	1,9a B	2,6b A	0,6b B	1,0b A
L 200	17,2a B	26,6b A	3,3d B	8,2d A	2,0a B	4,1a A	1,1a A	0,9b A
L 74	17,3a B	26,7b A	4,0c B	11,9a A	1,6a B	3,5b A	0,7b A	0,7b A
L 221	16,3a B	28,1b A	4,8b B	5,7f A	1,5a B	5,0a A	0,7b A	0,8b A
L 159	18,0a B	30,7a A	2,7d B	7,7d A	1,7a B	2,6b A	1,2a A	1,2a A
L 234	18,5a B	27,7b A	5,2b B	10,1b A	2,1a B	3,4b A	0,5b B	1,0b A
L 246	17,6a B	28,4b A	6,9a B	8,9c A	1,1a B	3,2b A	0,6b B	0,8b A
L 77	16,2a B	24,7c A	5,2b B	9,1c A	1,3a B	3,1b A	0,6b B	0,8b A
Média	16,39	26,78	4,31	8,71	1,80	3,31	0,86	0,98
C.V.%		5,66		6,26		9,11		8,12

* Médias não seguidas pela mesma letra minúscula na coluna diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (valor-p <0,05) e maiúscula na linha, pelo teste de *t* de Student (valor-p <0,05).

Tabela 5 Valores médios para a eficiência no uso de cálcio nos grãos (EUG, $g^2 mg Ca^{-1}$), eficiência no uso de cálcio na parte aérea (EUPA, $g^2 mg^{-1}$), eficiência no uso de cálcio na planta (EUP, $g^2 mg^{-1}$), eficiência de aquisição de cálcio (EA, $g^2 mg^{-1}$), eficiência no uso de cálcio na produção de grãos (EUPG, $g^2 mg^{-1}$), índice de resposta de cálcio à produção de grãos (IRPG), índice de resposta de cálcio à produção de massa seca de parte aérea (IRPPA) e índice de resposta de cálcio à produção de massa seca pela planta (IRPP) obtidos para 12 linhagens de feijão submetidas a duas concentrações de cálcio na solução nutritiva.

Linhagem	EUG		EUPA		EUP		
	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca	
BRS Expedito	0,035 c B	0,144 c A	0,011 c B	0,003 c A	0,022 e A	0,016 d B	
Carioca	0,078 c B	0,277 b A	0,012 c B	0,016 b A	0,026 e B	0,042 b A	
L 236	0,030 c B	0,235 b A	0,012 c A	0,015 b A	0,022 e B	0,041 b A	
L 175	0,021 c B	0,079 d A	0,011 c A	0,005 c B	0,018 e A	0,015 d A	
L 15	0,637 a A	0,195 c B	0,043 a A	0,033 a B	0,105 a A	0,062 a B	
L 200	0,018 c B	0,161 c A	0,019 c A	0,014 b A	0,026 e A	0,032 c A	
L 74	0,068 c B	0,288 b A	0,030 b A	0,003 c B	0,046 d A	0,013 d B	
L 221	0,083 c B	0,257 b A	0,008 c B	0,022 a A	0,019 e B	0,047 b A	
L 159	0,046 c B	0,167 c A	0,007 c B	0,016 b A	0,017 e B	0,038 c A	
L 234	0,256 b A	0,254 b A	0,031 b A	0,014 b B	0,058 c A	0,037 c B	
L 246	0,645 a A	0,401 a B	0,036 b A	0,009 c B	0,094 b A	0,033 c B	
L 77	0,291 b B	0,425 a A	0,050 a A	0,027 a B	0,092 b A	0,068 a B	
Média	0,184	0,240	0,022	0,015	0,045	0,037	
C.V.%		21,29		11,79		11,02	
Linhagem	EA		EUPG		IRPG	IRPPA	IRPP
	Baixo Ca	Alto Ca	Baixo Ca	Alto Ca			
BRS Expedito	10,3 c B	36,7 b A	0,002 d A	0,005 c A	0,064 a	-0,032 e	0,032 d
Carioca	12,9 b B	37,1 b A	0,003 d B	0,007 b A	0,071 a	0,080 b	0,151 b
L 236	8,9 c B	27,1 d A	0,002 d B	0,006 b A	0,084 a	0,070 b	0,155 b
L 175	10,3 c B	40,1 a A	0,001 d B	0,003 d A	0,051 a	0,002 d	0,054 d
L 15	15,2 a B	29,5 d A	0,014 a A	0,005 c B	-0,052 c	0,008 d	-0,044 e
L 200	12,9 b B	36,8 b A	0,001 d B	0,004 d A	0,074 a	0,029 c	0,102 c
L 74	12,9 b B	42,5 a A	0,002 d B	0,004 c A	0,064 a	-0,148 g	-0,084 f
L 221	12,6 b B	36,3 b A	0,003 d B	0,005 c A	0,062 a	0,141 a	0,202 a
L 159	13,0 b B	41,2 a A	0,002 d B	0,005 c A	0,063 a	0,126 a	0,189 a
L 234	15,9 a B	41,0 a A	0,004 c A	0,006 c A	0,045 a	-0,042 e	0,003 d
L 246	15,9 a B	39,4 a A	0,015 a A	0,008 b B	-0,016 b	-0,101 f	-0,118 f
L 77	12,5 b B	33,1 c A	0,007 b B	0,009 a A	0,057 a	-0,017 e	0,039 d
Média	12,8	36,7	0,005	0,010	0,047	0,010	0,057
C.V.%		7,15		21,31	21,09	17,50	24,65

