

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - *CAMPUS* RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -
AGRONOMIA

**ESTRESSE HÍDRICO EM ESTÁDIOS DE
DESENVOLVIMENTO DO FEJJOEIRO ADUBADO
VIA SOLO COM SILÍCIO**

Autora: Marliana Araújo de Sousa Arantes
Orientador: Frederico Antônio Loureiro Soares
Coorientador: Dr. Marconi Batista Teixeira

RIO VERDE GO
dezembro - 2016

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - *CAMPUS* RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -
AGRONOMIA

**ESTRESSE HÍDRICO EM ESTÁDIOS DE
DESENVOLVIMENTO DO FEIJOEIRO ADUBADO
VIA SOLO COM SILÍCIO**

Autora: Marliana Araújo de Sousa Arantes
Orientador: Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares
Coorientador: Dr. Marconi Batista Teixeira

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTORA em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Rio Verde – Área de Concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

RIO VERDE - GO
dezembro - 2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação Serviço de Biblioteca e Documentação
Campus Rio Verde do Instituto Federal Goiano

Araújo-de-Sousa-Arantes, Marliana.

Estresse hídrico em estádios de desenvolvimento do feijoeiro adubado via solo com silício / Marliana Araújo de Sousa. – Rio Verde, 2016.
50 f. : il.

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Instituto Federal Goiano.
Campus Rio Verde, 2016.

Orientador: Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares.

Coorientador: Dr. Marconi Batista Teixeira.

1. *Phaseolus vulgaris*.

I. Título. II. Instituto Federal Goiano – *Campus Rio Verde*.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - *CAMPUS* RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E
INOVAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

**ESTRESSE HÍDRICO EM ESTÁDIOS DE
DESENVOLVIMENTO DO FEIJOEIRO ADUBADO
VIA SOLO COM SILÍCIO**

Autora: Marliana Araújo de Sousa

Orientador: Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares

Coorientador: Dr. Marconi Batista Teixeira

Titulação: Doutora em Ciências Agrárias – Agronomia – Área de
concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

APROVADA em 19 de dezembro de 2016.

Dr. Cícero Teixeira Silva
Costa
Avaliador externo
IF Goiano – *Campus*
Rio Verde

Dr. José Wéselli de Sá Andrade
Avaliador externo
IF Goiano – *Campus*
Rio Verde

Dr. Edson Cabral da
Silva
Avaliador externo
IF Goiano *Campus*
Rio Verde

Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares
Presidente da banca
IF Goiano – *Campus*
Rio Verde

Dr. Marconi Batista Teixeira
Avaliador interno
IF Goiano – *Campus*
Rio Verde

A minha mãe Rozilda Cássia de Araújo Sousa.

OFEREÇO

A minha família.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido sabedoria e esta oportunidade, por sempre ter me dado capacidade em discernir o caminho correto a ser trilhado.

Aos meus amados pais, Luiz Alberto de Souza e Rozilda Cássia de Araújo Sousa, pelo incentivo, amor, dedicação e apoio.

Ao meu marido, Valdivino Rodrigues Arantes Júnior pela paciência e companheirismo para que eu pudesse concluir mais uma etapa educacional.

Aos meus avós maternos, Alfredo Gomes de Araújo (in memoriam) e Marly Arnalda Cássia de Araújo (in memoriam), pois, não existem palavras que expressem quanto sou grata.

Ao prof. Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares pelas orientações, com a certeza de que nossa relação foi projetada e abençoada por Deus.

Agradeço a todos os Docentes e Administrativos que compõem o quadro da Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal Goiano – *Campus* Rio Verde.

À Capes, pela bolsa concedida para auxiliar na condução do curso.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, AGRADEÇO.

