

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ABSORÇÃO E MOBILIDADE FLOEMÁTICA DE BORO (<sup>10</sup>B)  
EM CAUPI**

**Sylvia Leticia Oliveira Silva**

Engenheira Agrônoma

2016

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ABSORÇÃO E MOBILIDADE FLOEMÁTICA DE BORO (<sup>10</sup>B)  
EM CAUPI**

**Sylvia Leticia Oliveira Silva**

**Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado**

**Co-orientador: Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu Júnior**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal).

**2016**

S586a Silva, Sylvia Leticia Oliveira  
Absorção e mobilidade floemática do boro (<sup>10</sup>B) em caupi / Sylvia Leticia Oliveira Silva. -- Jaboticabal, 2016  
xvi, 59 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2016

Orientador: Renato de Mello Prado

Banca examinadora: Fábio Olivieri de Nóbile, Aguinaldo José Freitas Leal, Priscila Lupino Gratão, Mara Cristina Pessoa da Cruz  
Bibliografia

1. *Vigna unguiculata*. 2. Boro. 3. Deficiência nutricional. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.811:633.35

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal




**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: ABSORÇÃO E MOBILIDADE FLOEMÁTICA DE BORO (10B) EM CAUPI

**AUTORA: SYLVIA LETICIA OLIVEIRA SILVA**  
**ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO**  
**CO-ORIENTADOR: CÁSSIO HAMILTON ABREU JUNIOR**

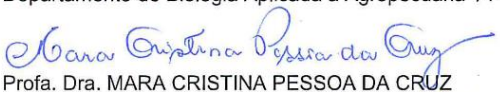
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. FÁBIO OLIVIERI DE NOBILE  
Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos / UNIFEB - Barretos

  
Prof. Dr. AGUINALDO JOSÉ FREITAS LEAL  
Agronomia / Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM - Câmpus Iturama/MG

  
Profª. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO  
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Profª. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 12 de agosto de 2016

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**SYLVIA LETICIA OLIVEIRA SILVA**, nascida em São Luís–MA, Brasil em 17 de abril de 1983, filha de Fleurismar de Maria Oliveira Silva e Antônio José Neres Silva. Possui graduação em Engenharia Agrônômica (2007) e mestrado em Agroecologia (2010), ambos pela Universidade Estadual do Maranhão, Câmpus São Luís. Em 2010 se tornou professora efetiva do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão–IFMA. Em agosto de 2013, iniciou o curso de doutorado pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Câmpus de Jaboticabal, SP com período sanduíche na Universidade Pública de Navarra, em Pamplona, Espanha. Membro do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da UNESP–GENPLANT atua na área de Nutrição de plantas e bolsista do Programa de Qualificação do Servidor (IFMA/PROQUALIS).

*“O coração humano projeta o caminho, mas é o  
Senhor quem dirige os passos”.*  
(Provérbios 16,9).

*Aos meus amados pais Neres e Fleures.  
Pelo incentivo e apoio ao longo desses anos.  
Ao meu esposo João Firminiano da Conceição Filho.*

**OFEREÇO E DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, por estar sempre me guiando nas minhas escolhas e por torná-las realidade.

Ao meu orientador, professor Dr. Renato de Mello Prado, por acreditar e confiar no meu potencial, e pela orientação e ensinamentos durante esse período.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu Júnior, pela orientação, ensinamentos e apoio do início ao fim deste trabalho.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade concedida para a realização do curso de Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal).

A todos os professores dos Programas de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal e Ciência do Solo) da UNESP de Jaboticabal.

Aos professores membros da banca Dr. Fábio Olivieri de Nóbile, Dr. Aguinaldo José Freitas Leal; Dr. Priscila Lupino Gratão e Dr. Mara Cristina Pessôa da Cruz pela contribuição e ensinamentos proporcionados na defesa deste trabalho.

A todos os funcionários do Departamento de Solos e Adubos, em especial a Cláudia, Djair, Célia e Maria Inês.

A Tavani Rocha Camargo e Mônica Lanzoni Rossi pelas análises microscópicas ultraestruturais.

Ao Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas Professor Eurípedes Malavolta, CENA/USP, de Piracicaba, SP, por possibilitar as análises isotópicas do  $^{10}\text{B}$  por ICP-MS.

Ao Instituto Federal do Maranhão (IFMA), pela concessão do meu afastamento e pela bolsa de estudo concedida.

Aos meus pais Antônio José Neres Silva e Fleurismar de Maria Oliveira Silva, por todo o apoio, incentivo e carinho e por fazer parte da minha vida.

Ao meu grande amigo, companheiro e esposo, João Firminiano da Conceição Filho, por todo apoio, incentivo e compreensão para que meus objetivos fossem alcançados.

Aos meus irmãos Alan Jones Soares Silva, Cleiton Oliveira Silva, Diego Oliveira Silva, Mirian Zima Oliveira Silva e Grazielle Oliveira Silva pelos momentos de



alegria.

A todos os colegas do GENPLANT, pela amizade e ajuda na condução do experimento, em especial, Gabriel Barbosa da Silva Júnior, Gilmara Pereira da Silva, Leonildes Castellane, Cid Campos, Luiz Cláudio Mancha, Rafael Barreto, Cláudio Barreto e Leandro Moda.

Aos meus grandes amigos, o casal Edwin Gutierrez e Flor Chacaltana, Thaís Barros, Ana Paula Prado, Gilmara, Luma, Larissa Bonevaes e Thais Natália Britto, pela amizade, pelos maravilhosos momentos de convívio, aprendizado e incentivo.

A todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## SUMÁRIO

	Página
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>RESUMO</b> .....	xv
<b>ABSTRACT</b> .....	xvi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	4
2.1 A cultura do feijão-caupi .....	4
2.2 Importância do boro na nutrição de plantas .....	5
2.3 Respostas das fabáceas ao B .....	6
2.4 Absorção, transporte e redistribuição do boro .....	8
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	11
3.1 Localização dos experimentos .....	11
3.2 Descrição dos experimentos .....	11
3.2.1 Experimento I – Omissão de boro em plantas de caupi .....	11
3.2.2 Experimento II – Concentrações de boro via foliar, no desenvolvimento e teor de B em plantas de caupi .....	14
3.2.2.1 Adubação foliar .....	15
3.2.2.2 Preparo das amostras .....	17
3.2.2.3 Análise Estatística .....	17
3.2.3 Experimento III - Absorção foliar e radicular de B .....	18
3.2.3.1 Metodologias para análises químicas .....	21
3.2.3.2 Análise isotópica .....	22
3.2.3.3 Cálculo da % B <sub>ppf</sub> .....	22
3.2.3.4 Análise estatística .....	23
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	24
4.1 Experimento I – Omissão de boro em plantas de caupi .....	24
4.2 Experimento II – Concentrações de boro, via foliar, no desenvolvimento e teor de B em plantas de caupi .....	29
4.3 Experimento III – Redistribuição do <sup>10</sup> B absorvido por folhas e raízes em	

plantas de feijão-caupi .....	34
4.3.1 Efeito dos tratamentos no crescimento e na produção de massa seca ....	34
4.3.2 Teor de boro nas folhas novas .....	36
4.3.3 Concentração de B total e mobilidade .....	37
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	42
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	43
<b>APÊNDICES</b> .....	54
Apêndice A.....	55
Apêndice B.....	56
Apêndice C .....	57
Apêndice D .....	58
Apêndice E.....	59

**LISTA DE TABELAS**

	<b>Página</b>
<b>Tabela 1</b> – Acúmulo de B na raiz (ACR), no caule e vagens (ACCV), nas folhas (ACF), nos grãos (ACG) e eficiência de absorção (EA) e eficiência de utilização (EU) de B em feijão-caupi em função da ausência e da presença de B na solução nutritiva. Jaboticabal, SP, Brasil, 2014 .....	24
<b>Tabela 2</b> – Área foliar (AF); Comprimento da raiz (CR); Área da raiz (AR); Densidade da raiz (DR); Massa seca da raiz (MSR); Massa seca do caule e das vagens (MSCV); Massa seca das folhas (MSF); Produtividade (Prod.) e Índice de colheita (IC) do feijão-caupi, em função da ausência e da presença de B na solução nutritiva. Jaboticabal, SP, Brasil, 2014.....	25
<b>Tabela 3</b> – Altura (ALT), área foliar (AF), densidade da raiz (DR), massa seca das folhas que receberam aplicação foliar (FRAF), das folhas novas emergidas após aplicação foliar (folha nova), caule, parte aérea, raiz e da planta inteira, em função da aplicação de boro nas plantas de caupi .....	35
<b>Tabela 4</b> – Teores médios de B nas folhas novas de caupi e porcentagem de <sup>10</sup> B na planta proveniente do fertilizante.....	36

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1</b> – Valores médios semanais de temperatura do ar (a) e umidade relativa do ar (b), dentro da casa de vegetação, durante a execução do experimento. Jaboticabal, SP .....	12
<b>Figura 2</b> – Valores de temperaturas máxima, mínima do ar e umidade relativa do ar na casa de vegetação, durante o desenvolvimento do experimento. Jaboticabal, SP, 2014 .....	16
<b>Figura 3</b> – Adubação via substrato (A) e via foliar (B) na cultura do caupi .....	19
<b>Figura 4</b> – Valores de temperaturas máxima, mínima do ar e umidade relativa do ar na casa de vegetação, durante o desenvolvimento do experimento. Jaboticabal, SP, 2015 .....	20
<b>Figura 5</b> – Plantas de feijão-caupi cultivada em solução nutritiva na ausência de B (a, b, c) e na presença (+B) e na ausência (-B) de boro nas raízes (d), nas folhas (e), nos grãos e nas vagens por planta (f) .....	26
<b>Figura 6</b> – Ultraestrutura do mesófilo foliar de plantas de feijão-caupi na presença de boro (+B) (a, c, e) e na ausência de boro (-B) (b, d, f). cl: cloroplasto; ga: grão de amido; ve: vesícula; lm: lamela média. Setas indicam corpos lipídicos. Barras: a-d= 2µm; e-f= 500 nm .....	27
<b>Figura 7</b> – Massa seca da planta das raízes (A) e massa seca da parte aérea (B) em função da concentração de boro, na solução aplicada via foliar, em caupi. Jaboticabal-SP, Brasil, 2014. DMS: Diferença Mínima Significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade .....	29

**Figura 8** – Teor foliar de boro (A), acúmulo de B nas raízes (B), na parte aérea (C), nos grãos (D) e eficiência de utilização (E) em função da concentração de boro, aplicada via foliar em feijão-caupi. \*\*Significativo a 1% de probabilidade, <sup>ns</sup>Não significativo pelo teste F. DMS: Diferença Mínima Significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....30

**Figura 9** – Produção de grãos (A) e índice de colheita (B), em função da concentração de boro, aplicada via foliar em feijão-caupi. Jaboticabal-SP, Brasil, 2014. \*\*Significativo a 1% de probabilidade, <sup>ns</sup>Não significativo pelo teste F. DMS: Diferença Mínima Significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade .....32

**Figura 10** – Concentração total de boro na raiz, caule, parte aplicada e folhas novas nos diferentes tratamentos.  $S_0F_0$  = sem B no substrato, sem adubação foliar;  $S_0F^{10}B$  = sem B no substrato, com adubação foliar  $^{10}B$ ;  $SBF^{10}B$  = com B no substrato, com adubação foliar  $^{10}B$ ;  $S^{10}BF_0$  = com  $^{10}B$  no substrato, sem adubação foliar .....38

**Figura 11** – Distribuição do B acumulado nos diferentes órgãos do feijão-caupi em função da aplicação dos tratamentos ( $S_0F_0$  = sem B no substrato, sem adubação foliar;  $S_0F^{10}B$  = sem B no substrato, com adubação foliar  $^{10}B$ ;  $SBF^{10}B$  = com B no substrato, com adubação foliar  $^{10}B$ ;  $S^{10}BF_0$  = com  $^{10}B$  no substrato, sem adubação foliar) .....39

**Figura 12** – Percentual de boro na planta proveniente do fertilizante na raiz, caule, parte aplicada e folhas novas nos diferentes tratamentos.  $S_0F_0$  = sem B no substrato, sem adubação foliar;  $S_0F^{10}B$  = sem B no substrato, com adubação foliar  $^{10}B$ ;  $SBF^{10}B$  = com B no substrato, com adubação foliar  $^{10}B$ ;  $S^{10}BF_0$  = com  $^{10}B$  no substrato, sem adubação foliar.....40

## ABSORÇÃO E MOBILIDADE FLOEMÁTICA DE BORO ( $^{10}\text{B}$ ) EM CAUPI

**RESUMO** – A deficiência de boro pode afetar a eficiência nutricional e o crescimento vegetativo e reprodutivo, induzindo alterações celulares no feijão-caupi. A eficiência do fornecimento do B via foliar, na cultura pode depender da concentração adequada do micronutriente na calda de pulverização, e se associado ao sorbitol poderia potencializar a sua absorção e crescimento. Propôs-se avaliar os efeitos da deficiência de boro na planta e da adubação foliar com boro na ausência e na presença de sorbitol no crescimento e no acúmulo de boro na planta, na produção e sua mobilidade no feijão-caupi. No estudo foram realizados três ensaios no período de fevereiro/ 2014 a maio/2015. No experimento I, empregaram-se dois tratamentos com solução nutritiva sob ausência (-B) e presença de boro (+B) em dez repetições. No experimento II utilizou-se esquema fatorial 5x2, sendo cinco concentrações de B (0; 1,25; 2,5; 3,75 e 5,0 g L<sup>-1</sup> de B), via foliar, na forma de ácido bórico, na ausência ou na presença de sorbitol (500 mmol L<sup>-1</sup>), com quatro repetições. No experimento III estudou-se a mobilidade do boro marcado ( $^{10}\text{B}$ ) absorvido pelas raízes e pelas folhas. Avaliaram-se os sintomas de deficiência de boro, o crescimento da raiz, a massa seca dos órgãos da planta e o teor de B e a produção de grãos. A deficiência de boro em plantas de feijão-caupi diminuiu a eficiência de absorção de B, embora tenha aumentado a eficiência de uso do nutriente, mas os maiores prejuízos ocorreram nas variáveis reprodutivas e no crescimento da raiz em relação à produção de folhas e caule. A deficiência de boro em plantas de feijão-caupi diminuiu a eficiência de absorção de B, embora aumente a eficiência de uso do nutriente. Os maiores prejuízos ocorrem nas variáveis reprodutivas e no crescimento da raiz em relação à produção de folhas e caule. A deficiência de boro induz alterações celulares como espessamento na lamela média e acúmulo de amido nos cloroplastos foliares que reflete nos sintomas visuais característicos para o feijão-caupi. A maior produção de grãos de caupi (90 – 100% da produção máxima) ocorre quando o B foi pulverizado a 2,62 g L<sup>-1</sup> de B, sem sorbitol, tendo como fonte o ácido bórico, nas épocas V6, R1 e R2 e teor foliar de 35 mg kg<sup>-1</sup> de B. A adubação foliar com boro, associada com sorbitol, incrementou a absorção do micronutriente na parte vegetativa, mas não refletiu na produção do feijão-caupi. Há mobilidade de boro aplicado via foliar em plantas de caupi, havendo viabilidade da adubação foliar para atendimento da demanda desse nutriente no feijão-caupi durante o seu desenvolvimento vegetativo.

**Palavras-chave:** adubação foliar, boro marcado, micronutriente, nutrição de plantas, redistribuição, *Vigna unguiculata*

## ABSORPTION AND PHLOEM MOBILITY OF BORON ( $^{10}\text{B}$ ) IN COWPEA

**ABSTRACT** – Boron deficiency can affect nutritional efficiency, as well as vegetative and reproductive growth, inducing cell changes in cowpea. Efficiency of B supply via foliar application in crops may depend on its proper concentration in spray solution, and when associated with sorbitol, it could enhance its absorption and plant growth. The aim of this study was to assess the effects of boron deficiency and foliar fertilization in the absence and presence of sorbitol on plant growth and production, and its accumulation and mobility in cowpea. In the study, three experiments were carried out from February 2014 to May 2015. Experiment I was composed of two treatments with nutrient solution under absence (-B) and presence (+B) of boron in ten repetitions. In the experiment II, a  $5 \times 2$  factorial scheme was used, being applied via foliar five concentrations of B (0, 1.25, 2.5, 3.75 and 5.0 g L<sup>-1</sup> of B) in the form of boric acid and in the absence or presence of sorbitol (500 mmol L<sup>-1</sup>), with four repetitions. In the experiment III, marked boron ( $^{10}\text{B}$ ) mobility was studied regarding its absorption by roots and leaves. Boron deficiency symptoms, root growth, dry weight of plant organs and B content and grain production were assessed. Boron deficiency in cowpea plants decreased B absorption efficiency, although it has increased nutrient use efficiency. The greatest losses occurred in reproductive variables and root growth in relation to leaves and stem production. Boron deficiency induces cellular changes such as thickening in the middle lamella and starch accumulation in leaf chloroplasts, which lead to characteristic visual symptoms for cowpea. The highest production of cowpea grains (90–100% of maximum production) occurred when B was pulverized at 2.62 g L<sup>-1</sup> of B without sorbitol, having as a source the boric acid, on growth stages V6, R1 and R2 and foliar content of 35 mg kg<sup>-1</sup> of B. Foliar fertilization with boron, associated with sorbitol, increased micronutrient absorption in the vegetative part, but it did not influence cowpea production. A mobility was observed for B applied via foliar in cowpea plants, showing viability of foliar fertilization to meet the demand of this nutrient during vegetative development.

**Keywords:** foliar fertilization, marked boron, micronutrient, plant nutrition, redistribution, *Vigna unguiculata*



## 1 INTRODUÇÃO

A deficiência de boro em fabáceas provoca grandes perdas na produção agrícola, devido à restrição no desenvolvimento reprodutivo (CHATTERJEE et al., 2014) e também do crescimento das raízes (HAJIBOLAND et al., 2012). A deficiência de B tem significativa influência sobre o teor de produtos finais e intermediários na via do chiquímico, tais como as quinonas, que pode estar relacionado com os sintomas de deficiência de B em raízes (DONG et al., 2016). Nestas condições a via da pentose fosfato e não a da glicólise torna-se o meio predominante de degradação dos carboidratos, levando à formação de compostos fenólicos (e triptofano) (KIRKBY; RÖMHELD, 2007).

Para que o feijão-caupi alcance maiores patamares de produtividade é necessário que tenha uma nutrição adequada, inclusive de micronutrientes, sendo o boro, o segundo mais exigido na cultura do caupi (ARAÚJO et al., 1984; OLIVEIRA; DANTAS, 1984), cuja deficiência pode limitar a produtividade.

Existem indicações de que a deficiência de B induz alterações no espessamento da parede celular e da lamela média, deformação dos cloroplastos em *Ricinus communis* (LAVRES JÚNIOR et al., 2012) e acúmulo de grãos de amido nos cloroplastos foliares em plantas de *Vigna unguiculata* cultivar Walp. P152 (INBARAJ; MUTHUCHELIAN, 2011).