* Médias não seguidas pela mesma letra minúscula na coluna diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (valor-p <0,05) e maiúscula na linha, pelo teste de *t* de Student (valor-p <0,05).

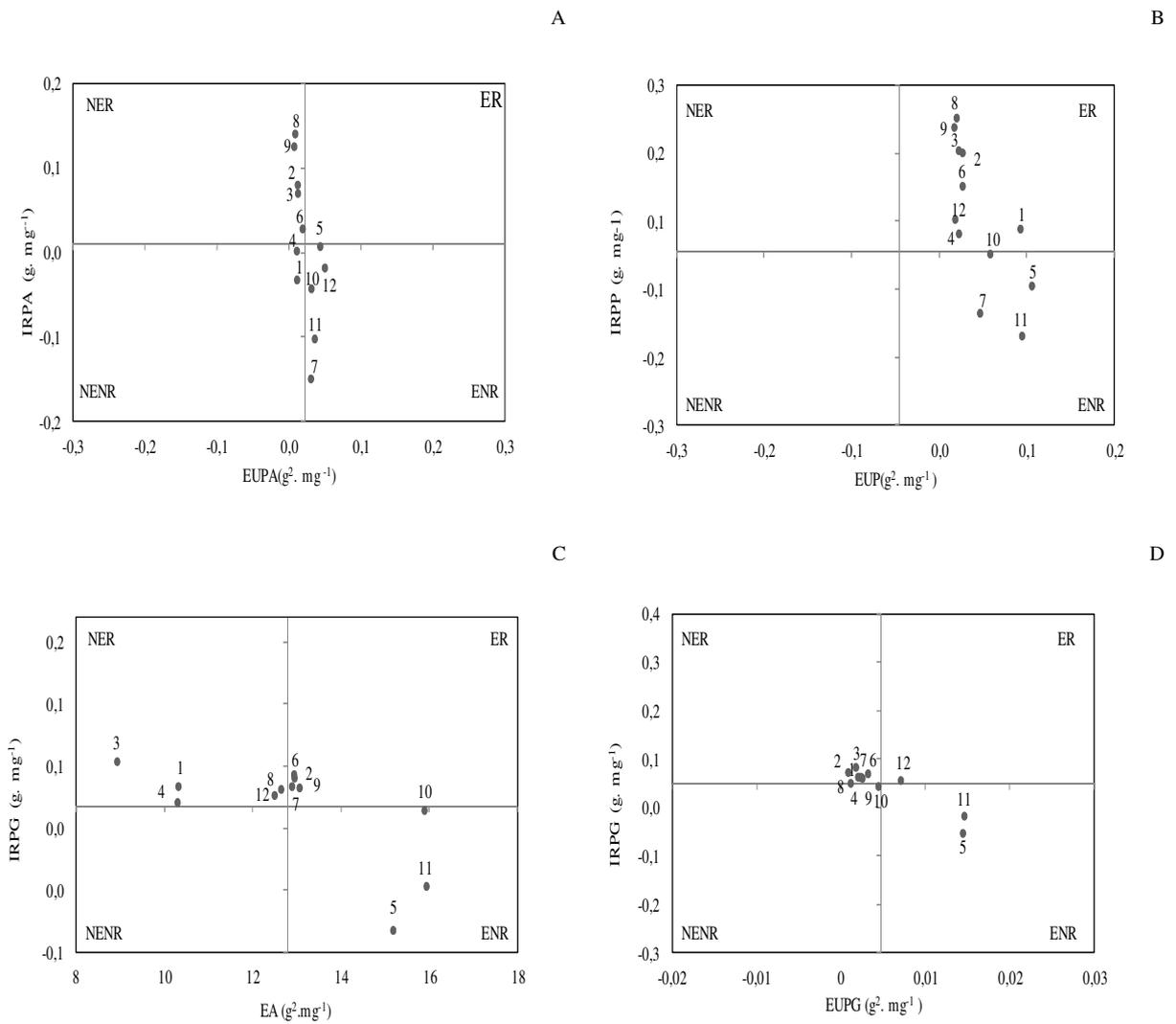


Figura 1 Classificação de 12 linhagens de feijão quanto à eficiência no uso de cálcio na parte aérea (EUPA) em relação ao índice de resposta de cálcio à produção de massa seca de parte aérea (IRPA) (A), eficiência no uso de cálcio na planta (EUP) em relação ao índice de resposta de cálcio à produção de massa seca pela planta (IRPP) (B), eficiência de aquisição de cálcio (EA) em relação ao índice de resposta de cálcio à produção de grãos (IRPG) (C) e eficiência no uso de cálcio na produção de grãos (EUPG) em relação ao índice de resposta de cálcio à produção de grãos (IRPG) (D) obtidas em baixa concentração de cálcio em solução nutritiva.

ER: eficiente e responsivo; NER: não eficiente e responsivo; NENR: não eficiente e não responsivo; e ENR: eficiente e não responsivo.

1- BRS Expedito; 2- Carioca; 3- L 236; 4- L 175; 5- L 15; 6- L 200; 7- L 74; 8- L 221; 9- L 159; 10- L 234; 11- L 246; e 12- L 77.

DISCUSSÃO

Com base nos três estudos realizados pode-se observar que, de maneira geral, as cultivares e as linhagens de feijão empregadas respondem positivamente ao aumento da concentração de cálcio disponibilizada na solução nutritiva quanto à produção de massa seca das frações da planta (caule, folhas, parte aérea, raízes e vagens), componentes da produtividade de grãos e concentração de cálcio nos tecidos. Nos dois primeiros experimentos em que foram empregados tratamentos quantitativos (diferentes concentrações de cálcio na solução nutritiva), foi possível observar que, para a maioria das variáveis, não houve interação significativa entre as diferentes concentrações de cálcio na solução nutritiva e as cultivares de feijão, indicando uma mesma tendência de comportamento para as cultivares empregadas nas diferentes disponibilidades de cálcio. Já, no terceiro experimento, em que foram testadas 12 linhagens em duas condições de concentração de cálcio na solução, se observou interação significativa concentração de cálcio x linhagens para todas as variáveis.