BIOGRAFIA DO AUTOR

MARLIANA ARAÚJO DE SOUSA, filha de Rozilda Cássia de Araújo Sousa e Luiz Alberto de Sousa, nasceu no dia 06 de abril de 1984, em Rio Verde, Goiás. Em 1998, ingressou na Escola Agrotécnica Federal de Rio Verde, onde cursou Agroindústria, posteriormente, graduou-se em Agronomia pela Universidade de Rio Verde no primeiro semestre de 2005. Iniciou o curso de pós-graduação nível mestrado em Produção Vegetal pela FESURV - Universidade de Rio Verde, no segundo semestre de 2005, defendendo a dissertação no dia 27 de junho de 2007. No ano de 2013, ingressou no Programa de pós-graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, pelo Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde nível Doutorado, defendendo sua tese dia 19 de dezembro de 2016.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUÇÃO GERAL.....	01
1. Efeito do estresse hídrico no desenvolvimento das plantas.....	01
1.2 Aspectos gerais sobre o Silício.....	04
1.3 Silício no solo.....	07
1.4 Silício na planta.....	12
OBJETIVOS.....	15
Geral.....	15
Específicos.....	15
CAPÍTULO I – ESTRESSE HÍDRICO EM CULTIVARES DE FEJJOEIRO (<i>Phaseolus vulgaris</i>) ADUBADO COM SILÍCIO.....	23
INTRODUÇÃO.....	24
MATERIAL E MÉTODOS.....	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
CAPÍTULO II – ESTRESSE HÍDRICO NA CULTURA DO FEJJOEIRO (<i>Phaseolus vulgaris</i>) ADUBADO COM SILÍCIO.....	38
INTRODUÇÃO.....	39
MATERIAL E MÉTODOS.....	40
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
CONCLUSÕES.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
CONCLUSÃO GERAL.....	50

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO I – ESTRESSE HÍDRICO EM CULTIVARES DE FEIJOEIRO (Phaseolus vulgaris) ADUBADO COM SILÍCIO.....	
TABELA 1. Caracterização química e textural do solo.....	26
TABELA 2. Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e maturação na massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca de sementes e massa da matéria seca de raízes da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.....	28
TABELA 3. Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimentos de vagens e maturação na altura de plantas (cm) e diâmetro do caule da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.....	31
TABELA 4. Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimentos de vagens e maturação no número de vagens planta ⁻¹ , número de grãos vagem ⁻¹ e produtividade (kg ha ⁻¹) da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.....	32
TABELA 5. Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimentos de vagens e maturação na massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca de sementes e massa da matéria seca de raízes da cultivar Pérola adubada com silício e não adubada.....	33
TABELA 6. Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimentos de vagens e maturação na altura de plantas e diâmetro do caule da cultivar Pérola adubada com silício e não adubada.....	34
TABELA 7. Influência da supressão da irrigação em relação aos dias após o plantio (DAP) no número de vagens planta ⁻¹ e produtividade da cultivar Pérola adubada com silício e não adubada.....	35
CAPÍTULO II – ESTRESSE HÍDRICO NA CULTURA DO FEIJOEIRO (Phaseolus vulgaris) ADUBADO COM SILÍCIO.....	
TABELA 1. Caracterização química e textural do solo na profundidade de 0-20 cm.....	41
TABELA 2. Dados climatológicos obtidos através da estação meteorológica da Universidade de Rio Verde durante o período de julho a outubro de 2015.....	42
TABELA 3. Valores de coeficiente da cultura (Kc) utilizados nas	

diferentes fases de desenvolvimento do feijoeiro de acordo com as lâminas de água aplicadas por aspersão.....	43
TABELA 4. Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e maturação na massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca de sementes e massa da matéria seca de raízes da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.....	44
TABELA 5. Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e maturação na altura de plantas e diâmetro do caule da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.....	46
TABELA 6. Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e maturação no número de vagens planta ⁻¹ , número de grãos vagem ⁻¹ e produtividade da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.....	47

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo / Sigla	Significado	Unidade de
%	porcentagem	
cm	centímetros	
CRA	conteúdo relativo de água	
CV	coeficiente de variação	
CUC	coeficiente de distribuição de	
DAE	dias após emergência	
DAS	dias após sementeira	
FV	fonte de variação	
g	gramas	
IFC	índice Falker© de clorofila	
II	inferior	
inf.	ponto de inflexão curva sigmoideal	
kg	quilograma	
max.	ponto de máximo curva quadrática	
MI	médio inferior	
min.	ponto de mínimo curva quadrática	
mm	milímetros	
MPa	Mega Pascal	
MS	médio superior	
ns	não significativo	
°C	temperatura Celsius	grau Celsius
Pc	concentração do produto comercial	
PMg	produtividade marginal	
r	coeficiente de correlação	
RH	regime hídrico	
s	desvio padrão	
SE	erro padrão da regressão	
SPD	sistema de plantio direto	
SS	superior	
Subparc.	subparcela	
t	tonelada	1 t = 1000 kg
ud	Unidade	

RESUMO

ARANTES, MARLIANA ARAÚJO DE SOUSA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, dezembro de 2016. **Estresse hídrico em estádios de desenvolvimento do feijoeiro comum adubado via solo com silício.** Orientador: Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares. Coorientador: Dr. Marconi Batista Teixeira.