Uma técnica para corrigir a deficiência de boro nas fabáceas seria sua aplicação via foliar, a exemplo na cultura do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*) com benefícios importantes do nutriente para aumento da produção (RAHMAN et al., 2014), embora não havendo relatos para a cultura do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L Walp.).

Neste sentido, uma estratégia interessante para aumentar a eficiência da adubação foliar seria estabelecer a concentração adequada do nutriente na calda de pulverização associada com o teor foliar ótimo. Uma alternativa para aumentar a absorção de B, seria a adição de polióis, como o sorbitol, na calda de pulverização. Desta forma, a absorção foliar de B seria potencializada. Isso porque, os polióis possuem uma ação umectante, retardando a secagem da solução pelo abaixamento

do ponto de deliquescência da formulação (B+sorbitol) na folha, prolongando o processo de absorção (WILL et al., 2011).

Outro possível efeito benéfico da interação entre sorbitole o B seria incrementar a mobilidade do micronutriente no floema, prolongando o efeito residual da adubação foliar. Esse efeito do sorbitol, aumentando a mobilidade do B, foi observado em plantas que produzem naturalmente polióis, possuindo relação poliól: boro maior que 100:1 no floema (BROWN; HU, 1998).

No entanto, existem dúvidas se a aplicação do sorbitol na calda poderia ser eficiente na melhoria da mobilidade do boro, com reflexo na produção de grãos, pois existem relatos de ausência de efeito deste poliól na redistribuição do boro em plantas de soja (WILL et al., 2011; WILL et al., 2012), possivelmente devido a baixa estabilidade do complexo formado, poliól-B-poliól, evitando que o B possa atingir o floema e garantir sua mobilidade.

Pesquisas sobre absorção e mobilidade do B têm sido realizadas com o desenvolvimento do ICP-MS (espectrômetro de massas com fonte de plasma), sendo possível quantificar os isótopos estáveis de B ( $^{10}\text{B}$  e  $^{11}\text{B}$ ), o que possibilitou os estudos de mobilidade de B nos vegetais (BOARETTO, 2006). Diante disso, a ausência de pesquisas com compostos enriquecidos de  $^{10}\text{B}$  para avaliar a absorção e mobilidade do B em caupi, motivaram o presente estudo.

Os estudos sobre a deficiência de boro são pontuais e restritos a algumas espécies de fabáceas, não havendo relatos com feijão-caupi. Apesar disso, existe a recomendação de adubação foliar com aplicação de  $500\text{g ha}^{-1}$  de B no caupi, quando ocorrer à deficiência (OLIVEIRA; DANTAS, 1984). Portanto, estudos mais completos que permitam ampliar o entendimento sobre uma possível ocorrência de restrição de boro nesta cultura a nível celular e seus efeitos e suas relações com a eficiência nutricional e o acúmulo diferenciado de massa seca da planta são extremamente importantes.

Diante da necessidade de aumentar o conhecimento sobre os fatores relacionados à nutrição boratada em feijão-caupi surgem quatro hipóteses importantes:

1. Os efeitos adversos da deficiência de B na produtividade do feijão-caupi advêm dos prejuízos na eficiência de absorção refletindo mais nas variáveis

reprodutivas do que na eficiência de utilização do micronutriente e nas variáveis vegetativas;

2. A adubação foliar com B é importante para a produção do feijão-caupi independentemente da adição de sorbitol devido ao incremento do índice de colheita e não da massa seca dos órgãos vegetativos da planta;

3. A interação boro e sorbitol melhoram a produtividade do feijão-caupi;

4. O B é pouco redistribuído no caupi e a relação do B é influenciada pelo método de aplicação do nutriente.

Diante do exposto, propôs-se avaliar inicialmente os efeitos da deficiência de boro na planta; a adubação foliar sob ausência e presença de sorbitol na produção e sua mobilidade no feijão-caupi.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A cultura do feijão-caupi

O feijão-caupi (feijão-macaça, feijão macaçar ou feijão-de-corda), *Vigna unguiculata* L. Walp., é uma cultura de origem africana, sendo aproveitada principalmente como grãos secos para o consumo humano. A Nigéria é responsável por 32% da produção mundial, seguida pelo Níger, com 27% (FAO, 2014) e pelo Brasil, que responde por 11% da produção mundial (CONAB, 2013).

No Brasil, o feijão-caupi está se expandindo para o bioma dos cerrados das regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, onde é incorporado aos arranjos produtivos como segunda safra após as culturas da soja e do arroz, e alguns locais como cultura principal (FREIRE FILHO, 2011).

O caupi é uma espécie adaptada a condições de calor e seca, e intolerante à geada. Segundo Craufurd et al. (1996), as médias mensais entre 18 °C e 34 °C, durante o ciclo vegetativo da cultura, constitui a faixa térmica ideal. Regiões com níveis pluviométricos entre 250 e 500 mm são consideradas aptas para a cultura, que é bastante tolerante a ocorrência de déficits hídricos no início de seu desenvolvimento, condição esta determinante em sua implantação no Nordeste. Os períodos fenológicos críticos da cultura são compreendidos entre o florescimento e o enchimento dos grãos, sendo necessário nesse período um nível de umidade que satisfaça as exigências da cultura, para que não ocasione o comprometimento da produção (AMARAL et al., 2005).

O ciclo fenológico da cultura do feijão-caupi é caracterizado (CAMPOS et al., 2000) como:

Fase vegetativa:

V0 – Semeadura;

V1 – Cotilédones emergidos na superfície do solo;

V2 – Folhas unifolioladas completamente abertas;

V3 – Primeira folha trifoliolada com folíolos separados e completamente abertos;

V4 – Segunda folha trifoliolada com folíolos separados e completamente abertos;

- V5 – Terceira folha trifoliolada com folíolos separados e completamente abertos;
- V6 – Primórdios do ramo secundário surgem nas axilas das folhas unifolioladas, podendo também ser observados nas axilas das primeiras folhas trifolioladas;
- V7 – Primeira folha do ramo secundário completamente aberta;
- V8 – Segunda folha do ramo secundário completamente aberta; e
- V9 – Terceira folha do ramo secundário completamente aberta.

Fase reprodutiva:

- R1 – Surgem os primórdios do primeiro botão floral no ramo principal;
- R2 – Antese da primeira flor, geralmente oriunda do primeiro botão floral;
- R3 – Início da maturidade da primeira vagem, geralmente oriunda da primeira flor;
- R4 – Maturidade de 50% das vagens da planta; e
- R5 – Maturidade de 90% das vagens da planta.

## **2.2 Importância do boro na nutrição de plantas**

O B está amplamente distribuído tanto na litosfera quanto na hidrosfera. Naturalmente o B é encontrado quase que exclusivamente ligado ao oxigênio como borato, menos em forma de ácido bórico ou, mais raro ainda, ao flúor, como íon  $\text{BF}_4^-$ . Normalmente somente o B solúvel está disponível às plantas, e este geralmente corresponde a 10% do B total no solo, lembrando que a maior parte dos solos tem baixo conteúdo de B, sendo encontrados altos níveis em solos associados com vulcanismo (POWER; WOODS, 1997).

O B é um constituinte essencial das paredes celulares (KIRKBY; RÖMHELD, 2007). Segundo Epstein e Bloom (2006), as principais funções do B estão relacionadas com a estrutura da parede celular e com substâncias pécicas associadas a elas, especialmente a lamela média.

A parede celular vegetal é composta não apenas por polissacarídeos e proteínas, mas também contém nutrientes essenciais, incluindo cálcio e boro. Já foi demonstrado que ambos os elementos são necessários para a formação de redes de polissacarídeos pécicos na parede celular primária (FUNAKAWA; MIWA, 2016).

A deficiência de boro pode causar a inibição de alongamento das células da raiz e a expansão de células das folhas e o alongamento do tubo polínico (DELL; HUANG, 1997) refletindo no rendimento das culturas e na qualidade da colheita (ATI; ALI, 2011), principalmente por afetar negativamente o crescimento e o desenvolvimento de órgãos reprodutores de muitas plantas (TOMIĆ et al., 2015).

A redução de crescimento celular em tecidos meristemáticos de plantas com deficiência de B é explicada principalmente pelo seu papel estrutural na parede celular (DEMİRAY; EŞİZ DEREBOYLU, 2013). Isso porque, o B é necessário para a reticulação do polissacarídeo péctico ramnogalacturonano II (RG-II), essencial para a manutenção da estrutura da parede celular (MIWA et al., 2013). A carência de B induz alterações nas ultraestruturas celulares nas folhas mais novas de mamoneira, tais como o espessamento da parede celular e lamela média, a distorção no formato dos cloroplastos e o agrupamento dos tilacóides (LAVRES JÚNIOR et al., 2012). Além disso, foi constatado o acúmulo de grãos de amido nos cloroplastos foliares em plantas de *Vigna unguiculata* cultivar Walp. P152 (INBARAJ; MUTHUCHELIAN, 2011).

O boro também pode ser tóxico para as células em concentrações elevadas. Resultados mostraram que concentração elevada de boro inibiu a germinação e o crescimento do tubo polínico levando à anormalidade morfológica de tubos de pólen em plantas de *Malus domestica* (FANG et al., 2016). Com isso, concentrações elevadas podem reduzir a produtividade de rendimento. Na cultura do café, por exemplo, cada quilograma de boro aplicado é responsável pela redução de 0,33 sacas de café por hectare (SANTINATO et al., 2016).

### **2.3 Respostas das fabáceas ao B**

A deficiência de boro provoca grandes perdas na produção agrícola, refletindo na menor qualidade dos produtos (HAMIDELDIN; HUSSEIN, 2014). Isto ocorre devido à restrição no desenvolvimento reprodutivo (CHATTERJEE et al., 2014) especialmente em fabáceas, que é responsivo ao uso deste micronutriente.

Trabalhos indicam resultados benéficos da aplicação de boro na produção de

grãos do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) (HARMANKAYA et al. 2008; RAHMAN et al., 2014), da lentilha (*Lens culinaris* Medik) (KARAN; SINGH; RAMKEWAL, 2014), da soja (*Glycinemax.*) (TAHIR et al., 2014, VASEGHI; VALINEJAD; AFZALI, 2013) e do Green Gram (*Vignaradiata* L.) (PADBHUSHAN; KUMAR, 2015). No entanto, a deficiência severa de B, além de limitar o desenvolvimento da fase reprodutiva da planta, também limita o crescimento das raízes (BOGIANI; ROSOLEM, 2012; HAJIBOLAND et al., 2012), induzindo o aumento da concentração de fenóis e auxina (CAMACHO-CRISTÓBAL et al., 2015).

Plantas de indigo (*Indigofera tinctoria* L.) cultivadas em condições de campo sob diferentes concentrações de B apresentaram maiores valores para o número de sementes por vagem e peso de 1000 sementes com pulverização B em 1000 mg/L (LORI; AIEN; FARYABI, 2012). O mesmo foi relatado por Harmankaya et al. (2008) na cultura do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), que respondeu positivamente à adubação B em experimentos de campo, apresentando rendimento médio de grãos de 10% via solo e 20%, via foliar.

Em experimento de campo com alfafa (*Medicago sativa* L.) com aplicações foliares de 0, 400, 800 e 1200 mg L<sup>-1</sup> de B, foi observado aumento de 37% no rendimento de sementes em comparação com o controle. A aplicação foliar de B aumentou a porcentagem de vagens formadas por inflorescências em até 52% quando comparado com o tratamento controle e não houve diferença estatística significativa entre as três doses de B (DORDAS, 2006).

Na soja, o boro desempenhou um papel vital no aumento do rendimento, quando aplicado 1,5 kg ha<sup>-1</sup>, se comparado a 0; 0,5; 1,0 e 2,0 kg de B ha<sup>-1</sup> (DEVI et al., 2012). A aplicação de boro adequada no feijão fava (*Vicia faba* L) alcançou boa produtividade nas condições de solo (ATI; ALI, 2011). Experimento de campo realizado com aplicações via solo e foliar revelaram que a produção de vagens de amendoim aumentou com os níveis de B foliar e a aplicação, no solo, de 20 kg por hectare de bórax mostrou maior número de vagens (MAHENDRAN; VELMURUGAN; BALASUBRAMANIAM, 2015).

## 2.4 Absorção, transporte e redistribuição do boro

O boro é absorvido pelas plantas como ácido bórico (GUPTA, 1979), o qual é facilmente lixiviado em solos (PRADO, 2008). Há uma incerteza se a absorção do B é um processo ativo ou passivo (MENGEL; KIRKBY, 2001). Uma vez absorvido, o boro na forma de  $H_3BO_3$  tem transporte unidirecional, por meio de corrente transpiratória.

Por muitos anos acreditou-se que o B era imóvel nas plantas em geral. Atualmente, sabe-se que o B é móvel em algumas espécies vegetais, tais como abacaxizeiro (SIEBENEICHLER et al., 2005), ameixeira, cerejeira, macieira (BROWN; HU, 1998) e brócolis (SHELP, 1988).

A mobilidade de B ocorre nas espécies que produzem polióis, açúcares simples, como o sorbitol, o manitol e o dulcitol que se liga com o B, tornando-o complexo nos tecidos fotossintéticos, e estes complexos são transportados pelo floema até os drenos ativos, como meristemas vegetativos e reprodutivos (HU et al., 1997).

O conhecimento da mobilidade dos nutrientes na planta favorece a escolha do tipo do manejo que será adotado na correção ou prevenção da deficiência. Quando o nutriente é imóvel na planta, torna-se necessário o fornecimento direto nos novos órgãos em formação; entretanto, para elementos móveis, este tipo de manejo é desnecessário ou então, a forma de aplicação pode ser facilitada (SIEBENEICHLER et al., 2005).

Os isótopos estáveis de B são de massa 10 e 11, com abundância natural de  $^{10}B=19,9\%$  e  $^{11}B=80,1\%$  (BIÈVRE; BARNES, 1985), com número atômico 5 e massa atômica de 10,81 u.m.a.

Pesquisas sobre a absorção e mobilidade do B têm sido realizadas com o desenvolvimento do ICP-MS, sendo possível quantificar os isótopos estáveis de B ( $^{10}B$  e  $^{11}B$ ), o que possibilitou os estudos de mobilidade de B nos vegetais, utilizando-se compostos enriquecidos em  $^{10}B$  (BOARETTO, 2006).

Como a mobilidade de B nas plantas ocorre em espécies que produzem polióis, açúcares simples, como o sorbitol, o manitol e o dulcitol (HU et al., 1997), estes polióis têm sido empregados na agricultura, visando promover o máximo



aproveitamento do boro na planta, resultando em ótima relação custo-benefício. Trabalhos científicos têm comprovado a eficácia nessa combinação para o aumento da frutificação, da produtividade e da qualidade dos produtos agrícolas (SINGH; SINGH; PRATIBHA, 2013) e adaptações a estresses (WU et al., 2015). No entanto, a aplicação do complexo de B-sorbitol aumenta a absorção de B, mas não aumenta a mobilidade deste nutriente nas plantas (WILL et al., 2011; WILL et al., 2012).

Usando o método de traçador, Brown e Shelp (1997) demonstraram que B é facilmente translocado em algumas espécies, como consequência da formação do complexo B-poliol. Foi demonstrado que o B exibe mobilidade rápida e significativa no floema de espécies como pêra, maçã, cereja, aipo e azeitona, produzindo polióis como o produto fotossintético primário. Nestas espécies, as aplicações foliares podem ser utilizadas para corrigir deficiências de B, na floração e formação dos frutos.

A mobilidade B associada com polióis foi demonstrada em experimento conduzido com plantas de tabaco geneticamente modificadas para produzir o sorbitol (BELLALOUJ; BROWN; DANDEKAR, 1999). Os resultados desta pesquisa mostraram que há redistribuição significativa de  $^{10}\text{B}$  em todas as folhas velhas para os meristemas, além da maior tolerância das plantas de tabaco a toxicidade e diminuição dos sintomas de deficiência de boro.

Por outro lado, plantas que não produzem polióis podem apresentar baixa mobilidade de B no floema, como mostrado por Boaretto et al. (2011) usando a técnica de marcação B ( $^{10}\text{B}$ ) em plantas de laranja.

No Brasil, a espectrometria de massas com fonte de plasma (ICP-MS) foi estudada por Bellato (1999), para determinação isotópica e elementar de B em amostras vegetais, e usada por Leite (2002) para estudar a absorção de B pelas folhas de café e sua translocação para os frutos. A mesma técnica foi empregada para estudar a absorção radicular e foliar de B, o seu transporte e sua distribuição em laranjeiras (BOARETTO, 2006), beterraba, tomate (GONDIM, 2009), repolho, couve (ALVES, 2009) e mudas de cajueiro e pessegueiro (SOUZA, 2011).

A técnica de traçador para os isótopos estáveis com compostos marcados consta em fornecer, como substrato ao meio em estudo, composto com composição isotópica do elemento de interesse diferente daquela de ocorrência natural. Após

fornecer o traçador ao sistema, determina-se então em que fração dos produtos se encontra o isótopo, podendo-se proceder as quantificações por meio do princípio de diluição isotópica (BOARETTO; TRIVELIN; MURAOKA, 2004).

O método convencional de introdução de amostras no plasma é a nebulização da solução formando um fino aerossol por meio de um nebulizador acoplado a uma câmara de expansão. O plasma é produzido pela ionização parcial de um gás, geralmente argônio, introduzido continuamente com vazão de 12 a 18L min<sup>-1</sup> e sustentado em uma tocha de quartzo, cujo extremo é colocado no interior de uma bobina solenoidal de cobre. Esta bobina é conectada a uma fonte de radiofrequência que induz um campo magnético oscilante, permitindo a formação e manutenção do plasma. A energia produzida pelo plasma é de 15,7 eV, a qual é suficiente para produzir a ionização da maioria dos elementos da amostra (BELLATO, 1999).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Localização dos experimentos**

Os experimentos foram realizados na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Jaboticabal, SP, localizada geograficamente a 21° 15' 22" de latitude sul e 48° 18' 58" de longitude Oeste, altitude de 605 m, na região norte do Estado de São Paulo, com temperatura média anual de 21 °C.

#### **3.2 Descrição dos experimentos**

Três experimentos foram instalados com a cultura do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.), cv. BRS Guariba, cultivado em solução nutritiva em casa de vegetação. Sementes de caupi foram colocadas para germinar em bandejas plásticas, preenchidos com substrato à base de vermiculita, e irrigadas com água destilada até a emergência das plântulas.

##### **3.2.1 Experimento I – Omissão de boro em plantas de caupi**

Neste experimento, avaliaram-se os efeitos da omissão de boro no crescimento e nutrição de plantas de caupi em sistema hidropônico de cultivo, no período de fevereiro a abril de 2014.