Os parâmetros relacionados à massa seca das frações de planta puderam ser mais discriminados no segundo experimento, com maiores concentrações de cálcio na solução nutritiva. No primeiro experimento, quando se trabalhou com concentrações de cálcio de até $3,30 \text{ mmol L}^{-1}$, nenhum modelo linear foi significativo pela análise de regressão para as variáveis relacionadas à massa seca de planta em uma única coleta realizada na floração. Já, no segundo experimento, em que foram realizadas diversas coletas durante o ciclo da cultura, pode-se observar uma resposta crescente significativa de primeiro e de segundo grau para a massa seca de parte aérea em R6 e em R8, indicando o aumento da massa seca com o aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva. Para a massa seca de parte aérea em R6, em que o segundo grau foi significativo pela análise de regressão, foi observado ponto de máxima com valor de $3,68 \text{ mmol L}^{-1}$ valor próximo ao empregado para alta concentração de cálcio no terceiro experimento ($3,85 \text{ mmol L}^{-1}$) em que para a maioria das linhagens houve maior desenvolvimento de parte aérea das plantas quando avaliadas em R8.

No segundo experimento, a massa seca de parte aérea em R8 apresentou somente primeiro grau significativo pela análise de regressão, ou seja, um aumento linear da massa seca de parte aérea com o aumento na concentração de cálcio. Souza Júnior; Nascimento; Martinez (1998); Favaro et al. (2007); Silva; Moraes; Souza (2011), avaliando a resposta de feijão comum e de feijão vagem à aplicação de cálcio na solução nutritiva constataram,

também, resposta linear para a massa seca de parte aérea, porém trabalhando com concentrações menores de cálcio na solução (2,48; 2,79 e 0,46, respectivamente) e em experimentos de duração máxima de 45 dias. Dessa forma, em avaliações mais tardias, como as realizadas no segundo experimento, pode-se confirmar a tendência da responsividade das plantas do gênero *Phaseolus* a disponibilidade de cálcio na solução nutritiva quanto ao aporte de massa seca de parte aérea.

No caso do segundo experimento em que foi avaliada a massa seca das frações da planta em diversos estádios fenológicos, foi possível detectar uma maior diferenciação das cultivares de feijão nas avaliações no final do ciclo, mais precisamente em R8, sendo que em V4 as cultivares não diferiram significativamente quanto a resposta a disponibilidade de cálcio em solução nutritiva. Esses resultados concordam com o observado em R6 para o primeiro experimento, ou seja, nos estádios iniciais a um menor grau de resposta a aplicação de cálcio, sendo uma maior distinção possível nos estádios finais do ciclo da cultura, o que indica uma maior influência do cálcio nos caracteres reprodutivos das plantas de feijão.

A massa seca de raízes apresentou respostas antagônicas no segundo e no terceiro experimentos. No segundo experimento, em que foram avaliadas concentrações de cálcio em solução nutritiva, houve maior desenvolvimento do sistema radicular com o aumento da concentração de cálcio até a concentração de 4,95 mmol L⁻¹ em R6. No terceiro experimento, por sua vez, quando avaliadas condições contrastantes de disponibilidade de cálcio na solução nutritiva, houve maior paridade do desenvolvimento radicular, sendo que em oito, das doze linhagens testadas, não houve diferença significativa entre as concentrações de cálcio na solução nutritiva.

O maior desenvolvimento radicular em plantas no segundo experimento concorda com o observado por Souza Júnior; Nascimento; Martinez (1998); Favaro et al. (2007); Silva; Moraes; Souza (2011) e, também, pode estar relacionado à maior demanda por água pelas plantas devido ao maior desenvolvimento de parte aérea agregado ao fato desse experimento ser realizado na primavera, período de temperaturas mais elevadas, o que proporciona maior transpiração pelas plantas se comparado ao período de outono em que foi realizado o terceiro experimento.

Quando se trabalhou com concentrações de cálcio de até 3,30 mmol L⁻¹, pode-se observar uma maior discriminação dos níveis de cálcio empregados para os componentes da produtividade de grãos, sendo que para o número de vagens por planta, o número de grãos por planta e a massa de grãos por planta, o primeiro grau foi significativo pela análise de

regressão, ou seja, com o aumento da disponibilidade de cálcio na solução nutritiva ocorreu acréscimo desses componentes da produtividade de grãos até a concentração de 3,30 mmol L⁻¹.