O feijão (*Phaseolus vulgaris*) é cultivado na maioria das regiões brasileiras, sendo considerado uma cultura de grande importância socioeconômica, pois, juntamente ao arroz (*Oriza sativa*) se completam nutricionalmente, porém, a cultura é muito sensível ao estresse hídrico em seus diferentes estádios de desenvolvimento e não se tem dados de pesquisa satisfatórios relacionado ao uso do silício. Portanto, em função disso, dois experimentos foram conduzidos um em casa-de-vegetação e outro no campo durante o ano de 2015. O experimento conduzido em casa de vegetação objetivou avaliar o desempenho das cultivares BRS Estilo e Pérola com o estabelecimento de períodos de supressão da irrigação em diferentes estádios do ciclo vital (vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e maturação) sob duas condições de adubação com silício (Uso e Ausência). Os tratamentos foram dispostos em delineamento experimental inteiramente casualizados, com vinte tratamentos, em três repetições. Avaliaram-se a massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca de sementes, massa da matéria seca de raízes, altura das plantas, diâmetro do caule, número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade de grãos. Para número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade de grãos conforme se protelou a irrigação, houve incremento na cultivar BRS Estilo. A cultivar BRS Estilo apresentou para número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade maiores médias adubada com silício. A cultivar Pérola apresentou no

estádio maturação as maiores médias para número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade quando adubada com silício. O segundo estudo foi conduzido em condições de campo com a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar BRS Estilo, objetivando avaliar seu desempenho com o estabelecimento de períodos de supressão da irrigação (vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e final ou maturação) adubada e não-adubada com silício. Avaliaram-se massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca de sementes, massa da matéria seca de raízes de 0-20 cm, massa da matéria seca de raízes de 20-40 cm, altura de plantas, diâmetro do caule, número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade de grãos. De modo geral, para número de vagens por planta e número de grãos por vagem, as maiores médias foram obtidas com o uso do silício em todas as épocas em que houve supressão da irrigação. Para produtividade de grãos observou-se incremento à medida que se protelava a irrigação, sendo que, plantas adubadas com silício apresentaram as maiores médias.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris*, BRS Estilo, Pérola, supressão da irrigação.

ABSTRACT

ARANTES, MARLIANA ARAÚJO DE SOUSA. Instituto Federal Goiano (Goiano Federal Institute) – Rio Verde Campus – Goiás State (GO), Brazil, December 2016. **Hydrical stress on development stages of common bean fertilized via soil with silicon.** Advisor: Dr. Soares, Frederico Antônio Loureiro. CoAdvisor: Dr. Teixeira, Marconi Batista.

The bean (*Phaseolus vulgaris*), cultivated in most Brazilian regions, is considered a culture of great socioeconomic importance, and becomes nutritionally complete together with rice (*Oriza sativa*). The culture is very sensitive to hydrical stress in its different development stages and there is no satisfactory research data related to the use of silicon. So, on that basis, two experiments were carried out in greenhouse and another in field, during 2015. The experiment in greenhouse aimed to evaluate the cultivars performance (BRS Style and BRS Pearl) under two conditions of silicon fertilization (Use and Absence) with the establishment of irrigation suppression periods at different stages of the life cycle (vegetative, pre-flowering, full blossom, pod filling, and ripening). The treatments were arranged in a completely randomized experimental design, with twenty treatments, in three replicates. The dry mass of the aerial part, seed dry matter mass, root dry matter mass, plant height, stem diameter, pods amount per plant, grains amount per pod, and grain yield were evaluated. For pods amount per plant, grains amount per pod, and grain yield, there was an increase in the BRS Style cultivar, as the irrigation delayed. The BRS Style cultivar presented higher averages for pods amount per plant, grains amount per pod, and productivity, when fertilized with silicon. The BRS Pearl cultivar presented in the ripening stage the highest averages for pods amount per plant, grains amount per pod, and productivity, when fertilized with