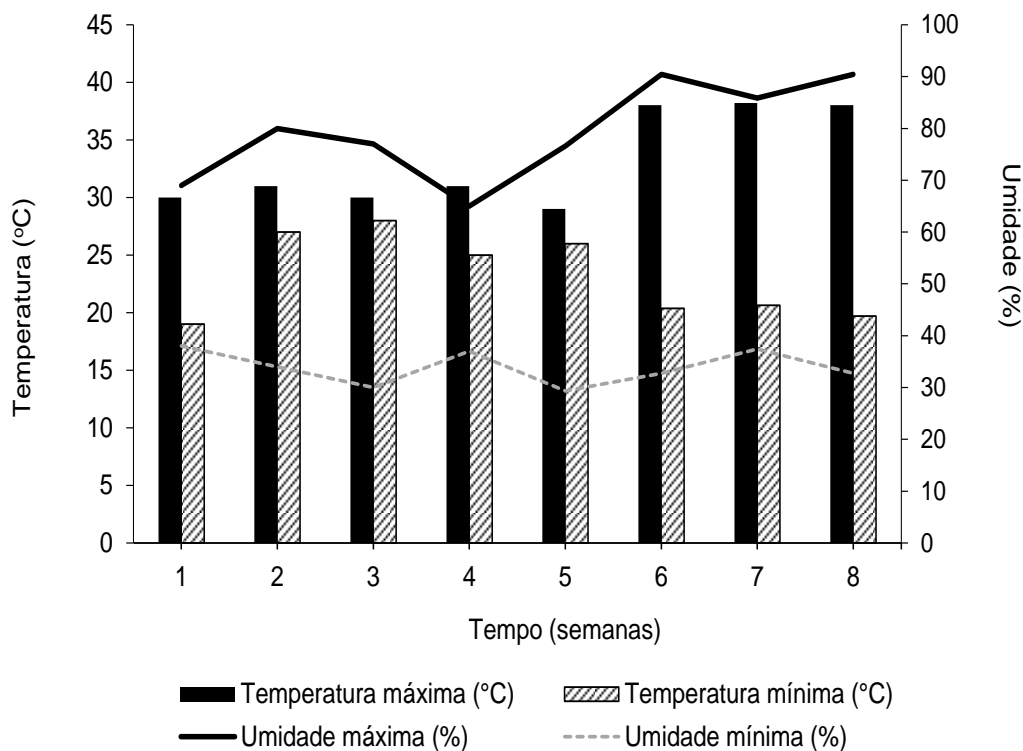
O experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado, com dois tratamentos, que corresponderam à solução nutritiva completa com 0,5 mg L<sup>-1</sup> de B (+B) e ausência de boro (-B), com dez repetições. As unidades experimentais consistiram de duas plantas por vaso.

Treze dias após a semeadura (DAS), duas plântulas foram transferidas para cada vaso contendo 8 dm<sup>3</sup> de solução nutritiva. Posteriormente, as plantas foram cultivadas em solução nutritiva, proposta por Hoagland e Arnon (1950), com modificação do ferro de Fe-EDTA para Fe-EDDHMA. As soluções nutritivas foram diluídas na primeira e na segunda semana de cultivo para 25% e 50% da força

iônica, respectivamente, e na terceira semana de cultivo utilizou-se a solução nutritiva com 100% da força iônica.

As soluções nutritivas foram substituídas a cada quinze dias e preparadas com água deionizada. O valor de pH das soluções nutritivas foram monitorados diariamente, ajustando-se para  $5,5 \pm 0,5$ , usando-se solução de NaOH  $1 \text{ mol.L}^{-1}$  ou HCl  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ . Para a reposição da água evapotranspirada utilizou-se água deionizada, sendo a solução nutritiva oxigenada constantemente, com uso do compressor de ar.

Obtiveram-se os dados de temperatura média e umidade relativa do ar, coletados diariamente dentro da casa de vegetação, com o auxílio de um termohigrômetro digital (Instrutemp®), no período do transplântio até a coleta das plantas, feita oito semanas após o transplântio (Figura 1). A temperatura e a umidade do ar obtidas foram adequadas para o cultivo de plantas de caupi (FREIRE FILHO, 2011).



**Figura 1.** Valores médios semanais de temperatura do ar (a) e umidade relativa do ar (b), dentro da casa de vegetação, durante a execução do experimento. Jaboticabal, SP.

Aos 70 DAS, no final do ciclo da planta, as plantas foram cortadas na altura do colo, separando-se a parte aérea do sistema radicular. Coletaram-se todas as folhas das plantas para determinação da área foliar por meio de um medidor digital portátil (Li-Cor, modelo L1-3000®). Para a avaliação de crescimento das raízes pesou-se alíquotas de 1 g de massa fresca das raízes de cada repetição, sendo acondicionadas em frascos contendo solução de etanol a 20% (v/v) e conservadas sob refrigeração. Em seguida, avaliou-se, o comprimento (mm), a área (mm<sup>2</sup>) e a densidade (mmL<sup>-1</sup>) da raiz pelo “Scan Root Analysis System”, software Delta-T.

O material vegetal colhido foi lavado com água deionizada, separado em raiz, caule e vagens (sem grãos), folhas e grãos, e as amostras foram secas em estufa de ventilação forçada a 65 °C, durante 72 horas, tempo necessário para o material atingir peso constante. Após a secagem, foram obtidas as massas secas das raízes, do caule e vagens (sem grãos), das folhas, e dos grãos com o auxílio de balança analítica. O material vegetal foi moído em moinho tipo Willey e em seguida, determinou-se o teor de B seguindo o método descrito por Bataglia et al. (1983). Foi calculado o índice de colheita, correspondente à razão entre a massa dos grãos e da parte aérea.

Em função do teor de B e da massa seca, calculou-se o acúmulo de B nas raízes, no caule e vagens (sem grãos), nas folhas, e nos grãos (µg por planta) e a partir do acúmulo de B nas raízes e na parte aérea calcularam-se as seguintes eficiências nutricionais: a) eficiência de absorção = (conteúdo total do nutriente na planta)/(massa seca de raízes) (SWIADER et al., 1994); b) eficiência de utilização de B = (massa seca total produzida)<sup>2</sup>/(conteúdo total do nutriente na planta) (SIDDIQI; GLASS, 1981).

Durante o período experimental foram obtidas imagens das plantas com sintomas de deficiência de boro, comparada com o tratamento sem a desordem nutricional, acompanhadas da descrição dos sintomas visuais.

Na ocasião do surgimento dos sintomas de deficiências característicos do nutriente, avaliaram-se as modificações ultraestruturais da célula no mesófilo foliar do feijão-caupi na presença e na ausência de B, a partir da coleta de dez folhas completamente expandidas. As amostras do limbo foliar (1-2mm<sup>2</sup>) foram fixadas por 3 horas, a 4<sup>o</sup> C, em solução de Karnovsky (1965) modificada: glutaraldeído 2%,

paraformaldeído 2%, cloreto de cálcio 5 mmolem tampão cacodilato de sódio 0,05 mol.L<sup>-1</sup>pH 7,2, lavadas em tampão cacodilato 0,1 mol L<sup>-1</sup> e pós fixadas com tetróxido de ósmio 1% em tampão cacodilato de sódio 0,1mol L<sup>-1</sup>. Após rápidas lavagens com solução salina 0,9% foram contrastadas “*in bloco*” com acetato de uranila 2,5% em água “overnight”. Seguiu-se com a desidratação em séries crescentes de solução de acetona em água (25%; 50%; 75%; 90% e 100%). A emblocagem foi feita em resina Spurr por 48 horas à 70° C. As secções ultrafinas de 60 a 90 nm de espessura foram depositados sobre telas de cobre de 300mesh, contrastadas com acetato de uranila 2,5% e citrato de chumbo, conforme Reynolds (1963) e, em seguida, realizou-se a visualização das estruturas no microscópio eletrônico de transmissão Jeol, JEM 1010, para serem observadas e documentadas. Essas análises foram feitas no Laboratório de Histopatologia e Biologia Estrutural de Plantas do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CENA/USP, Piracicaba-SP.

Os dados foram submetidos à análise de variância, pelo teste F ( $P \leq 0,05$ ). Realizou-se a análise de correlação de Pearson ( $P \leq 0,05$ ) entre as variáveis. Utilizou-se do software Agroestat (BARBOSA; MALDONADO JR, 2015).

### **3.2.2 Experimento II – Concentrações de boro via foliar, no desenvolvimento e teor de B em plantas de caupi**

Avaliaram-se o efeito da aplicação foliar de boro sobre a nutrição de plantas de caupi durante o período de 10 de agosto a 20 de novembro de 2014, por meio de sistema hidropônico de cultivo.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial 5 x 2, sendo cinco concentrações de B (0; 1,25; 2,5; 3,75 e 5,0 gL<sup>-1</sup> de B), via foliar, na forma de ácido bórico (17% de B), correspondentes a 0; 7,35; 14,7; 22,05 e 29,4 g L<sup>-1</sup> de ácido bórico na solução, na ausência e na presença de sorbitol (500 mmol L<sup>-1</sup>) (WILL et al., 2012). Cada unidade experimental constou de uma planta cultivada em cada vaso. Essas concentrações foram determinadas, de acordo com a dose de 500 g ha<sup>-1</sup> de B em uma população de 66,6 mil plantas por hectare, recomendada na cultura do caupi em caso de deficiência extrema (OLIVEIRA; DANTAS, 1984).

Aos treze DAS, quando as plântulas apresentavam três pares de folhas completamente formadas, estas foram transplantadas para vasos de plástico com capacidade de 3 dm<sup>3</sup>, contendo areia lavada nas proporções: 1% de areia muito fina (fração obtida por diferença), 20% de areia fina (malha de 0,105 mm de abertura), 47% de areia média (malha de 0,250 mm de abertura), 26% de areia grossa (malha de 0,50 mm de abertura) e 6% de areia muito grossa (malha de 1,00 mm de abertura).

A areia foi lavada com água corrente em peneira fina; em seguida colocada em solução de HCl a 0,5 mol L<sup>-1</sup> em baldes com capacidade para 20dm<sup>3</sup> durante 24 horas, com objetivo de eliminar resíduo de matéria orgânica. Em seguida realizou-se a lavagem da areia em três enxagues para retirada do excesso de HCl, mantendo o valor pH da areia entre a 6,0.

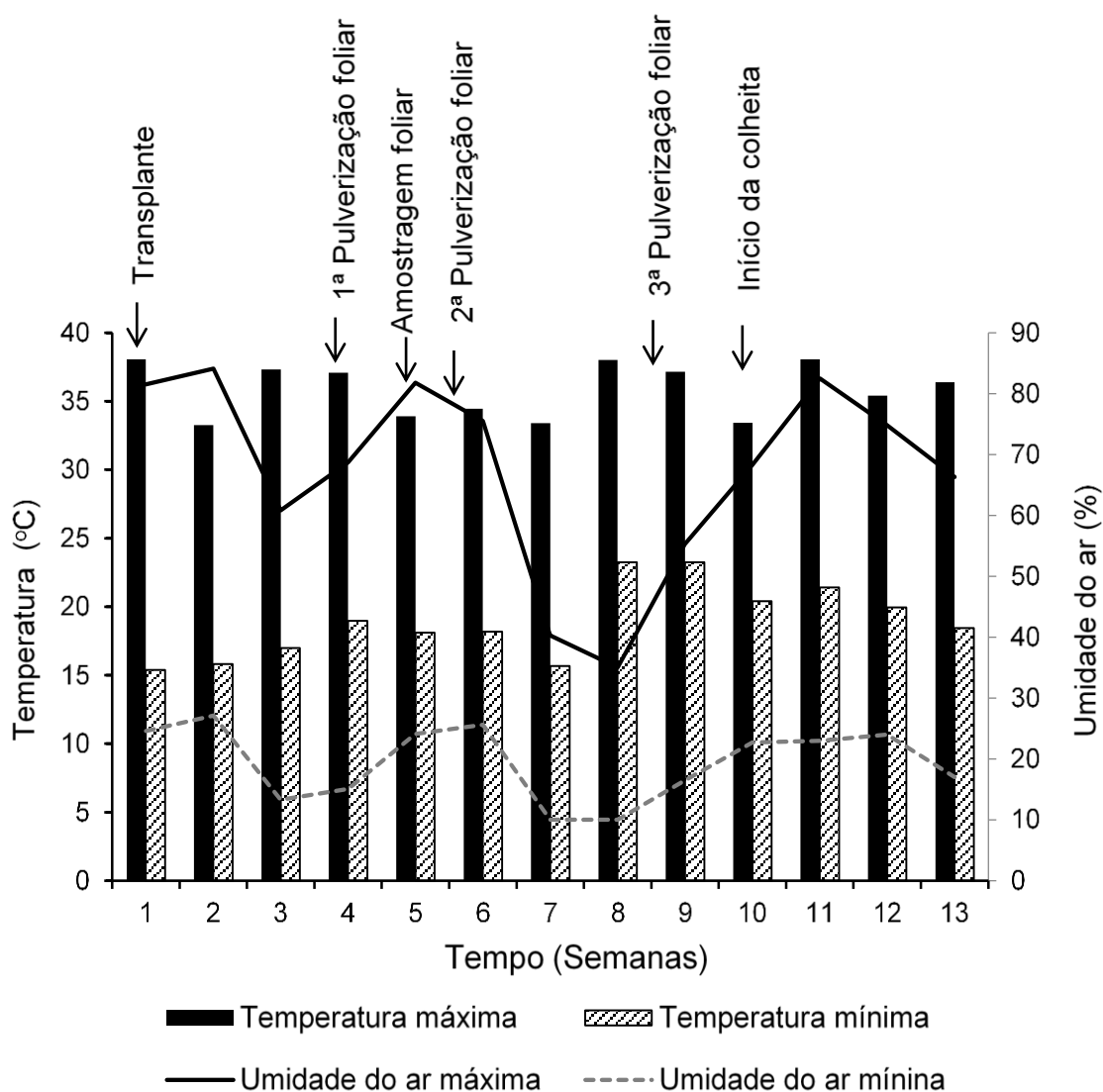
A partir deste momento, as plantas foram irrigadas diariamente com solução nutritiva, proposta por Hoagland e Arnon (1950), com modificação da fonte de ferro para Fe-EDDHMA e sem boro, mantendo o valor pH da solução nutritiva entre 5,5 a 6,0. As soluções nutritivas foram preparadas com água deionizada e diluídas a 25% da força iônica na primeira semana, 50% na segunda semana de cultivo e a partir da terceira semana até o final do experimento, aplicou-se solução nutritiva com 100% da força iônica. Os vasos tinham na parte inferior um recipiente coletor para retornar a solução nutritiva. O recolhimento da solução nutritiva e nova aplicação no vaso eram realizados no início da manhã e no final da tarde.

### **3.2.2.1 Adubação foliar**

As aplicações foliares com boro foram realizadas aos 20, 40 e 50 dias após o transplante (DAT), que correspondem aos estádios fenológicos V5, R1 e R2 utilizando-se pulverizador manual de um litro de capacidade nas condições de temperatura e umidade do ar média de 25 °C e 50%, 30 °C e 70%, e 30 °C e 10%, respectivamente. Foram fornecidas 0,25; 0,40 e 0,50 mL, volume gasto das concentrações de boro por planta, definida por um teste em branco (solução de água e espalhante adesivo gotafix®) realizado um dia antes de cada época pré-estabelecida para as pulverizações do nutriente. Para determinação do teor de B na

folha diagnose, coletou-se a terceira folha com pecíolo no terço médio das plantas, no início do florescimento, 10 dias após a primeira pulverização (RAIJ et al., 1996).

Obtiveram-se os dados de temperatura média do ar e umidade relativa do ar, coletados diariamente dentro da casa de vegetação, com o auxílio de um termohigrômetro digital (Instrutemp®), no período do transplante até a coleta das plantas, com duração de treze semanas (Figura 2). As temperaturas altas obtidas não foram totalmente adequadas para o cultivo de plantas, provocando um prolongamento no ciclo do caupi.



**Figura 2.** Valores de temperaturas máxima, mínima do ar e umidade relativa do ar na casa de vegetação, durante o desenvolvimento do experimento. Jaboticabal, SP, 2014.



Foram realizadas três colheitas (aos 52, 72 e 90 DAT) de vagens. Após a debulha manual das vagens, os grãos foram pesados e em seguida foi calculada a produção a 13% de umidade. Ao final do experimento (103 DAS), as plantas foram coletadas, separando-se a raiz, o caule, as folhas e as vagens e grãos.

### **3.2.2.2 Preparo das amostras**

Todas as partes das plantas foram lavadas com água deionizada, e colocadas para secar em estufa de ventilação forçada a 65 °C, durante 72 horas, tempo necessário para o material atingir peso constante. Após a secagem, foram obtidas as massas secas das raízes, do caule (e vagens vazias), das folhas e dos grãos, com o auxílio de uma balança analítica. A massa seca da parte aérea foi calculada pelo somatório das massas secas das folhas, do caule e das vagens sem os grãos. Determinou-se o índice de colheita (correspondente à razão entre massa seca dos grãos e a produção de fitomassa seca total acima do solo) (SINGH et al., 2011). O material vegetal foi moído e, em seguida, determinou-se o teor de B seguindo o mesmo método descrito no experimento I.

Em função do teor de B e da massa seca, calculou-se o acúmulo de B nas raízes, na parte aérea (folhas, caule e vagens sem grãos) e nos grãos. A partir do conteúdo de B nos órgãos da parte aérea e nas raízes, calculou-se a eficiência de utilização de B de forma semelhante ao descrito para experimento I.

### **3.2.2.3 Análise Estatística**

Os dados foram submetidos à análise de variância, pelo teste F, seguido da comparação de médias pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ). Em todas as variáveis, aplicou-se a análise de regressão polinomial. Realizou-se a análise de correlação de Pearson ( $P \leq 0,05$ ) entre as variáveis. Utilizou-se do software Agroestat (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2015).

### 3.2.3 Experimento III - Absorção foliar e radicular de B

O experimento foi realizado de abril e maio de 2015, em uma casa de vegetação na Universidade Estadual Paulista – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, SP, Brasil, localizada geograficamente a 21° 15' 22" de latitude sul e 48° 18' 58" de longitude Oeste, altitude de 605 m, com temperatura média anual de 21°C.

Sementes de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.), cv. BRS Guariba foram germinadas em bandejas plásticas, preenchidos com substrato à base de vermiculita, e irrigadas com água destilada até a emergência das plântulas.

Após treze dias de semeadura, as plântulas foram transplantadas para vasos (3dm<sup>3</sup>) contendo areia lavada de acordo com método descrito em 3.2.2. A seguir as plantas foram irrigadas diariamente com solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com modificação da fonte de ferro para Fe-EDDHMA e sem boro, mantendo-se o valor pH da solução nutritiva entre 5,5 a 6,0. Na primeira semana de cultivo, a solução nutritiva foi diluída a 25% da força iônica, a 50% na segunda semana de cultivo e a partir da terceira semana até o fim do experimento, aplicou-se solução nutritiva com 100% da força iônica. A solução nutritiva foi preparada com o uso de água deionizada e renovada semanalmente. Os vasos, na parte inferior, tinham um recipiente coletor para retornar a solução nutritiva aplicada no início da manhã e no fim da tarde. Semanalmente, o substrato era lavado com água destilada para evitar problemas de salinidade. As unidades experimentais consistiram de vasos contendo uma planta.