Em maiores concentrações de cálcio em solução nutritiva, foi possível observar a tendência de resposta linear para os componentes da produtividade de grãos somente para a massa de grãos por planta, indicando, que para essa variável, ocorre o aumento linear com o aporte na disponibilidade de cálcio em solução nutritiva até a concentração de 4,95 mmol L⁻¹. O aumento linear observado para a massa de grãos por planta se constitui em uma resposta positiva observada nesse estudo, indicando que para essa importante variável diretamente relacionada com a produtividade de grãos, o aumento da disponibilidade de cálcio proporciona o aumento da massa de grãos e, em última análise, em ganho de produtividade de grãos.

Quando contrastaram duas condições de disponibilidade de cálcio na solução nutritiva (baixa e alta concentração), pode-se observar, também, que para os componentes da produtividade de grãos houve maiores médias de número de vagens por planta, número de grãos por planta, número de grãos por vagem e massa de grãos quando as linhagens foram submetidas à alta concentração de cálcio na solução nutritiva, exceto para as linhagens eficientes no uso de cálcio que se destacaram justamente por apresentarem desempenho significativamente superior em baixa disponibilidade de cálcio na solução nutritiva.

O comportamento das cultivares nos três experimentos possibilitou analisar as diferenças entre as cultivares comuns nos três experimentos. Enquanto que no primeiro experimento as cultivares BRS Exedito e Carioca, diferiram significativamente somente para a massa de grãos e no segundo experimento somente para massa de vagens em R8; no terceiro experimento, as cultivares diferiram significativamente para todas as variáveis, exceto para massa seca de parte aérea e massa seca de raízes em R8.

Para massa de grãos por planta, em que houve diferença significativa no primeiro e no terceiro experimentos, a cultivar Carioca apresentou desempenho significativamente superior em ambos os casos, sendo significativamente superior no terceiro experimento para os componentes da produtividade de grãos: número de vagens por planta e número de grãos por planta. Para o número de vagens por planta, a cultivar BRS Exedito foi superior em ambos os experimentos. Esses resultados indicam que a cultivar Carioca apresenta maior potencial produtivo quando cultivada na solução nutritiva, ou seja, seria mais produtiva em condições nutricionais mais equilibradas, com fornecimento adequado de todos os nutrientes.

Para a concentração de cálcio nos tecidos houve nos três experimentos a tendência de maiores concentrações de cálcio nas folhas, caules, vagens e grãos nas maiores concentrações de cálcio em solução nutritiva. Em todos os três experimentos realizados a maior concentração de cálcio foi observada nas folhas, seguido pelos caules, vagens e grãos. A maior concentração de cálcio nas folhas está relacionado ao fato do cálcio ser transportado pelo xilema via fluxo de massa, juntamente com a corrente transpiratória (GILLIHAM et al., 2011), sendo pouco móvel no floema e com baixa remobilização nos tecidos (FROSSARD et al., 2000).

Maiores concentrações de cálcio nas folhas, também, foram observadas para a alta concentração de cálcio na solução nutritiva no terceiro experimento, diferindo significativamente da baixa concentração para todas as linhagens com diferença de concentração de cálcio nas folhas superior a 50% para todas as linhagens entre alta e baixa disponibilidade de cálcio na solução nutritiva. Essa magnitude de diferença observada para a concentração de cálcio nas folhas, também, foi observada para a concentração nos caules no terceiro experimento e somada à pequena variação da concentração observada para as vagens e grãos, auxiliam na compreensão dos índices de eficiência no uso de cálcio.

As linhagens diferiram quanto aos índices de eficiência de maneira análoga aos seus comportamentos para massa seca de parte aérea e massa de grãos devido à responsividade de concentração de cálcio nas folhas e caule em relação à disponibilidade de cálcio. Dessa forma, as diferenças quanto à eficiência no uso do cálcio observada para as linhagens entre a alta e a baixa concentração na solução se devem as diferenças observadas para os caracteres da produção nessas condições e não devido à concentração de cálcio nos tecidos, uma vez que, a concentração de cálcio nos tecidos manteve a mesma tendência de comportamento para todas as linhagens. Esse fato pode ser observado pelo índice de eficiência de aquisição, que relaciona a quantidade de cálcio disponibilizada com a quantidade de cálcio nos tecidos, onde todas as linhagens foram significativamente superiores na alta concentração de cálcio na solução nutritiva.

A alta concentração de cálcio nas folhas observada nos três experimentos, sendo que no caso do segundo experimento a concentração de cálcio nas folhas em R8 foi 21 vezes maior a observada nos grãos, levanta a questão da possibilidade de consumo das folhas na alimentação humana, como é realizada na África (LAMB et al., 1985). Porém, a viabilidade do consumo das folhas de feijão deve estar atrelado, também, as formas de preparo e a

palatabilidade das folhas, sendo necessários estudos de análise sensorial para possibilidade de uso das folhas em dietas humanas.

A concentração de cálcio nos grãos apresentou primeiro grau significativo nos dois primeiros experimentos, porém a variação na concentração foi pequena em relação à variação na concentração de cálcio disponibilizada na solução nutritiva. Essa pequena variação ficou mais evidenciada no terceiro experimento em que houve pequena variação na concentração de cálcio nos grãos entre a alta e a baixa concentração de cálcio na solução nutritiva, em que somente quatro linhagens diferiram significativamente entre os níveis de concentração de cálcio na solução. A pequena variação observada para grãos nesse estudo concorda com o observado para vagens imaturas feijão vagem por Miglioranza et al. (1997); Quintana et al. (1999). Dessa forma, a adição de cálcio via fertilização é um processo pouco eficiente para o aporte da concentração de cálcio em grãos de feijão.

A absorção e a assimilação do cálcio é diretamente influenciada pela concentração de íons como o potássio e magnésio (MARSCHNER, 1995), sendo a adequação dessa relação e o monitoramento da interferência desses minerais nos tecidos fundamentais em estudos relacionados à nutrição de plantas. Nesse estudo, os resultados obtidos no segundo experimento mostraram que a correta adequação da solução proposta por Furlani; Fernandes; Junior (2004), baseado no equilíbrio iônico das soluções, proporcionou o estudo das alterações das concentrações de cálcio com a manutenção, praticamente inalterada das concentrações de potássio e de magnésio com concentração de cálcio na solução até $4,95 \text{ mmol L}^{-1}$.

A análise de correlação possibilitou estabelecer avaliar as associações dos diferentes caracteres estudados no primeiro experimento, com a finalidade de avaliar a possibilidade de seleção indireta para massa de grãos e concentração de cálcio nos grãos. Pela análise de correlação pode-se verificar um elevado grau de associação entre os caracteres com associações positivas, significativas e de elevada magnitude para a maioria dos pares de caracteres, exceto para concentração de cálcio nas folhas que apresentou nenhuma associação significativa. Esse padrão de associação indica que caracteres relacionados a massa seca podem ser utilizados na seleção indireta para massa de grãos e concentração de cálcio nos grãos, porém esses resultados discordam dos observados a campo para associação entre concentração de cálcio e massa de grãos, sendo necessário um maior detalhamento dessas associações para a possibilidade de seleção indireta para essas características.

O estudo realizado quanto à resposta de cultivares de feijão a diferentes concentrações de cálcio na solução nutritiva e quanto à variabilidade genética para eficiência no uso e resposta à aplicação de cálcio na solução nutritiva auxiliou a elucidar diversos pontos relativos à influência da nutrição de cálcio em plantas de feijão. Cabe resaltar que esse estudo traz informações inéditas a respeito da nutrição de cálcio uma vez que foi realizado em condições controladas quanto às concentrações de cálcio e sem interferência do alumínio e com equilíbrio das cargas na solução nutritiva disponibilizada para as plantas. Dessa forma as inferências a respeito da interferência do cálcio para a cultura são fidedignas e referentes somente ao papel do cálcio nas plantas, uma vez que são controladas as condições de neutralidade da solução e do equilíbrio das cargas.