Foram avaliados nas parcelas quatro tratamentos com adubação via solo e/ou via foliar, com boro marcado (<sup>10</sup>B) ou não marcado (<sup>11</sup>B), sendo: sem adubação no substrato com <sup>11</sup>B e adubação foliar com <sup>10</sup>B (S<sub>0</sub> F<sup>10</sup>B); adubação via substrato com <sup>11</sup>B e foliar com <sup>10</sup>B (SB F<sup>10</sup>B); adubação via substrato com <sup>10</sup>B e sem adubação com boro foliar (S<sup>10</sup>B F<sub>0</sub>) e controle absoluto, ou seja, sem B no substrato e sem B foliar (S<sub>0</sub> F<sub>0</sub>). O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, com cinco repetições.

Na adubação via foliar, em folhas totalmente expandidas, foram aplicados 1,4mL (4,36 mg de B por planta) de uma solução contendo 3,4 g L<sup>-1</sup> de B, utilizando-se ácido bórico enriquecido com 99% de átomos de <sup>10</sup>B. A quantidade de B a ser

adicionada por planta foi definida em um experimento preliminar, no qual se avaliaram concentrações de B aplicadas nas folhas de caupi. A adubação foliar com  $^{10}\text{B}$  foi realizada aos 25, 30 e 35 dias após transplante (DAT), no fim da tarde, com auxílio de cotonetes. Estes foram pesados, antes e após cada aplicação foliar, para obter a quantidade de solução efetivamente depositada nas folhas de cada planta.

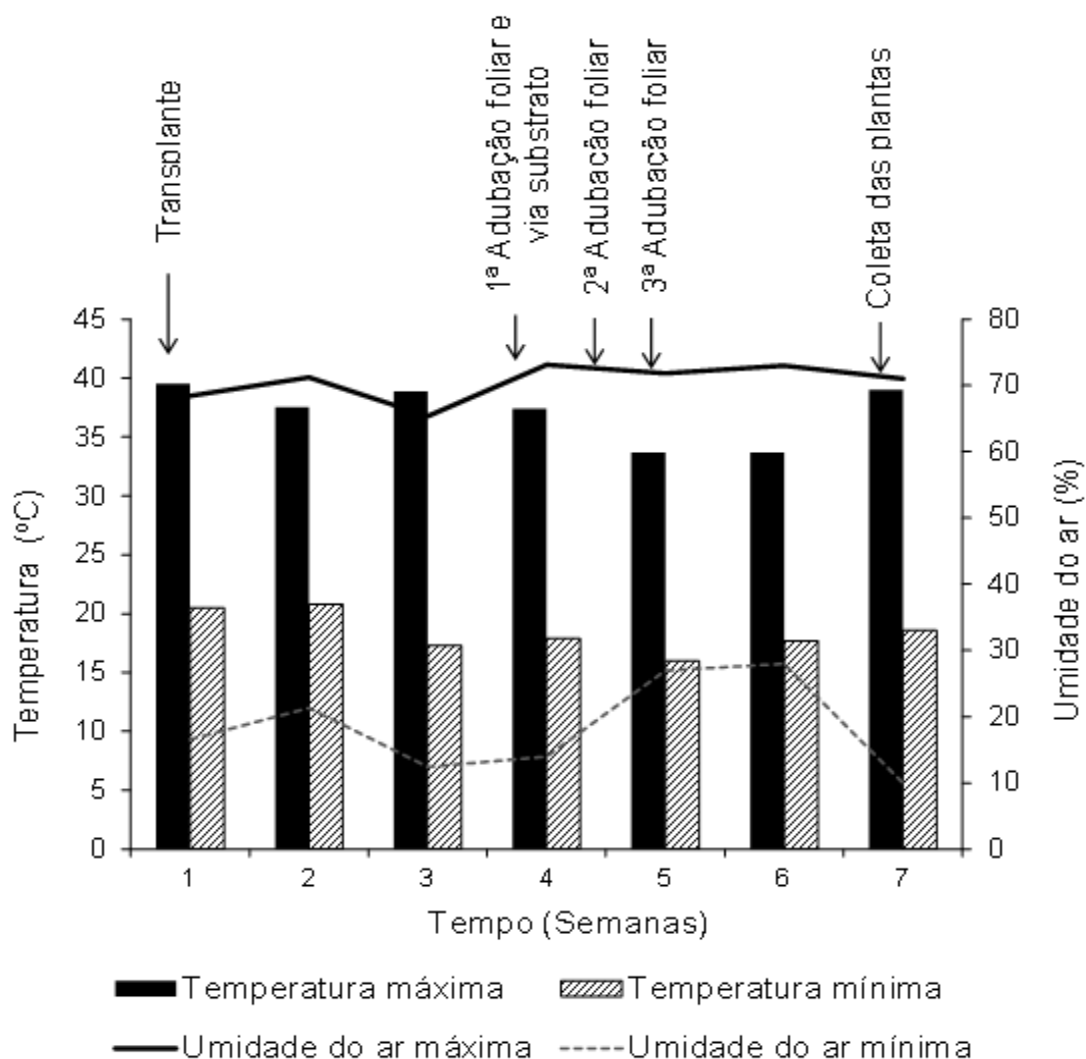
Antes da aplicação, foi realizada uma proteção na base da planta para que não houvesse queda e/ou escorrimento da solução aplicada nas folhas para o substrato. As folhas que receberam o fertilizante foliar foram identificadas com barbante, para, posteriormente, diferenciá-las de folhas que não receberam aplicação com boro.

Nos tratamentos  $\text{SBF}^{10}\text{B}$  e  $\text{S}^{10}\text{BF}_0$ , respectivamente, a aplicação do ácido bórico (17% de B) e ácido bórico enriquecido com átomos de  $^{10}\text{B}$  (99%) ( $46 \mu\text{mol L}^{-1}$  de B), foi aplicado apenas uma vez, aos 25 DAT. A quantidade de solução de ácido bórico aplicada foi de 100 mL por planta, com o auxílio de uma proveta (Figura 3). O pH foi mantido em 6,0. A reposição foi realizada com solução nutritiva sem boro.



**Figura 3.** Adubação via substrato (A) e via foliar (B) na cultura do caupi.

Obtiveram-se os dados de temperatura média do ar e umidade relativa do ar, coletados diariamente dentro da casa de vegetação, com o auxílio de um termohigrômetro digital (Instrutemp<sup>®</sup>), no período do transplante até a coleta das plantas, com duração de sete semanas (Figura 4). A temperatura e a umidade do ar obtidas foram adequadas para o cultivo de plantas de caupi.



**Figura 4.** Valores de temperaturas máxima, mínima do ar e umidade relativa do ar na casa de vegetação, durante o desenvolvimento do experimento. Jaboticabal, SP, 2015.

Após 10 dias da última adubação foliar, quando as plantas emitiram novas folhas, foram realizadas as coletas das plantas, separando-as em: parte aplicada (folha da planta que recebeu  $^{10}\text{B}$ ) e parte nova (folhas emitidas após a aplicação de  $^{10}\text{B}$ ), que foram lavadas com água destilada. Conforme indicado por Boaretto (2004), as folhas tratadas com  $^{10}\text{B}$  foram sequencialmente lavadas com chumaços de algodão embebidos em solução de detergente a  $1 \text{ mL L}^{-1}$ , água destilada, solução de HCl a  $24,9 \text{ mL L}^{-1}$  e, novamente, com água destilada, para retirar todo o micronutriente que não foi absorvido e que ficou na superfície do tecido vegetal.

### 3.2.3.1 Metodologias para análises químicas

#### a) Preparo das amostras

Todo o material vegetal foi colocado em estufa a 65 °C para secar até peso constante. Após secagem do material vegetal, procedeu-se à moagem do material seco, sendo então acondicionado em sacos de papel. O teor de B total foi determinado pelo método da azometina-H, em extrato obtido por digestão via seca (TEDESCO et al., 1995). Os extratos obtidos para determinação do teor de B também foram para determinação da razão isotópica de  $^{10}\text{B}$  e  $^{11}\text{B}$ , por meio de espectrometria de massas com fonte de plasma (ICP-MS), segundo metodologia proposta por Bellato (1999) e utilizada por Boaretto (2006), e posterior quantificação da porcentagem de  $^{10}\text{B}$  nas amostras oriundas de tratamentos com  $^{10}\text{B}$  (% $^{10}\text{B}$  amostra) e  $^{10}\text{B}$  nas amostras oriundas de tratamentos sem adição de  $^{10}\text{B}$  enriquecido (% $^{10}\text{B}$  natural).

#### b) Determinação do B total

O teor de B total foi determinado pelo método da azometina-H em extrato obtido por digestão via seca (TEDESCO et al., 1995). Transferiu-se 250 mg de amostra para o cadinho de porcelana e incinerou-se em forno elétrico a 600°C por 3 horas. Após o esfriamento da amostra adicionou-se 10 mL de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>, dissolvendo toda a cinza. Após repouso do substrato para decantação retiram-se 2mL, adicionaram-se 2 mL da solução tampão (ácido acético glacial) e homogeneizou-se; adicionou-se 2 mL de azometina-H 0,45 g L<sup>-1</sup> e agitou; depois de 30 minutos as soluções foram transferidas para tubos colorimétricos e procedeu-se as leituras com filtro azul (420 nm), acertando o zero no espectrofotômetro de emissão com HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>.

#### c) Determinações de razões isotópicas ( $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ )

Nas amostras (folhas emitidas após a aplicação) dos tratamentos com  $^{10}\text{B}$ , o

$^{10}\text{B}$  e  $^{11}\text{B}$  foram determinados por espectrometria de massas com fonte de plasma (ICP-MS). Foi utilizado o ICP-MS Agilent 7500ce, do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas do CENA/USP, Piracicaba-SP.

Para a determinação da razão isotópica ( $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ ) do material vegetal amostrado, os extratos ácidos obtidos na quantificação do B total, quando necessário, foram diluídos em água purificada (resistividade  $\geq 18,2 \text{ M } \Omega \text{ cm}^{-1}$ , obtida em sistema Milli-Q) para aproximadamente  $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$  de B, e levados para o ICP-MS, sendo determinadas as razões isotópicas, conforme descrito por Bellato (1999).

Na quantificação da razão isotópica de B foram realizadas, nas amostras, leituras nos sinais de razões massa/carga ( $m/z$ ) 10 e 11, e a integração da área do pico de cada sinal, representa o número de contagem na razão  $m/z$ , devido às discriminações de massas que podem ocorrer no equipamento durante as análises. Os valores obtidos nas leituras de amostras de plantas que foram tratadas com o composto enriquecido em  $^{10}\text{B}$  (99%) que foram corrigidos pelos valores de leituras obtidas no mesmo tecido, de plantas que não receberam o elemento marcado. Pelo número de contagens obtidas nos picos e com as correções dos valores com as amostras das plantas do controle foi possível determinar a razão entre os isótopos  $^{11}\text{B}$  e  $^{10}\text{B}$  e quantificar a porcentagem de B nas folhas emitidas após a aplicação do  $^{10}\text{B}$  proveniente da solução aplicada nas folhas ou no substrato (% Bppf).

### **3.2.3.2 Análise isotópica**

O ICP-MS utilizado foi do tipo quadrupolo como fonte de plasma induzido em argônio. A otimização e a calibração de massas do sistema ICP-MS foram feitas conforme Bellato (1999). Para minimizar o efeito da memória, as amostras foram diluídas (diminuindo a concentração de B) e aumentou o tempo entre as amostras (permitindo uma melhor limpeza das partes do percurso da amostra).

### **3.2.3.3 Cálculo da % Bppf**

Para o cálculo da porcentagem de boro na parte proveniente do fertilizante ( $\%^{10}\text{Bppf}$ ), utilizou-se a Equação 1 (TRIVELIN, 2000), sendo a  $\%^{10}\text{B}$  natural das

amostras das plantas de 19,85% e %<sup>10</sup>B fertilizante de 99%.

$\%^{10}\text{B}_{\text{ppf}} = [(\%^{10}\text{B amostra} - \%^{10}\text{B natural}) / (\%^{10}\text{B fertilizante} - \%^{10}\text{B natural})] * 100$   
(Equação 1).

Para o cálculo da concentração do B nas folhas novas (aquelas emitidas após aplicação do <sup>10</sup>B) proveniente do fertilizante (B<sub>ppf</sub>) foi utilizado a Equação II.

$\text{B}_{\text{ppf}}, \text{ em mg kg}^{-1} = (\%^{10}\text{B}_{\text{ppf}} * \text{mg kg}^{-1} \text{ de B}) / 100$  (Equação II).

#### **3.2.3.4 Análise estatística**

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ( $P \leq 0,05$ ), usando-se o software Agroestat (BARBOSA; MALDONADO JR., 2015) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Experimento I – Omissão de boro em plantas de caupi

A omissão de boro diminuiu o acúmulo de B na raiz, no caule, nas folhas, nas vagens e grãos e também a eficiência de absorção do nutriente. O boro do tratamento controle é proveniente do boro na semente. A deficiência de B promoveu maior eficiência de utilização do nutriente, ou seja, maior capacidade de aproveitamento do B, propiciando maior massa seca em comparação ao tratamento controle (Tabela 1). Isto possivelmente é uma estratégia da planta em aumentar o uso do nutriente no metabolismo (STANGOULIS et al., 2001).

**Tabela 1.** Acúmulo de B na raiz (ACR), no caule e vagens (ACCV), nas folhas (ACF), nos grãos (ACG) e eficiência de absorção (EA) e eficiência de utilização (EU) de B em feijão-caupi em função da ausência e da presença de B na solução nutritiva. Jaboticabal, SP, Brasil, 2014.

Tratamentos	ACR <sup>1</sup>	ACCV <sup>2</sup>	ACF <sup>3</sup>	ACG <sup>4</sup>	EA <sup>5</sup>	EU <sup>6</sup>
	-----µg por planta-----				mg/g	g <sup>2</sup> /mg
B+	54,47	477,65	634,51	163,98	0,63	1125,82
B -	33,17	90,86	140,7	33,09	0,24	1940,23
F	34,70**	499,35**	223,65**	228,20**	93,85**	31,31**
C.V.%	18,4	13,6	19,0	19,7	20,4	21,3

\*\* Significativo ao nível de  $P \leq 0,05$ . <sup>1</sup>Boro acumulado na raiz; <sup>2</sup>Boro acumulado no caule e vagens; <sup>3</sup>Boro acumulado na folha; <sup>4</sup>Boro acumulado grãos; <sup>5</sup>Eficiência de absorção; <sup>6</sup>Eficiência de utilização.

A diminuição do acúmulo de B em plantas sob deficiência desse micronutriente resultou em redução da produção de massa seca da parte aérea e das raízes (Tabela 2). A omissão de B diminuiu a massa seca da raiz, do caule e vagens, das folhas e produção em 40%, 30%, 30% e 60%, respectivamente. Este prejuízo da deficiência de B no crescimento das raízes e da parte aérea também foi relatado por outros autores em *Vignaradiata* L. (SINGH, SHASHANK; SRIVASTAVA, 2014).

A falta de B provocou diminuição à produção (Tabela 2) devido, especialmente, às variáveis reprodutivas, dada a alta correlação dessa variável com a massa seca dos grãos ( $r=0,94^{**}$ ) e com o índice de colheita ( $r=0,94^{**}$ ), e havendo



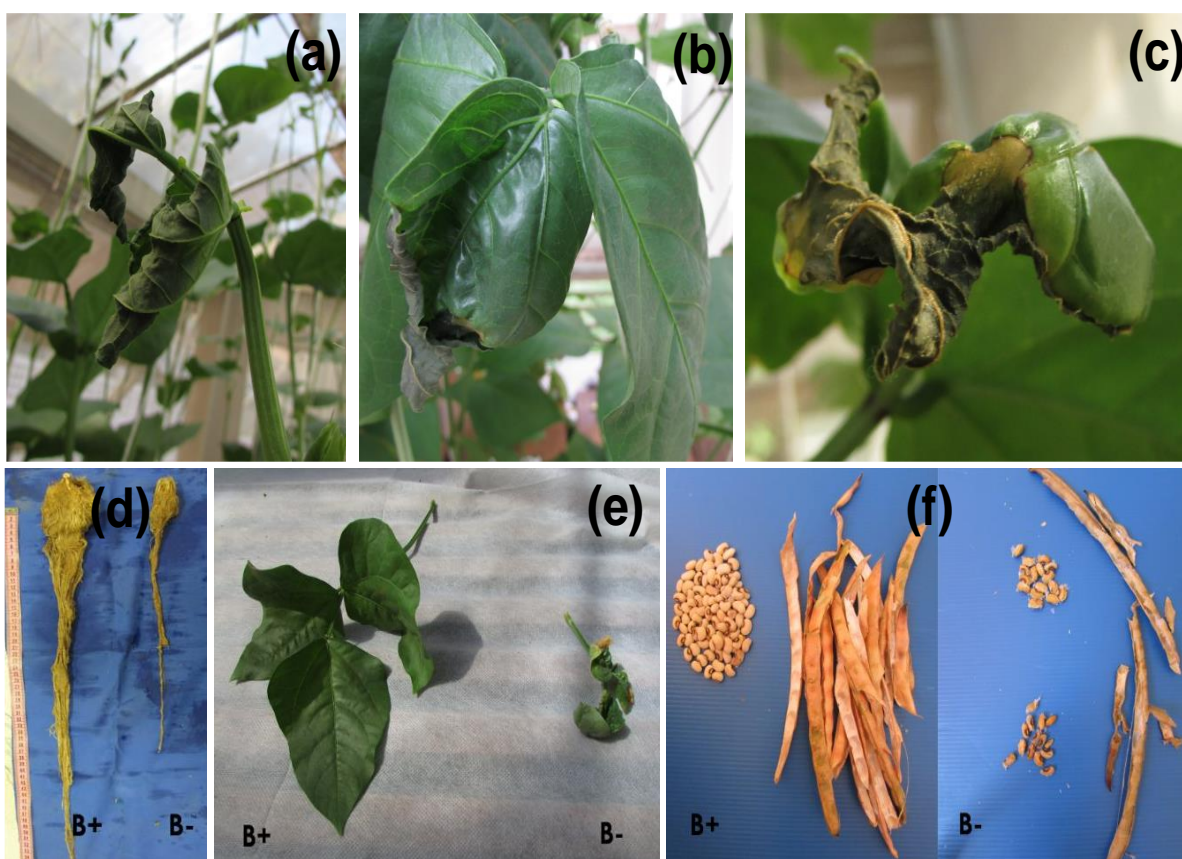
efeito sobre as variáveis vegetativas, massa seca da raiz ( $r=0,79^{**}$ ), massa seca das folhas ( $r=0,62^*$ ) e do caule ( $r=0,50^*$ ). Portanto, o maior prejuízo da falta de B nos cultivos foi nas variáveis reprodutivas em detrimento das vegetativas, fato também relatado em espécies de leguminosas como lentilha (*Lens culinaris* Medik) (KARAN; SINGH; RAMKEWAL, 2014) e em outras espécies como Green Gram (*Vignaradiata* L.) (PADBHUSHAN; KUMAR, 2015) e feijão comum *Phaseolus vulgaris* L. (HARMANKAYA et al., 2008). Outra importância da deficiência de B foi relatada por Bogiani e Rosolem (2012) que observaram rápida inibição do crescimento radicular em algodoeiro. Este fato, possivelmente seria consequência da síntese de auxina (CAMACHO-CRISTOBÁL et al., 2015).