Outro ponto a salientar é o caráter inédito da avaliação das plantas durante todo o ciclo da cultura também fornece várias informações a respeito da interferência da nutrição de cálcio principalmente no que tange aos caracteres produtivos da cultura, e que pelos resultados obtidos quanto ao número de vagens e grãos por planta, indicam serem fortemente influenciados pela nutrição de cálcio. Entretanto, todas as informações obtidas quanto à resposta de cultivares de feijão quanto à nutrição de cálcio e quanto ao comportamento de linhagens visando à seleção de linhagens com eficiência no uso de cálcio necessitam de comprovação através de experimentos a campo o que credencia essas linhagens a serem submetidas ao processo de registro e disponibilizadas futuramente pelos produtores.

CONCLUSÕES

As cultivares de feijão apresentam resposta linear positiva para número de vagens por planta, número de grãos por planta, massa de grãos na maturação até a concentração de 3,30 mmol L⁻¹ de cálcio em solução nutritiva.

As cultivares de feijão apresentam os maiores valores de massa seca de parte aérea na floração e no estágio de enchimento de vagens, de massa seca de raízes na floração e de massa de grãos na maturação com 4,95 mmol L⁻¹ de cálcio em solução nutritiva.

As cultivares de feijão acumulam maior quantidade de cálcio nas folhas, seguido pelos caules, vagens e grãos.

Maior acúmulo de cálcio nas folhas no estágio de enchimento de vagens e nos grãos em maturação é obtido na concentração de 4,95 mmol L⁻¹ de cálcio em solução nutritiva.

A concentração de cálcio nas folhas de feijão no estágio de enchimento de vagens é 21 vezes superior ao valor obtido nos grãos maduros de feijão na concentração de 4,95 mmol L⁻¹ de cálcio em solução nutritiva.

O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva até a concentração de 4,95 mmol L⁻¹ não altera a absorção e o acúmulo de potássio e de magnésio nas folhas e nos grãos de feijão.

As linhagens de feijão apresentam variabilidade genética em baixa e em alta concentração de cálcio no ambiente e apresentaram resposta diferenciada para os caracteres de produção e para o acúmulo de cálcio nos tecidos.

As linhagens L 246 e L 15 são eficientes no uso de cálcio na planta, na aquisição de cálcio e na produção de grãos, e não são responsivas à aplicação de cálcio em solução nutritiva.

A linhagem L 77 é eficiente no uso de cálcio na planta e na produção de grãos e é responsiva à aplicação de cálcio em solução nutritiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BULISANI, E. A. **Feijão: fatores de produção e qualidade**, Campinas: Fundação Cargill, 1987, 326p.

CAINES, A. M.; SHENNAN, C. Growth and nutrient composition of Ca²⁺ use efficient and Ca²⁺ use inefficient genotypes of tomato **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 37, n. 7, p. 559-567, Aug. 1999.

DODD, A. N.; KUDLA J.; SANDERS, D. The language of calcium signaling. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 61, p. 593–620, June. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. Sistemas de produção 2. Brasília, jan, 2003. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/CultivodoFeijoeiro/importancia.htm>. Acesso em 14 de dez. 2012.

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

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; MOREIRA, A.; PORTES, T. A. 'Dry bean genotypes evaluation for growth, yield components and phosphorus use efficiency', **Journal of Plant Nutrition**, Athens , v. 33, n. 14, p. 2167-2181, Oct. 2010.

FAVARO, S.P. et al., Rates of calcium, yield and quality of snap bean. **Scientia Agricola**, Piracicaba. v. 64, n. 6, p. 616-620, nov-dez. 2007.

FURLANI, P. R.; FERNANDEZ JÚNIOR, F. Cultivo hidropônico de morango em ambiente protegido. In: CORRÊA ANTUNEZ, L. E. et al. (Ed.). SIMPÓSIO NACIONAL DO MORANGO & ENCONTRO DE PEQUENAS FRUTAS E FRUTAS NATIVAS DO MERCOSUL, 2., 2004, Pelotas, RS. **Anais...** Pelotas: EMBRAPA, 2004. p. 102-115. (Documentos 124).