**Tabela 2.** Área foliar (AF); Comprimento da raiz (CR); Área da raiz (AR); Densidade da raiz (DR); Massa seca da raiz (MSR); Massa seca do caule e das vagens (MSCV); Massa seca das folhas (MSF); Produtividade (Prod.) e Índice de colheita (IC) do feijão-caupi, em função da ausência e da presença de B na solução nutritiva. Jaboticabal, SP, Brasil, 2014.

Trat.	AF	CR	AR	DR	MSR	MSCV	MSF	Prod.	IC
	cm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>2</sup>	mmL <sup>-1</sup>	-----g por planta-----				%
B+	3099,6	6557,9	2642,5	3,3	2,0	16,05	9,7	11,7	72,9
B-	2356,6	4270,4	1542,6	2,1	1,2	11,65	6,8	4,3	34,8
F	51,9 <sup>**</sup>	52,1 <sup>**</sup>	23,7 <sup>**</sup>	52,1 <sup>**</sup>	23,77 <sup>**</sup>	29,08 <sup>**</sup>	18,1 <sup>**</sup>	84,9 <sup>**</sup>	69,0 <sup>**</sup>
C.V.%	8,4	13,1	24,1	13,1	23,3	13,2	18,6	22,2	19,0

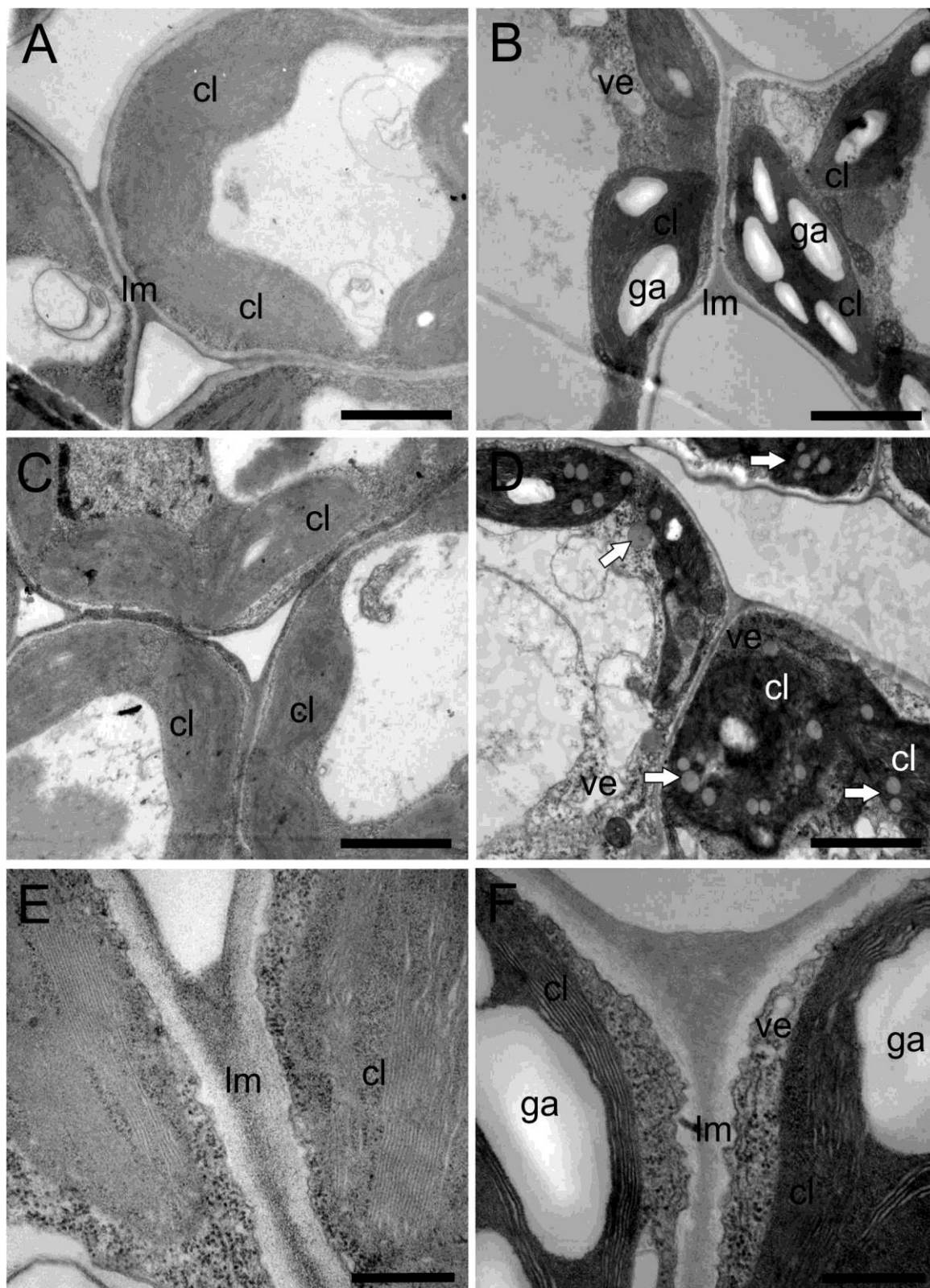
<sup>\*\*</sup> Significativo ao nível de  $P \leq 0,05$ .

Aos 25 dias após a transferência das mudas para solução nutritiva com ausência do micronutriente na solução, observou-se sintomas nas folhas novas, iniciando com deformação, ficando retorcidas e cloróticas, evoluindo para necrose (Figura 5a, 5b, 5c, 5e). No final do ciclo, as raízes pouco se desenvolveram (Figura 5d). Na fase reprodutiva, a deficiência promoveu diminuição no número de vagens e de grãos por planta e também no tamanho do grão, havendo deformação dos mesmos (Figura 5f).



**Figura 5.** Plantas de feijão-caupi cultivada em solução nutritiva na ausência de B (a, b, c) e na presença (+B) e na ausência (-B) de boro nas raízes (d), nas folhas (e), nos grãos e nas vagens por planta (f).

A análise ultraestrutural revelou espessamento da lamela média nas células do mesófilo de folhas de feijão-caupi com deficiência de B (Figura 6f) comparado com a presença deste micronutriente na solução nutritiva (Figura 6e). Este efeito da deficiência de B na mudança da estrutura da parede celular e no espessamento da lamela média foram relatados por Lavres Júnior et al. (2012) em mamoneira (*Ricinus communis* L) e Pan et al. (2012) em *Brassica napus*. Isto se deve ao fato de que na ausência de B, as novas cadeias pécnicas secretadas não são ligadas à parede celular, o que pode originar um formato esponjoso, implicando em aparente engrossamento da parede (CHATTERJEE et al. 2014). Isto explica o surgimento da deformação das folhas mais jovens observadas no feijão-caupi com deficiência do micronutriente (Figura 5e).



**Figura 6.** Ultraestrutura do mesófilo foliar de plantas de feijão-caupi na presença de boro (+B) (a, c, e) e na ausência de boro (-B) (b, d, f). cl: cloroplasto; ga: grão de amido; ve: vesícula; lm: lamela média. Setas indicam corpos lipídicos. Barras: a-d= 2μm; e-f= 500 nm.

Um grande número de grãos de amido nos cloroplastos foi observado em plantas deficientes em boro (Figura 6b, 6d e 6f). Resultados semelhantes foram constatados nas células das folhas de *Vigna unguiculata* cultivar Walp. P152 (INBARAJ; MUTHUCHELIAN, 2011). Os autores explicam que o acúmulo de amido observado nas folhas deficientes em B pode ser suficientemente elevado por afetar a estrutura e a função dos cloroplastos, conduzindo a uma diminuição no conteúdo de clorofila.

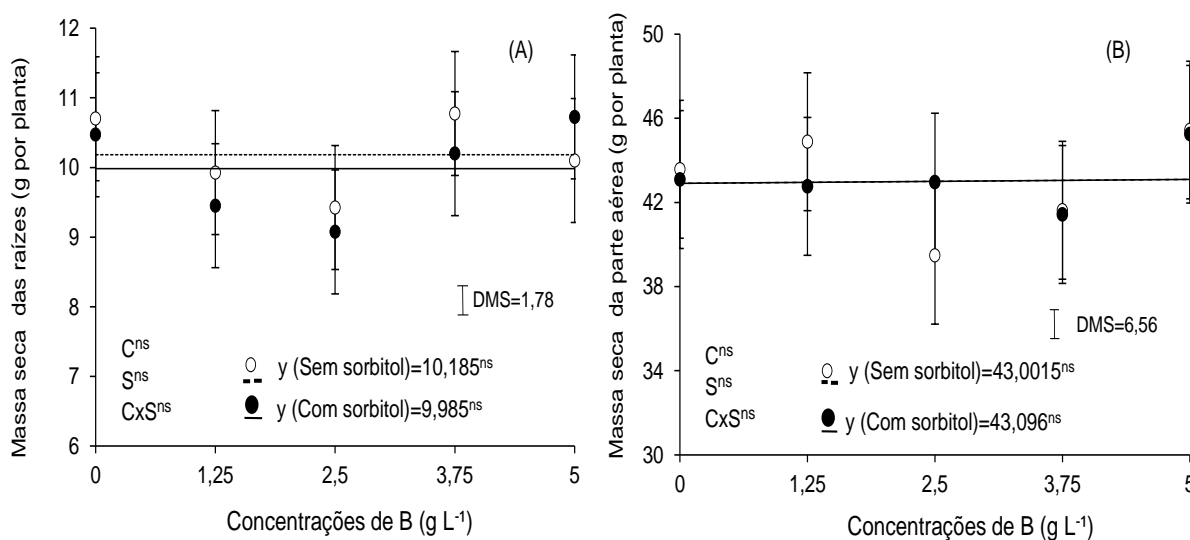
O aumento no número de grãos de amido nos cloroplastos pode desencadear decréscimos nas taxas fotossintéticas (ZHANG et al., 2015) e pode alterar a estrutura dos cloroplastos, levando à redução do teor de clorofila (INBARAJ; MUTHUCHELIAN, 2011). Isso é explicado, pois a biossíntese do amido ocorre no interior dos cloroplastos e amiloplastos, usando como material de base, a sacarose produzida a partir de fotossíntese (GALLIARD; BOWLER, 1987).

Supõe-se que o excesso de B pode afetar indiretamente a formação de amido por causa das propriedades do ácido bórico para formar complexos com um grande número de açúcares. Embora B não forme complexos com sacarose (MARSCHNER, 1995), este micronutriente pode formar complexos com outros açúcares, fenóis, ácidos orgânicos e ácidos poliméricos (DEMBITSKY et al., 2002).

A presença de corpos lipídicos foi observada principalmente nas células das plantas na ausência de B (Figura 6d) em relação à presença do micronutriente no meio de cultivo (Figura 6c). Essas alterações no número de corpos lipídicos localizadas dentro dos cloroplastos, estão relacionadas com o aumento do estresse oxidativo no aparato fotossintético, aumentando a senescência foliar (AUSTIN et al., 2006). O consequente acúmulo de fenóis e o aumento da atividade da polifenoloxidase levam a compostos intermediários altamente reativos, tais como as quinonas. Estes compostos, bem como os fenóis fotoativados, são altamente efetivos na produção de radicais superóxido, os quais são potencialmente capazes de danificar as membranas em decorrência da peroxidação de lipídeos (KIRKBY; RÖMHELD, 2007), fato que contribuiu para induzir sintomas de necrose foliar, observados nas plantas do feijão-caupi cultivadas na solução nutritiva na ausência de boro.

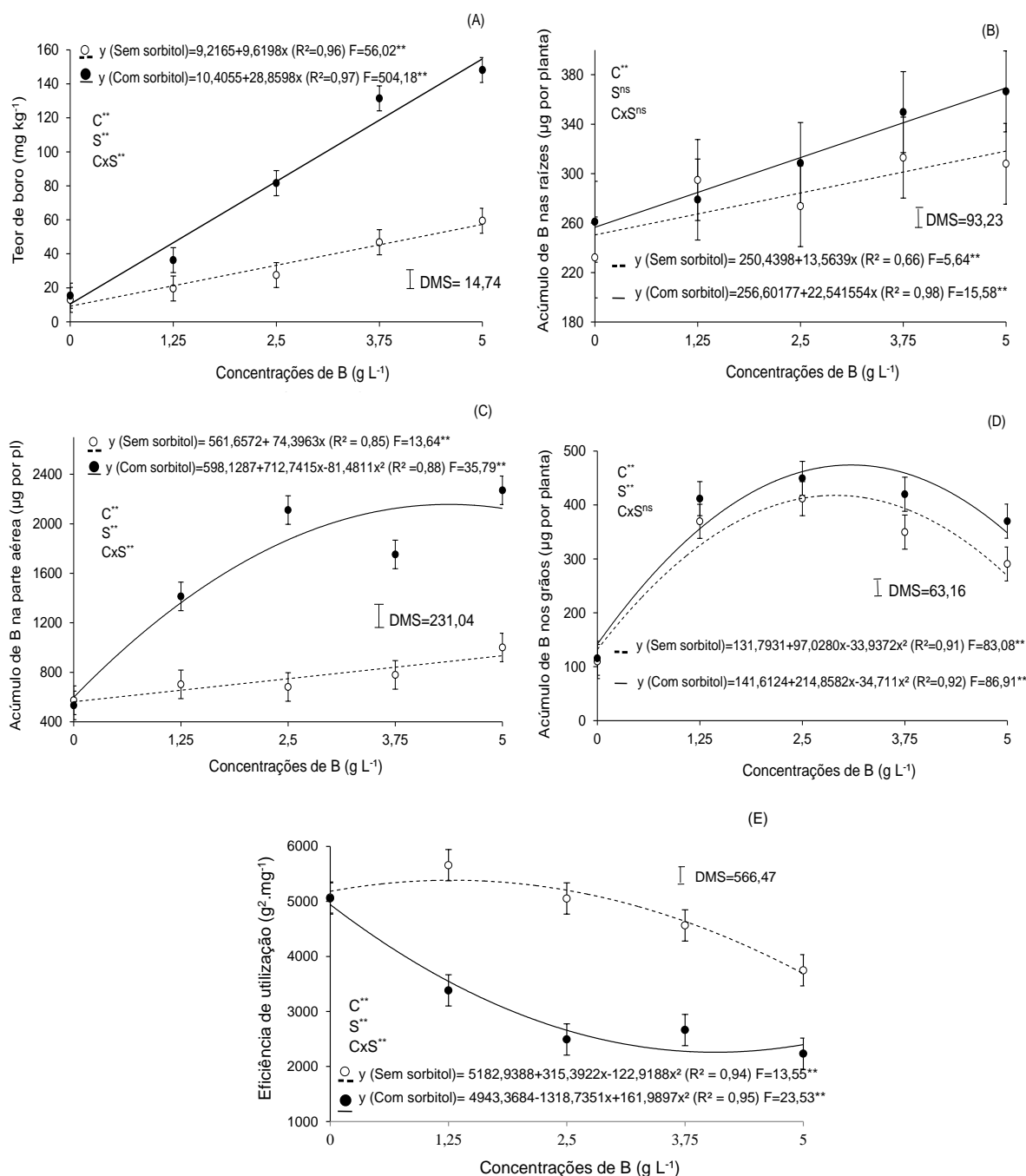
## 4.2 Experimento II - Concentrações de boro, via foliar, no desenvolvimento e teor de B em plantas de caupi

A aplicação de boro foliar com e sem sorbitol não afetou a produção de massa seca das raízes e da parte aérea do feijão-caupi (Figura 7A e 7B), podendo indicar a baixa exigência da planta na fase vegetativa. Embora não tenha informação para feijão-caupi, existem relatos indicando a baixa resposta da planta ao B no crescimento de órgãos vegetativos (PRADO, 2008).



**Figura 7.** Massa seca da planta das raízes (A) e massa seca da parte aérea (B) em função da concentração de boro, na solução aplicada via foliar, em caupi. Jaboticabal-SP, Brasil, 2014. DMS: Diferença Mínima Significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Houve interação nas concentrações de B e uso de sorbitol para teor de B foliar, sendo que a aplicação de B foliar promoveu aumento linear no teor foliar de B, atingindo valor máximo de 57 e 155 mg kg<sup>-1</sup> na ausência e na presença de sorbitol, respectivamente, na maior concentração adotada (5 g L<sup>-1</sup>) (Figura8A).



**Figura 8.** Teor foliar de boro (A), acúmulo de B nas raízes (B), na parte aérea (C), nos grãos (D) e eficiência de utilização (E) em função da concentração de boro, aplicada via foliar em feijão-caupi. \*\*Significativo a 1% de probabilidade, <sup>ns</sup>Não significativo pelo teste F. DMS: Diferença Mínima Significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A aplicação foliar de boro, independentemente da presença de sorbitol promoveu incrementos lineares no acúmulo de B nas raízes (Figura 8B). No entanto, na presença do sorbitol levou a maior acúmulo de B na parte aérea (2157 µg por

planta) na concentração de B igual a  $4,37 \text{ g L}^{-1}$  em relação à ausência do sorbitol que levou a acúmulo de B na parte aérea inferior ( $887 \text{ } \mu\text{g}$  por planta) com uso da maior concentração de B foliar (Figura 8C). O maior acúmulo de B na parte aérea em função da aplicação de B foliar associado com sorbitol, possivelmente ocorreu devido à ação do poliól no processo de absorção do nutriente aplicado na planta. Esta ação benéfica do poliól na absorção de B foliar foi relatada por outros autores na cultura da soja (WILL et al., 2012). O sorbitol melhorou a absorção foliar, provavelmente através da redução do ponto de deliquescência da calda, pois segundo Salameh, Mauer e Taylor (2005) o valor deste ponto para sorbitol (69%) é inferior ao ácido bórico (98%). Portanto, a solução com B e sorbitol provavelmente estendeu a duração do tempo de secamento da gota sobre a superfície da folha (WILL et al., 2012).

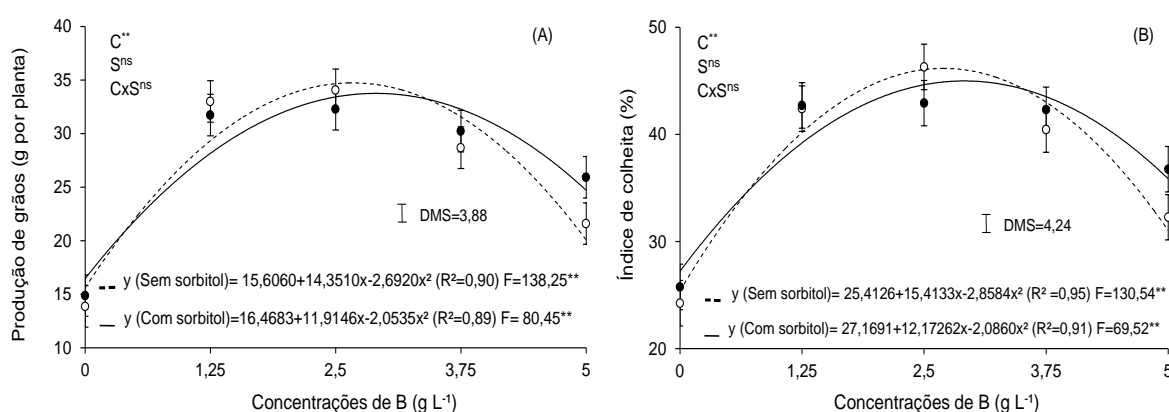
A aplicação foliar de B incrementou o acúmulo de B nos grãos independentemente da presença do sorbitol na calda de pulverização (Figura 8D), atingindo o máximo de 418 e 474  $\mu\text{g}$  por planta na ausência e na presença de sorbitol, nas concentrações de B de  $2,90$  e  $3,09 \text{ g L}^{-1}$ , respectivamente (Figura 8D).

Embora a aplicação de B foliar tenha promovido incremento da produção, o acréscimo do sorbitol na calda não potencializou este efeito. A pulverização foliar com boro favoreceu o maior acúmulo de B na parte vegetativa especialmente com a presença do sorbitol (Figura 8C). Mas na prática não reflete na parte reprodutiva, pois maior acúmulo do micronutriente no grão não depende da presença do sorbitol na calda (Figura 7D). Isto indica que, provavelmente, o uso do sorbitol não tenha favorecido maior redistribuição do B no feijão-caupi, o que possibilitaria maior acúmulo do nutriente no grão induzindo maior efeito residual da adubação foliar e incremento na produção da cultura. A adubação foliar com boro, associada com a aplicação exógena do sorbitol, não é viável para feijão-caupi possivelmente devido à baixa estabilidade do complexo formado. Isso ocorre porque a formação de ésteres de B com polióis são estáveis quando a relação entre o poliól e o B excede 100:1 (HU; BROWN, 1996) e no presente experimento as relações usadas foram menores variando de 18:1 na concentração  $5 \text{ g L}^{-1}$  de B e 73:1 na concentração de  $1,25 \text{ g L}^{-1}$  de B.

O emprego do B foliar diminuiu a eficiência de utilização do micronutriente

especialmente na presença do sorbitol na calda de pulverização (Figura 8E). As plantas sem aplicação de sorbitol teve menor conteúdo de B nos tecidos vegetais, havendo alta eficiência de utilização. Isto possivelmente é uma estratégia da planta em aumentar o uso do nutriente no metabolismo (STANGOULIS et al., 2001). O uso do sorbitol, ao promover maior conteúdo de B na parte aérea (Figura 8C), pode ter induzido excesso do nutriente não utilizado no metabolismo, portanto, houve menor eficiência de uso do B (Figura 8E).

Houve aumento quadrático na produção do feijão-caupi atingindo valor máximo de 35 e 34 g por planta, nas concentrações 2,6 e 2,9 g L<sup>-1</sup>, na ausência e na presença de sorbitol, respectivamente (Figura 9A). A maior produção de grãos do feijão-caupi em função da concentração de B foliar ocorreu provavelmente devido a melhoria no estado nutricional da planta em boro (Figura 9A). Nota-se que teores foliares entre 21,5 e 35,0 mg kg<sup>-1</sup> na ausência do sorbitol, e 56,0 e 94,0 mg kg<sup>-1</sup> na presença do sorbitol foram responsáveis por 90 a 100% da produção máxima do feijão-caupi, respectivamente. Como o uso do sorbitol não induziu maior produção, sugere-se como faixa de teor foliar adequado para B de 21,5 a 33 mg kg<sup>-1</sup> para feijão-caupi. Resultado semelhante foi relatado por Debnath et al. (2015), que indicaram teor adequado de B igual a 24,5 mg kg<sup>-1</sup>, considerando a terceira folha completamente expandida.



**Figura 9.** Produção de grãos (A) e índice de colheita (B), em função da concentração de boro, aplicada via foliar em feijão-caupi. Jaboticabal-SP, Brasil, 2014. \*\*Significativo a 1% de probabilidade, <sup>ns</sup>Não significativo pelo teste F. DMS: Diferença Mínima Significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Resultados semelhantes do efeito do boro via foliar na produção também foram observados em outras fabáceas como alfafa (*M. sativa* L.) (DORDAS, 2006) e feijão-comum (*P. vulgaris*) (RAHMAN et al., 2014), não havendo informação divulgada para feijão-caupi. Este aumento na produção pode ser devido ao efeito do boro na fase reprodutiva, pois duas pulverizações ocorreram nesta fase (R1 e R2), sendo conhecido o efeito do nutriente em manter o estigma receptivo e pegajoso, tornando assim, grãos de pólen mais férteis, conseqüentemente aumentando a polinização, o número de frutos, e a massa das sementes (PADBHUSHAN; KUMAR, 2015).

Acrescenta-se ainda que, a maior concentração de B na calda com a adição de sorbitol induziu maior produção de grãos em relação à mesma concentração na ausência do sorbitol (Figura 9A). Isto indica que o uso do sorbitol possivelmente atenuou a toxicidade de B na planta de caupi. O efeito benéfico do sorbitol na mitigação de B foi demonstrada em *Oryza sativa* L. (THEERAKULPISUT; GUNNULA, 2012), indicando a necessidade de estudos específicos sobre o tema.

De forma semelhante à produção, a aplicação foliar de B promoveu aumento quadrático no índice de colheita, atingindo valor máximo de 46 e 45% nas concentrações 2,6 e 2,9 g L<sup>-1</sup> na ausência e na presença de sorbitol, respectivamente (Figura 9B). Estes valores de índices de colheita foram maiores que os relatados por Subbarayappa et al. (2009) em condições de campo com caupi 18-23%, possivelmente devido ao uso de cultivares distintas.

O benefício do B na presença ou na ausência de sorbitol na produção do feijão-caupi apresentou melhorias na parte reprodutiva da planta, havendo alta correlação entre a produção e o índice de colheita ( $r = 0,97^{**}$ ) e detrimento a parte vegetativa sem haver correlação com a massa seca da parte aérea ( $r = -0,14^{ns}$ ) e da raiz ( $r = -0,20^{ns}$ ). Portanto, ressalta-se a importância do B foliar no desenvolvimento reprodutivo de fabáceas, em detrimento a parte vegetativa, fato amplamente relatado na literatura (DORDAS, 2006).

### **4.3 Experimento III - Redistribuição do $^{10}\text{B}$ absorvido por folhas e raízes em plantas de feijão-caupi**

#### **4.3.1 Efeito dos tratamentos no crescimento e na produção de massa seca**

As variáveis de crescimento da raiz (comprimento, diâmetro e área) não foram afetadas pelos tratamentos. A aplicação de B em feijão-caupi, seja via foliar, radicular ou ambos, proporcionou resposta a planta, em relação ao controle, possibilitando maior área foliar e massa seca de raiz refletindo na massa seca da planta inteira (Tabela 3). Como visto no experimento anterior a adubação foliar boratada não teve efeito considerável no desenvolvimento vegetativo do feijão-caupi devido à aplicação tardia do micronutriente.

**Tabela 3.** Altura (ALT), área foliar (AF), densidade da raiz (DR), massa seca das folhas que receberam aplicação foliar (FRAF), das folhas novas emergidas após aplicação foliar (folha nova), caule, parte aérea, raiz e da planta inteira, em função da aplicação de boro nas plantas de caupi.

Tratamentos	ALT	AF	DR	Massa seca					
				FRAF	Folha Nova	Caule	Parte aérea	Raiz	Planta inteira
	cm	cm <sup>2</sup>	mm/mL	-----g por vaso -----					
S <sub>0</sub> F <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	24 b	608 c	1,21 b	1,84 b	1,43 b	0,77 b	3,8 c	0,75 c	4,5 c
S <sub>0</sub> F <sup>10</sup> B	36 a	1041 ab	1,64 a	2,58 b	1,92 ab	0,98 ab	5,6ab	1,28 b	6,7ab
SBF <sup>10</sup> B	38 a	1216 a	1,22 ab	3,44 a	2,25 a	1,28 a	6,9 a	1,90 a	8,62 a
S <sup>10</sup> BF <sub>0</sub>	31,4 ab	932 b	1,29 ab	2,48 b	1,80 ab	1,02 ab	5,22 bc	1,25 b	6,6 b
F	5,84**	18.64**	3,73*	12,18**	7,32**	5,73**	10,21**	29,67**	11,18**
DMS	18,26	239,65	0,43	0,76	0,51	0,35	1,63	0,35	2,04
CV, %	12,5	13,9	17,7	16,3	15,2	18,9	16,8	14,8	17,1

Média com mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. <sup>(1)</sup> S<sub>0</sub>F<sub>0</sub> = sem B no substrato, sem adubação foliar; S<sub>0</sub>F<sup>10</sup>B = sem B no substrato, com adubação foliar <sup>10</sup>B; SBF<sup>10</sup>B = com B no substrato, com adubação foliar <sup>10</sup>B; S<sup>10</sup>BF<sub>0</sub> = com <sup>10</sup>B no substrato, sem adubação foliar. \* e \*\* significativo (P<0,05) e (P<0,01), pelo teste F, respectivamente.

### 4.3.2 Teor de boro nas folhas novas

O teor de boro das folhas novas nos tratamentos que foram aplicados esse micronutriente, não diferiram entre si e apresentaram teor adequado para o desenvolvimento das plantas, uma vez que no experimento anterior relatamos o teor entre 21 e 35 mg kg<sup>-1</sup> é considerado ideal para as plantas de caupi (Tabela 4). Nos tratamentos S<sub>0</sub>F<sup>10</sup>B e SBF<sup>10</sup>B, onde foi aplicada a adubação foliar, verificaram-se resultados semelhantes não diferindo estatisticamente. Já no tratamento S<sup>10</sup>BF<sub>0</sub> verificou-se menor porcentagem de <sup>10</sup>B nas folhas de 36,56%, ou seja, a menor parte do nutriente na folha nova provém de sua aplicação no substrato.

**Tabela 4.** Teores médios de B nas folhas novas de caupi e porcentagem de <sup>10</sup>B na planta proveniente do fertilizante.

Tratamento	<sup>10</sup> B (mg kg <sup>-1</sup> )	<sup>10</sup> B (%)	Bppf (%) <sup>(1)</sup>	Bppf (mg kg <sup>-1</sup> )
S <sub>0</sub> F <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>	9,69 b	20,59 c	0,87 c	0,07 c
S <sub>0</sub> F <sup>10</sup> B	26,60 a	69,29 a	62,43 a	16,59 a
SBF <sup>10</sup> B	22,70 a	66,64 a	59,09 a	12,55 b
S <sup>10</sup> BF <sub>0</sub>	10,95 b	36,56 b	21,06 b	2,17 c
F	38,07**	231,61**	231,83**	95,31**
DMS	5,53	6,29	7,95	3,31
CV	17,5	7,2	12,3	23,3

Média com mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. <sup>(1)</sup>Bppf (Porcentagem de B nas folhas emitidas após a aplicação do <sup>10</sup>B derivado do fertilizante). <sup>(2)</sup>S<sub>0</sub>F<sub>0</sub> = sem B no substrato, sem adubação foliar; S<sub>0</sub>F<sup>10</sup>B = sem B no substrato, com adubação foliar <sup>10</sup>B; SBF<sup>10</sup>B = com B no substrato, com adubação foliar <sup>10</sup>B; S<sup>10</sup>BF<sub>0</sub> = com <sup>10</sup>B no substrato, sem adubação foliar. \*\* significativo (P<0,01), pelo teste F.

Os valores da %Bppf foram maiores nos tratamentos S<sub>0</sub>F<sup>10</sup>B e SBF<sup>10</sup>B comparado aos tratamentos S<sub>0</sub>F<sub>0</sub> e S<sup>10</sup>BF<sub>0</sub> (Tabela 4). Do boro absorvido pelas folhas que receberam a pulverização, 62,43 e 59,09% nos tratamentos S<sub>0</sub>F<sup>10</sup>B e SBF<sup>10</sup>B foram redistribuídos para as folhas novas. No tratamento S<sup>10</sup>BF<sub>0</sub>, a aplicação de <sup>10</sup>B no substrato foi absorvido pelas raízes e transportado para os órgãos em crescimento apresentando valores nas folhas de 21,06%. Essa concentração de B no tratamento S<sup>10</sup>BF<sub>0</sub> pode ser explicada porque o B ao ser absorvido pelas raízes é transportado para a parte aérea da planta pelo fluxo

transpiratório, o nutriente se dirigiu para as partes da planta que estão em atividade metabólica.

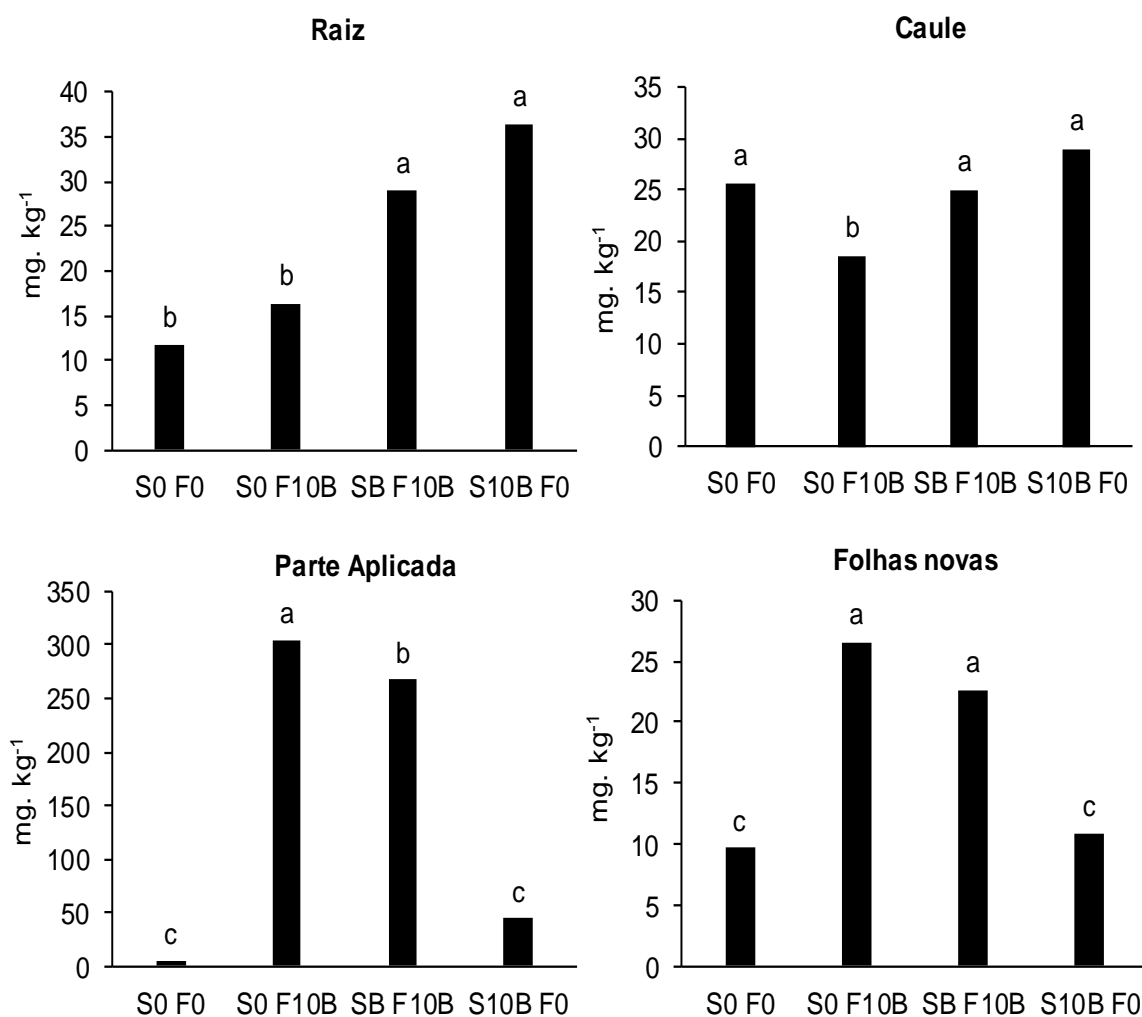
A concentração do B proveniente da solução nutritiva foi de 16,59; 12,55 e 2,17 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, para S<sub>0</sub>F<sup>10</sup>B; SBF<sup>10</sup>B e S<sup>10</sup>BF<sub>0</sub>. As concentrações de boro nos tratamentos S<sub>0</sub>F<sup>10</sup>B e SBF<sup>10</sup>B nas folhas foram suficientes para atender a exigência nutricional de B no tecido novo.

O boro foi retranslocado dos tecidos velhos, ou que receberam aplicação do nutriente, para os novos, nas plantas de caupi. A mobilidade do boro é mais frequente nas plantas que apresentam o boro complexado a carboidratos como sorbitol, manitol e ducitol. Entretanto, existe um polissacarídeo, ramnogalacturonano II que pode se complexar com o boro tornando-o, possivelmente, móvel na planta (HU; BROWN, 1997). Portanto, como no presente trabalho foi verificada a mobilidade do boro, o que indica que possivelmente na presença desses grupos de compostos orgânicos, importantes para propiciar a mobilidade desse micronutriente em planta.