FROSSARD, E.; et al. Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 80, n. 7, p. 861-879, May. 2000.

GILLIHAM, M. et al., Calcium delivery and storage in plant leaves: exploring the link with water flow. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 62 n. 7, p. 2233–2250, Mar. 2011.

GOOD, A. G.; SHRAWAT, A. K.; MUENCH, D. G. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? **Trends in Plant Science**, London, v. 9, p. 597–605, Dec. 2004.

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, jan-fev. 2009.

LAMB, E. M. et al., Survey of bean genotypes grown in Rwanda. **Annual Report of the Bean Improvement Cooperative**, Geneva, v. 28, p. 17-18, 1985.

LI, Y. M.; GABELMAN, W. H. Inheritance of Calcium Use Efficiency in Tomatoes Grown under Low-calcium Stress. **Journal of American Society of Horticulture Science**, Alexandria, v. 115, n. 5, p. 835-838, Sept. 1990.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**, London: Academic Press, 1995. 889 p.

MIGLIORANZA, E. et al. Comparison of soil and genotypic effects of calcium concentration of snap beans pods. **Hortscience**, St. Joseph, v. 32, n. 1, p. 68-70, Feb. 1997.

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, jul.-ago. 2007.

OLDROYD, G. E. D, DOWNIE, J. A. Coordinating nodule morphogenesis with rhizobial infection in legumes. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 59 n. 5, p. 19–46, June. 2008.

QUINTANA, J. M. et al. Calcium fertilizers fail to affect pod calcium concentration and yield of four snap bean cultivars. **HortScience**, St. Joseph, v. 34, n. 4, p. 646-647, July. 1999.

RIBEIRO, N. D. et al. Composição de aminoácidos de cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1393-1399, out. 2007.

- RIBEIRO, N. D. et al. Composição de microminerais em cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 2, p. 267-273, abr-jun. 2008.
- SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K. Manejo do nitrogênio para eficiência de uso por cultivares de feijoeiro em várzea tropical. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 9, p. 1237-1248, set. 2007.
- SATHE, S. K. et al. Dry beans of Phaseolus. A review, Part 2. Chemical composition: carbohydrates, fiber, minerals, vitamins and lipids. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Arnherst, v. 21, n. 2, p. 41-93, Jan. 1984.
- SILVA, S. A.; MORAES, W. B.; SOUZA, G. S. Doses de cálcio no crescimento do feijoeiro cultivado em solução nutritiva, na presença de alumínio. **Idesia**, Arica, v. 29, n. 3, p. 53-58, sept- dic. 2011.
- SOUZA, S. A. et al., Eficiência e resposta à aplicação de nitrogênio de genótipos de feijão comum cultivados em várzea tropical do Estado do Tocantins. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Palmas, v. 3, n. 3, p. 31-37, Aug. 2012.
- SOUZA JUNIOR, J. O; NASCIMENTO, C. W. A.; MARTINEZ. H. E. P. Resposta do feijoeiro cultivado em solução nutritiva a níveis de cálcio e magnésio na presença de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 7, p. 1143-1148, jul. 1998.
- SPEHAR, C. R.; GAWEY, N. W. Screening soya beans [*Glycine max* (L.) Merrill] for calcium efficiency by root growth in low-Ca nutrient solution. **Euphytica**, Wageningen v. 94, n. 1, p. 113-117, Jan. 1997.
- STEVENS, M. A. Varietal influence on nutritional value. In: WHITE, P. L.; SELVEY, N. (Ed.). **Nutritional quality of fresh and vegetables**. New York: Futura Publishing, 1974. p. 87-110.
- TALUKDER, Z. I. et al., Genetic diversity and selection of genotypes to enhance Zn and Fe content in common bean. **Canadian Journal of Plant Science**, Otowa, v. 90, n. 1, p. 49-60, Feb.2010.
- TOMAZ, M. A. et al., Eficiência de absorção, translocação e uso de cálcio, magnésio e enxofre por mudas enxertadas de *Coffea arabica*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 885-892, set-out.2003.