#### **4.3.3 Concentração de B total e mobilidade**

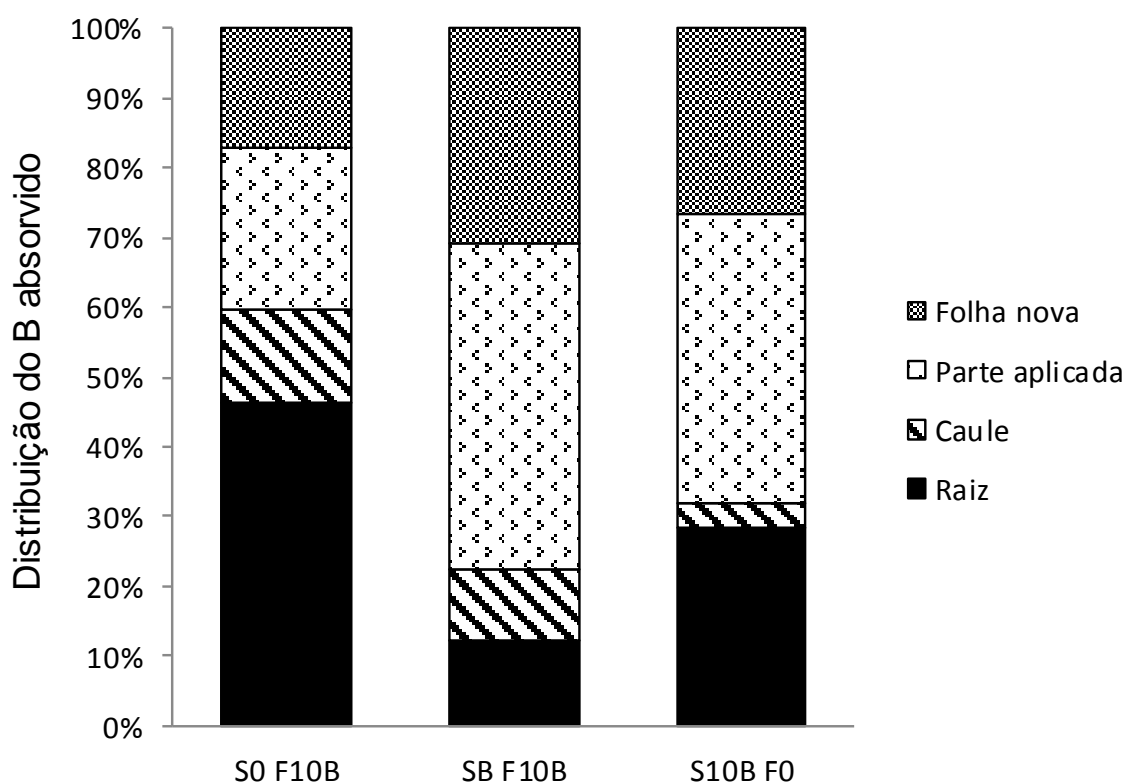
A concentração de B nas folhas adubadas é maior que a concentração do elemento em outras partes da planta (Figuras 2a, b, c, d), resultados semelhantes aos obtidos por Konsaeng, Dell e Rerkasem (2010) na cultura do amendoim.

Quando as plantas de caupi foram adubadas com boro no substrato (S<sup>10</sup>BF<sub>0</sub>) com teor adequado de B (46 µmol/L de B), a concentrações deste nutriente nas raízes e no caule (Figuras 10a e 10b) foram maiores que nas folhas adubadas e novas (Figuras 10c e 10d), demonstrando assim, que a aplicação do B no substrato foi menos eficiente em nutrir as partes jovens da planta do que a aplicação de B nas folhas.



**Figura 10.** Concentração total de boro na raiz, caule, parte aplicada e folhas novas nos diferentes tratamentos. S<sub>0</sub>F<sub>0</sub> = sem B no substrato, sem adubação foliar; S<sub>0</sub>F<sup>10</sup>B = sem B no substrato, com adubação foliar <sup>10</sup>B; SB<sup>10</sup>B = com B no substrato, com adubação foliar <sup>10</sup>B; S<sup>10</sup>B F<sub>0</sub> = com <sup>10</sup>B no substrato, sem adubação foliar.

A técnica isotópica permitiu localizar o B absorvido pela planta, tanto pelas raízes quanto pelas folhas. O <sup>10</sup>B aplicado às raízes ou folhas, confirmou o movimento de B das folhas onde houve aplicação de B foliar para os tecidos mais novos. O B absorvido pelos órgãos avaliados da planta localizou-se principalmente nas partes que receberam a adubação via substrato e foliar (Figura 11).



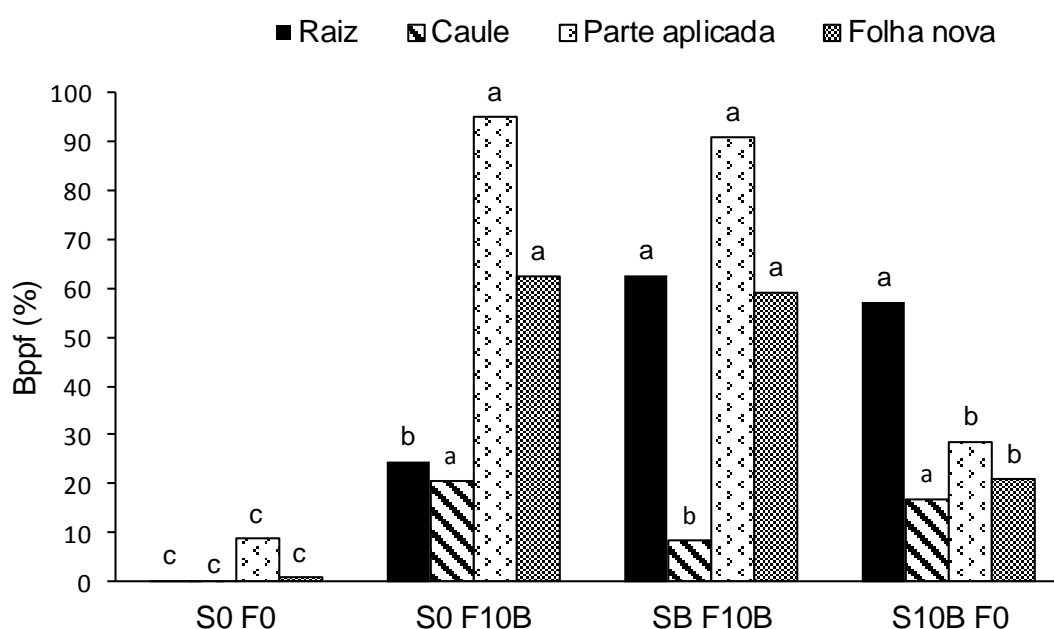
**Figura 11.** Distribuição do B acumulado nos diferentes órgãos do feijão-caupi em função da aplicação dos tratamentos ( $S_0F_0$  = sem B no substrato, sem adubação foliar;  $S_0F^{10}B$  = sem B no substrato, com adubação foliar  $^{10}B$ ;  $SBF^{10}B$  = com B no substrato, com adubação foliar  $^{10}B$ ;  $S^{10}BF_0$  = com  $^{10}B$  no substrato, sem adubação foliar).

Pequena parcela do B absorvido foi redistribuída para o caule, e maior acúmulo nas folhas que nasceram depois da pulverização foliar, demonstrando a mobilidade do nutriente para as folhas. A aplicação de  $^{10}B$  via foliar, 31% e 27% do B encontra-se nas folhas novas e 10% e 4% no caule, enquanto no tratamento com  $^{10}B$  via substrato, 17% encontram-se nas folhas novas e 14% no caule. O tratamento foliar foi melhor que o radicular, pelo fato que foram realizadas mais de uma aplicação foliar (3 pulverizações) e iniciando na fase vegetativa e pelo fato que o B sendo móvel haveria maior efeito residual da aplicação, ou seja, teria melhor distribuição do nutriente para atender a demanda da folha nova emergida após a aplicação e com reflexos benéficos na nutrição e no desenvolvimento da planta. Portanto, esse trabalho indica que a aplicação foliar de B em 3 pulverizações iniciando na fase vegetativa é viável dado a sua mobilidade na planta.

Estudo realizado na cultura do amendoim demonstrou um declínio na

abundância (%  $^{10}\text{B}$ ), proveniente da absorção radicular ou foliar, em folhas e flores que se desenvolveram posteriormente a adubação com o boro marcado (KONSAENG; DELL; RERKASEM, 2010).

A maior porcentagem de boro proveniente do fertilizante nas folhas novas na adubação via foliar, complementada com adubação via raiz foram semelhantes, portanto, apenas a aplicação via foliar atenderia a demanda da planta. Havendo menor custo, pois eliminaria uma aplicação (Figura 12). Picchioni et al. (1995), também utilizando a técnica isotópica, demonstraram em estudo com espécies do gênero *Malus*, *Pyrus* e *Prunus*, que 70 a 80% do B absorvido pelas folhas foi redistribuído para outras partes das plantas em 24 horas.



**Figura 12.** Percentual de boro na planta proveniente do fertilizante na raiz, caule, parte aplicada e folhas novas nos diferentes tratamentos.  $S_0F_0$  = sem B no substrato, sem adubação foliar;  $S_0F^{10}B$  = sem B no substrato, com adubação foliar  $^{10}\text{B}$ ;  $SBF^{10}B$  = com B no substrato, com adubação foliar  $^{10}\text{B}$ ;  $S^{10}BF_0$  = com  $^{10}\text{B}$  no substrato, sem adubação foliar.

A adubação foliar com boro tem resultados com espécies que não indicam resposta como tomate (GONDIM, 2009), couve-flor (ALVES, 2009) e outras com resposta ao micronutriente como feijão-caupi, referente ao experimento anterior (SILVA et al., dados não publicados), amendoim (KONSAENG; DELL; RERKASEM, 2010), abacaxi (SIEBENEICHLER et al., 2005), ameixeira, cerejeira, macieira



(BROWN; HU, 1998) e brócolis (SHELP, 1988). Portanto, os trabalhos citados em que não foram constatadas respostas a adubação foliar com B, os autores indicaram que o micronutriente é imóvel. Nos trabalhos que indicaram resposta como feijão-caupi e demais espécies há evidências, isso se deve ao fato da sua mobilidade na planta, conforme os resultados discutidos anteriormente, na presente pesquisa.

## 5 CONCLUSÕES

A deficiência de boro em plantas de feijão-caupi diminuiu a eficiência de absorção de B, embora aumente a eficiência de uso do nutriente. Os maiores prejuízos ocorrem nas variáveis reprodutivas e no crescimento da raiz em relação à produção de folhas e caule. A deficiência de boro induz alterações celulares como espessamento na lamela média e acúmulo de amido nos cloroplastos foliares que reflete nos sintomas visuais característicos para o feijão-caupi.

A maior produção de grãos de caupi (90 – 100% da produção máxima) ocorre quando o B foi pulverizado a 2,62 g L<sup>-1</sup> de B, sem sorbitol, tendo como fonte o ácido bórico, nas épocas V6, R1 e R2 e teor foliar de 35 mg kg<sup>-1</sup> de B.

A adubação foliar com boro, associada com sorbitol, incrementou a absorção do micronutriente na parte vegetativa, mas não refletiu na produção do feijão-caupi.

Há mobilidade de boro aplicado via foliar em plantas de caupi, havendo viabilidade da adubação foliar para atendimento da demanda desse nutriente no feijão-caupi durante o seu desenvolvimento vegetativo.

## 6 REFERÊNCIAS

ALVES, A. U. **Absorção e mobilidade do boro em plantas de repolho e de couve-flor**. 2009. 64f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2009.

AMARAL, J. A. B.; BELTRÃO, N. E. DE M.; SILVA, M. T. **Zoneamento agrícola do feijão-caupi no Nordeste Brasileiro: Safra 2005/2006, Estado da Paraíba**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2005, 9 p. (Comunicado Técnico, 253).

ARAÚJO, J. P. P.; RIOS, G. P.; WATT, E. E.; NEVES, B. P.; FAGERIA, N. K.; OLIVEIRA, I. P. de; GUIMARÃES, C. M.; SILVEIRA FILHO, A. **Cultura do caupi. *Vigna unguiculata* (L.) Walp; descrição e recomendações técnicas de cultivo**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1984, 82 p. (Circular Técnica, 18).

ATI, A. S.; ALI, N. S. The Effect of Boron Fertilization on Faba bean (*Vicia faba* L.) yield, fertilizer and water productivity. In: RESEARCHES OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE, 1., 2011. **Anais...** Kermanshah: Babylon and Razi Universities, 2011. p. 81–86. ISSN 2072–3875.

AUSTIN, J. R.; FROST, E.; VIDY, P. A.; KESSLER, F.; STAEHELIN, L. A. Plastoglobules are lipoprotein subcompartments of the chloroplast that are permanently coupled to thylakoid membranes and contains biosynthetic enzymes. **The Plant Cell**, Rockville, v. 18, p. 1693–1703, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1105/tpc.105.039859>>.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **AgroEstat versão 1.0** – sistema de análises estatísticas de ensaios agronômicos. Jaboticabal: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2015.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).

BELLALOU, N.; BROWN, P. H.; ABAHAYA, M.; DANDEKAR, A. M. Manipulation of in vivo sorbitol production alters boron uptake and transport in tobacco. **Plant Physiology**, Jena, v. 119, p. 735–741, 1999.

BELLATO, A. C. D. S. **Determinação isotópica e elementar de boro em amostras vegetais por espectrometria de massas com fonte de plasma (ICP-MS)**. 1999. 71f. Dissertação (Mestrado). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

BIÈVRE, P. D.; BARNES, I. L. Table of the isotopic composition of the elements as determined by mass spectrometry. **International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes**, Amsterdam, v. 65, p. 211–230, 1985.

BOARETTO, A. E.; UETA, F. Z.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M. Acúmulo de nutrientes em laranja 'pêra'/'cravo' em início de produção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 18., 2004. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBF, 2004. 1 CD-ROM.

BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T. Uso de isótopos como traçadores em fertilidade do solo e nutrição de plantas. In: CONGRESSO FERTBIO 2004. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Fertbio, 2004.

BOARETTO, R. M. **Boro  $^{10}\text{B}$  em laranja: absorção e mobilidade**. 2006. 120f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BOARETTO, R. M.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS, D.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E. Boron uptake and distribution in field grown citrus trees. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 34, p. 839–849, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2011.544353>>.

BOGIANI, J. C.; ROSOLEM, C. A. Compared boron uptake and translocation in cotton cultivars. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000500014>>.

BROWN, P. H.; HU, H. Phloem boron mobility in diverse plant species. **Botânica Acta**, Stuttgart, v. 111, p. 331–335, 1998. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1438-8677.1998.tb00717.x>>.

BROWN, P. H.; SHELP, B. J. Boron mobility in plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, p. 85–101, 1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1004211925160>>.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J.; MARTÍN-REJANO, E. M.; HERRERA-RODRÍGUEZ, M. B.; NAVARRO-GOCHICOA, M. T.; REXACH, J.; GONZÁLEZ-FONTES, A. Boron deficiency inhibits root cell elongation via an ethylene/auxin/ROS-dependent pathway in *Arabidopsis* seedlings. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 28, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erv186>>.

CAMPOS, F. L.; FREIRE FILHO, F. R.; LOPES, A. C. A.; RIBEIRO, V. Q.; SILVA, R. Q. B.; ROCHA, M. M. Ciclo fenológico em caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp): Uma proposta de escala de desenvolvimento. **Revista Científica Rural**, Bagé, v. 5, n. 2, p. 110–116, 2000.

CHATTERJEE, M.; TABI, Z.; GALLI, M.; MALCOMBER, S.; BUCK, A.; MUSZYNSKI, M.; GALLAVOTTIA, A. The Boron efflux transporter rotten ear is required for maize inflorescence development and fertility. **The Plant Cell**, Rockville, v. 26, p. 2962–2977, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1105/tpc.114.125963>>.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Décimo segundo levantamento de avaliação da safra 2012/2013**. Brasília, 2013. 30 p. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13\\_09\\_10\\_16\\_05\\_53\\_boletim\\_portugues\\_setembro\\_2013.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_09_10_16_05_53_boletim_portugues_setembro_2013.pdf)> Acesso em: 20 out. 2013.

CRAUFURD, P. Q.; QI, A.; ELLIS, R. H.; SUMMERFIELD, R. J.; ROBERTS, E. H. Development in cowpea (*Vigna unguiculata*) II. Effect of temperature and saturation deficit on time to flowering in photoperiod insensitive genotypes. **Experimental Agriculture**, London, v. 32, n. 1, p. 13–28, 1996.

DEBNATH, P.; PATTANAAIK, S. K.; SAH, D.; PANDEY, A. K. Assessment of critical limit of boron for cowpea in piedmont soils of Arunachal Pradesh. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Oxfordshire, v. 61, p. 1649–1658, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2015.1019344>>.

DELL, B.; HUANG, L. Physiological response of plants to low boron. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, n. 1–2, p. 103–120, 1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1004264009230>>.

DEMBITSKY, V. M.; SMOUM, R.; AL-QUNTAR, A. A.; ALI, H. A.; PERGMAMENT, I.; SREBNIK, M. Natural occurrence of boron containing compounds in plants, algae and microorganisms. **Frontiers in Plant Science**, Melbourne, v. 163, p.931–942, 2002.

DEMİRAY, H.; EŞİZ DEREBOYLU, A. Effects of excess and deficient boron and niacin on the ultrastructure of root cells in *Daucus carota* cv. Nantes. **Turkish Journal of Botany**, Ankara, v. 37, p. 160–166, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3906/bot-1202-22>>.

DEVI, K. N.; SINGH, L. N.; SINGH, M. S.; SINGH, S. B.; SINGH, K. K. Influence of sulphur and boron fertilization on yield, quality, nutrient uptake and economics of soybean (*Glycine max*) under upland conditions. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 4, n. 4; 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5539/jas.v4n4p1>>.

DONG, X., LIU, G., WU, X., LU, X., YAN, L., MUHAMMAD, R., SHAH, A., WU, L., JIANG, C. Different metabolite profile and metabolic pathway with leaves and roots in response to boron deficiency at the initial stage of citrus rootstock growth. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux, v. 108, p. 121–131, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.007>>.

DORDAS, C. Foliar boron application improves seed set, seed yield and seed quality of alfalfa. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 907–913, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2134/agronj2005.0353>>.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta, 2006. 403 p.

FAOSTAT. **Production Crops**, 2014. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=567&lang=cn#cnancor>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

FANG, K.; ZHANG, W.; XING, Y.; ZHANG, Q.; YANG, L.; CAO, Q.; QIN, L. Boron toxicity causes multiple effects on *malus domestica* pollen tube growth. **Frontiers in Plant Science**, Melbourne, v. 7, n. 208, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2016.00208>>.

FREIRE FILHO, F. R. **Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011. 84 p.

FUNAKAWA, H., MIWA, K. Synthesis of borate cross-linked rhamnogalacturonan II. **Frontiers in Plant Science**, Melbourne, v. 6, n. 233. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2015.00223>>.

GALLIARD, T.; BOWLER, P. Morphology and composition of starch. In: GALLIARD, T. **Starch properties and potential**. Chichester: Wiley, 1987. p. 55–78.

GONDIM, A. R. O. **Absorção e mobilidade do boro em plantas de tomate e de beterraba**. 2009. 76f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

GUPTA, U. C. Boron nutrition of crops. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 31, p. 273-307, 1979.

HAJIBOLAND, R.; FARHANGHI, F.; ALIASGHARPOUR, M. Morphological and anatomical modifications in leaf, stem and roots of four plant species under boron deficiency conditions. **Anales de Biología**, Murcia, v. 34, p. 15–29, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.6018/analesbio.0.34.4>>.

HAMIDELDIN, N.; HUSSEIN, O. S. Response of sesame (*Sesamum indicum* L.) plants to foliar spray with different concentrations of boron. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, Urbana, v. 91, p. 1949–1953, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11746-014-2538-7>>.

HARMANKAYA, M.; ÖNDER, M.; HAMURCU, M.; CEYHAN, E.; GEZGIN, S. Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars to foliar and soil applied boron in boron deficient calcareous soils. **African Journal of Biotechnology**, Nairobi, v. 7, n. 18, p. 3275–3282, 2008.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950, 347 p.

HU H.; BROWN P. H. Absorption of boron by plant roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, p. 49–58, 1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1004255707413>>.

HU, H. N.; PENN, S. G.; LEBRILLA, C. B.; BROWN, P. H. Isolation and characterization of soluble boron complexes in higher plants. The mechanism of phloem mobility of boron. **Plant Physiology**, Rockville, v. 113, n. 2, p. 649–655. 1997.

HU, H.; BROWN, P. H. Phloem mobility of boron in species dependent: evidence of boron mobility in sorbitol-rich species. **Annals of Botany**, Oxford, v. 77, n. 5, p. 497–505, 1996. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1006/anbo.1996.0060>>.

INBARAJ, M. P.; MUTHUCHELIAN, K. Effect of boron and high irradiance stresses on chlorophyll, protein and starch content in leaves of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp. P152). **Journal of Biosciences Research**, Chennai, v. 2, n. 2, p. 55–61. 2011.

KARAN, D. E. O.; SINGH, S. B.; RAMKEWAL. Effect of zinc and boron application on yield of lentil and nutrient balance in the soil under indo-gangetic plain zones. **Journal of AgriSearch**, Mirzapur, v. 1, n. 4, p. 206–209, 2014.

KARNOVSKY, M. J. A formaldehyde glutaraldehyde fixative of high osmolarity for use in electron microscopy. **Journal of Cell Biology**, New York, v. 27, p. 137–238, 1965.

KIRKBY, E. A.; RÖMHELD, V. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 118, p. 1–24, 2007.

KONSAENG, S.; DELL, B.; RERKASEM, B. Boron mobility in peanut (*Arachis hypogaea* L.). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 330, p. 281–289, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-009-0199-3>>

LAVRES JÚNIOR, J.; CABRAL, C. P.; ROSSI, M. L.; NOGUEIRA, T. A. R.; NOGUEIRA, N. L.; MALAVOLTA, E. Deficiency symptoms and uptake of micronutrients by castor bean grown in nutrient solution. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 233-242, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000100024>>.

LEITE, V. M. **Absorção e translocação de boro em cafeeiro**. 2002. 96f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

LORI, E. H.; AIEN, A.; FARYABI, F. Effect of boron foliar application on some morphological traits and seed yield of indigo (*Indigofera tinctoria* L.). **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, Dubai, v. 12, n. 8, p. 1102–1104, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2012.12.08.1838>>.



MAHENDRAN, P. P., VELMURUGAN, R.; BALASUBRAMANIAM, P. (2015): Identifying critical limit in soil and plant for determining response of groundnut (*Arachis hypogea*) to boron application in madurai soils of Tamil Nadu, India. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 39, p. 163–171, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2015.1086793>>.

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

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. Boron. In: MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of Plant Nutrition**. 5 ed. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. p. 621–638.

MIWA, K.; WAKUTA, S.; TAKADA, S.; IDE, K.; TAKANO, J.; NAITO, S.; OMORI H.; MATSUNAGA, T.; FUJIWARA, T. Roles of BOR2, a boron exporter, in cross linking of rhamnogalacturonan II and root elongation under boron limitation in arabidopsis<sup>1[W]</sup>. **Plant Physiology**, Rockville, v. 163, p. 1699–1709, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1104/pp.113.225995>>.

OLIVEIRA, I. P.; DANTAS, J. P. **Sintomas de deficiências nutricionais e recomendações de adubação para o caupi**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1984. 23 p. (Documentos 8)

PADBHUSHAN, R.; KUMAR, D. Yield and nutrient uptake of green gram (*Vignaradiata* L.) as influenced by boron application in boron-deficient calcareous soils of Punjab. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, n. 46, p. 908–923, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2015.1018520>>.

PAN, Y.; WANG, Z.; YANG, L.; WANG, Z.; SHI, L.; NARAN, R.; AZADI, P.; XU, F. Differences in cell wall components and allocation of boron to cell walls confer variations in sensitivities of *Brassica napus* cultivars to boron deficiency. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 354, p. 383–394, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-011-1074-6>>.

PICCHIONI, G. A.; WEIBAUM, S. A.; BROWN, P. Retention and the kinetics of uptake and export of foliage-applied, labeled boron by apple, pear, prune and sweet cherry leaves. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 120, n. 1, p.28–35, 1995.

POWER, P. P.; WOODS, W. G. The chemistry of boron and its speciation in plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, n. 1–2, p.1–14, 1997.

PRADO, R. M. **Nutrição de Plantas**. 1 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 300 p.

RAHMAN, I. U.; AFZAL, A.; IQBAL, Z.; IJAZ, F.; SHAD, S.; MANAN S.; AFZAL, M. Response of common bean (*Phaseolus vulgaris*) to basal applied and foliar feeding of different nutrients application. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, Dubai, v. 14 n. 9, p. 851–854, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2014.14.09.12400>>.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2 ed. Campinas: Instituto Agrônômico & Fundação IAC, 1996. 285 p.

REYNOLDS, E. S. The use of lead citrate at high pH as an electron-opaque stain in electron microscopy. **Journal of Cell Biology**, New York, v. 17, p. 208–212, 1963.

SALAMEH, A. K.; MAUER, L. J.; TAYLOR, L. S. Deliquescence lowering in food ingredient mixtures. **Journal Food Science**, Hoboken, n. 71, p. 10–16, 2005.

SANTINATO, F.; TAVARES, T. O.; PRADO, R. M.; CAIONE, G.; SILVA, V. A.; SANTINATO, R. Boron doses applied to soil during coffee development. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 7, n. 1, p. 49–55, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14295/CS.v7i1.1097>>.

SHELP, B. J. Boron mobility and nutrition in broccoli (*Brassica oleraceavar. Italica*). **Annals of Botany**, London, v. 61, p. 83–91, 1988.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 4, n. 3, p. 289–302, 1981.

SIEBENEICHLER, S. C.; MONNERAT, P. H.; CARVALHO, A. J. C., SILVA, J. A.; MARTINS, A. O. Mobilidade do boro em plantas de abacaxi. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 292–294, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452005000200026>>.

SINGH, A.; BAOULE, A. L.; AHMED, H. G.; DIKKO, A. U.; ALIYU, U.; SOKOTO, M. B.; ALHASSAN, J.; MUSA, M.; HALIRU, B. Influence of phosphorus on the performance of cowpea (*Vigna unguiculata* (L) Walp.) varieties in the Sudan savanna of Nigeria. **Agricultural Sciences**, Crows Nest, v. 2, n. 3, p. 313–317, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/as.2011.23042>>.

SINGH, A. K.; SINGH, C. P.; PRATIBHA, S. L. Effect of micronutrients and sorbitol on fruit set, yield and quality of mango cv. Dashehari. **Progressive Horticulture**, Lucknow, v. 45, n. 1, p. 43–48, 2013.

SINGH, A. K.; SHASHANK; SRIVASTAV, A. Effect of boron application on seed yield and protein content of mungbean (*Vignaradiata* L.). **Current Advances in Agricultural Sciences**, Kanpur, v. 6, p. 67–68, 2014.

SOUZA, J. A. **Mobilidade de boro ( $^{10}\text{B}$ ) em cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) e pessegueiro (*Prunuspersica* L.)**. 2011, 68f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2011.

STANGOULIS, J. C. R.; BROWN, P. H.; BELLALOUI, N.; REID, R. J.; GRAHAM, R. D. The efficiency of boron utilization in canola. **Australian Journal of Plant Physiology**, Clayton, v. 28, p. 1109–1114, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1071/PP00164>>.

SUBBARAYAPPA, C. T.; SANTHOSH, S. C.; SRINIVASA, N.; RAMAKRISHNAPARAMA, V. Effect of integrated nutrient management on nutrient uptake and yield of cowpea in southern dry zone soils of Karnataka. **Mysore Journal of Agricultural Sciences**, Bangalore, v. 43 n. 4, p. 700–704, 2009.

SWIADER, J. M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F. G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 17, p. 1687–1699, 1994. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01904169409364840>>.

TAHIR, M.; MEHMOOD, Q.; TAHIR, S.; SHEIKH, A. A.; REHMAN, A. Production potential of soybean (*Glycine max* L.) in Response to boron under agro ecological conditions of Pakistan. **Internacional Journal of Modern Agriculture**, Terre Haute, v. 3, n. 2, p. 2305–7246, 2014.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHEN, H.; VOLKWEISS, S. **Análise de solo, planta e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solo. Faculdade de Agronomia. Universidade do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

THEERAKULPISUT, P.; GUNNULA, W. Exogenous sorbitol and trehalose mitigated salt stress damage in salt-sensitive but not salt-tolerant rice seedlings. **Asian Journal of Crop Science**, Faisalabad, v. 4 n. 4, p. 165–170, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3923/ajcs.2012.165.170>>.

TOMIĆ, D.; STEVOVIĆ, V.; DUROVIĆ, D.; MADIĆ, M.; BOKAN, N.; STANISAVLJEVIĆ, R. Boron application in red clover (*Trifolium pratense* L.) seed production. **Irish Journal of Agricultural and Food Research**, Carlow, v. 54, n. 1, p. 59–63, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1515/ijafr-2015-0006>>.

TRIVELIN, P. C. O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: Três casos estudados com o uso do traçador <sup>15</sup>N**. 2000. 143f. Livre-docência (Especialidade/Disciplina: Isótopos Estáveis) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

VASEGHI, S.; VALINEJAD, M.; AFZALI, M. Boron fertilizer effects on soybean yield, leaf and boron concentration in seed. **World of Sciences Journal**, Wien, v. 1, n. 10, p 178–188, 2013.

WILL, S.; EICHERT, T.; FERNÁNDEZ, V.; MÜLLER, T.; RÖMHELD, V. Boron foliar fertilization of soybean and lychee: Effects of side of application and formulation adjuvants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 175, p. 180–188, 2012. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201100107>. 2011>.

WILL, S.; EICHERT, T.; FERNÁNDEZ, V.; MÖHRING, J.; MÜLLER, T.; RÖMHELD, V. Absorption and mobility of foliar-applied boron in soybean as affected by plant boron status and application as a polyol complex. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 344, n. 1–2, p. 283–293, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-011-0746-6>>.

WU, T.; WANG, Y.; ZHENG, Y., ZHANGJUN, F.; DANDEKAR, A. M., XU, K., HAN, Z.; CHENG, L. Suppressing Sorbitol Synthesis Substantially Alters the Global Expression Profile of Stress Response Genes in Apple (*Malus domestica*) Leaves. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 56, n. 9, p. 1748–1761, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/pcp/pcv092>>.

ZHANG, Y.; DING, Z.; MA, F.; CHAUHAN, R. D.; ALLEN, D. K.; BRUTNELL, T. P.; WANG, W.; PENG, M.; LI, P. Transcriptional response to petiole heat girdling in cassava. **Scientific Reports**, London, v. 5, n. 8414, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/srep084141>>.

## APÊNDICES

**Apêndice A.** Resumo da análise de variância na massa seca da raiz (MSR), da parte aérea (MSPA), teor de boro na folha diagnose (TB), acúmulo de boro na raiz (ACR), acúmulo de boro na parte aérea (excluindo os grãos) (ACPA), acúmulo nos grãos (ACG), eficiência de absorção (EA), eficiência de utilização (EU), produtividade (PROD.) e Índice de colheita (IC) do feijão-caupi em função das concentrações de B e na ausência e na presença de sorbitol.

Tratamentos	MSR	MSPA	TB	ACR	ACPA	ACG	EU	PROD.	IC
Sorbitol (S)	-----g-----		mg.kg <sup>-1</sup>	-----µg/pl-----		(g <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> )	g.pl <sup>-1</sup>	%	
Sem Sorbitol	10,18	43,09	33,27	284,35	747,64	306,2	4819,05	26,24	37,15
Com Sorbitol	9,83	43,00	82,55	312,95	1616,09	353,34	3165,18	27,00	38,04
DMS	0,79	2,93	14,83	29,29	103,33	28,25	253,33	1,74	1,90
F (S)	0,84 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	235,30 <sup>**</sup>	4,01 <sup>ns</sup>	297,41 <sup>**</sup>	11,73 <sup>**</sup>	179,43 <sup>**</sup>	0,80 <sup>ns</sup>	0,94 <sup>ns</sup>
Concentrações de B g por planta (C)									
0	10,20	43,32	14,15	246,65	553,11	112,69	5062,41	14,37	24,99
1,25	9,68	43,82	27,95	286,91	1058,19	390,69	4520,92	32,36	42,49
2,5	9,25	41,22	54,48	291,08	1396,36	430,55	3772,55	33,18	44,60
3,75	10,48	41,52	89,15	331,38	1265,68	384,77	3613,64	29,45	41,38
5	10,41	45,34	103,81	337,24	1636,02	330,17	2991,08	23,76	34,51
F (C)	1,47 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	114,40 <sup>**</sup>	5,36 <sup>**</sup>	52,83 <sup>**</sup>	67,55 <sup>**</sup>	34,46 <sup>**</sup>	67,57 <sup>**</sup>	59,77 <sup>**</sup>
F (C) X (S)	0,48 <sup>ns</sup>	0,41 <sup>ns</sup>	29,47 <sup>**</sup>	0,73 <sup>ns</sup>	26,44 <sup>**</sup>	0,89 <sup>**</sup>	13,01 <sup>**</sup>	1,68 <sup>ns</sup>	1,94 <sup>ns</sup>
CV%	12,26	10,50	17,54	15,11	13,47	13,20	9,78	10,05	7,78

C.V. = coeficiente de variação; \*, \*\* e ns = significativo ao nível de  $P \leq 0,05$ ,  $P \leq 0,01$  e não significativo, respectivamente, pelo teste F.



**Apêndice B.** Plântulas *Vigna unguiculata* (L.) Walp cv. BRS Guariba.

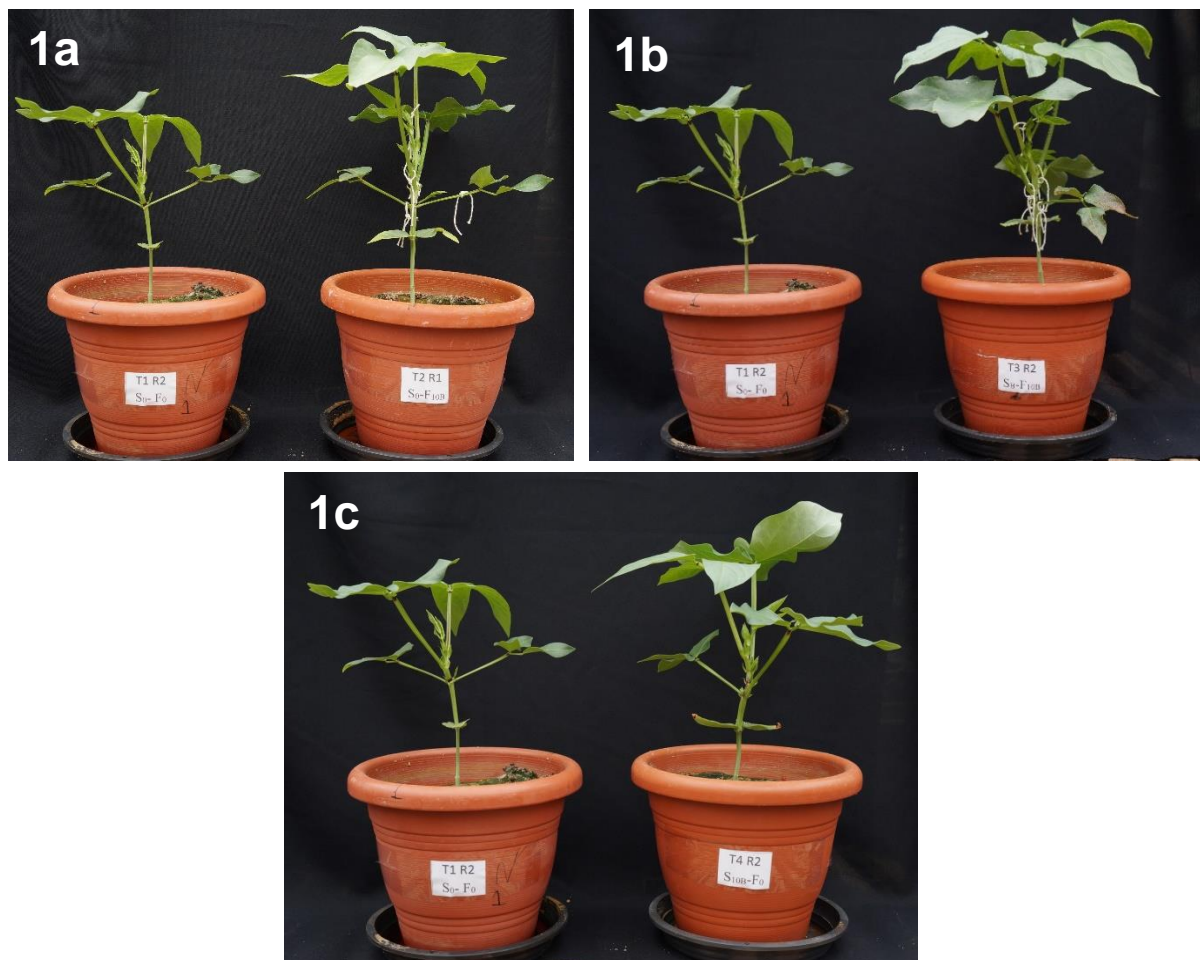




**Apêndice C.** Experimento I: Partes da planta do feijão-caupi: raiz, caule, folhas e vagens.



**Apêndice D.** Experimento II. Preparos iniciais para adubação foliar em plantas de feijão-caupi *Vigna unguiculata* (L.) Walp cv. BRS Guariba.



**Apêndice E.** Experimento III. Efeitos da adubação foliar e radicular. (1a) S<sub>0</sub> F<sub>0</sub>- controle absoluto x S<sub>0</sub> F<sup>10</sup>B - sem boro no substrato e com <sup>10</sup>B foliar; (1b) controle absoluto x SB F<sup>10</sup>B - com boro no substrato e <sup>10</sup>B foliar e (1c) controle absoluto x S<sup>10</sup>B F<sub>0</sub> - com <sup>10</sup>B no substrato e sem boro foliar em plantas de feijão-caupi *Vigna unguiculata* (L.) Walp cv. BRS Guariba.