silicon. The second study was carried out under field conditions with the bean (*Phaseolus vulgaris* L.) BRS Style cultivar, and aimed to evaluate the performance of common bean plants with the establishment of irrigation suppression periods (vegetative, pre-flowering, full blossom, pod filling, and final or ripening), fertilized and non-fertilized with silicon. The dry matter mass of the aerial part, dry seed mass, dry matter mass of 0-20 cm roots, dry matter mass of 20-40 cm roots, plant height, stem diameter, pods amount per plant, grains amount per pod, and grain yield were evaluated. In general, for the pods amount per plant and grains amount per pod, the highest averages were obtained with the use of silicon in all periods in which there was irrigation suppression. It was observed that grain yield was increased as the irrigation was delayed, and plants fertilized with silicon presented the highest averages.

Keywords: *Phaseolus vulgaris*, BRS Style, BRS Pearl, Irrigation suppression.

INTRODUÇÃO

1. Efeito do estresse hídrico no desenvolvimento das plantas

A forma como o déficit hídrico se desenvolve nas plantas é muito complexa, pois afeta todos os aspectos de crescimento, causando modificações anatômicas, morfológicas, fisiológicas e bioquímicas. Como processos que podem ser influenciados pelo estresse hídrico, podem-se destacar o potencial de água na folha, a resistência estomática, a transpiração, a fotossíntese, a temperatura da cultura e o murchamento das folhas (BEZERRA *et al.*, 2003; MARENCO; LOPES, 2005).

Quando há uma redução do potencial hídrico devido o solo estar seco, as plantas passam a apresentar dificuldade para extrair água do solo de forma rápida o suficiente para balancear suas perdas pela transpiração. Nessas condições, as plantas murcham pela perda de turgor. Em algumas condições em que o conteúdo de água no solo é baixo a planta se torna incapaz de extrair água do solo e a perda de turgor se torna permanente (PAIVA; OLIVEIRA, 2006).

O primeiro efeito da carência hídrica na planta é a perda de turgidez, pois, pela diminuição do conteúdo de água, a célula encolhe e as paredes relaxam. As atividades relacionadas à turgidez da planta são mais sensíveis ao déficit hídrico, sendo o crescimento celular da planta um processo que depende da turgidez. O estresse hídrico na planta pode limitar a dimensão de folhas individuais e o número de folhas em uma determinada planta, pois diminui o número e o crescimento de ramos. Já o processo de crescimento dos caules também é afetado pelas mesmas forças que limitam o crescimento foliar (TAIZ; ZEIGER, 2004).

As plantas apresentam mecanismos que as fazem resistir à seca, sendo estes mecanismos divididos em escape, retardo e tolerância. No escape, as plantas apresentam

um rápido desenvolvimento fenológico completando seu ciclo de vida antes que o déficit se torne severo o suficiente para provocar danos. O retardo está relacionado à manutenção do turgor e volume celular, tanto pela presença de um sistema radicular abundante para absorção de água quanto pela redução da perda por transpiração. E por fim, a tolerância à seca que é um mecanismo da planta que permite manter seu metabolismo, mesmo com o déficit hídrico presente (VERSLUES *et al.*, 2006).

A limitação hídrica na planta influencia de forma mais acentuada a expansão foliar do que a fotossíntese, sendo a expansão foliar mais sensível à limitação. A redução do desenvolvimento das plantas pode ocasionar redução no consumo de carbono e energia, simultaneamente os ápices radiculares começam a perder a turgidez, fazendo com que o sistema radicular se desenvolva para regiões mais úmidas ou mais profundas do solo (COSTA, 2001).

O déficit hídrico é uma perturbação ambiental que pode induzir um aumento da instabilidade do desenvolvimento da planta, induzindo crescimento assimétrico em folhas. O crescimento celular é um dos processos fisiológicos com mais alta sensibilidade ao déficit hídrico, reduzindo a taxa de expansão celular e consequentemente, a área foliar. Além disso, até condições de secas moderadas podem afetar o processo fotossintético e a taxa de transpiração pela redução do turgor celular, fechamento estomático, e decréscimo da difusão intercelular de CO₂ (SOUZA *et al.*, 2005).

Todos os aspectos de crescimento e desenvolvimento das plantas são afetados pela deficiência hídrica nos tecidos, causada pela excessiva demanda evaporativa e/ou limitado suprimento de água. Como consequência da deficiência hídrica, verifica-se uma desidratação do protoplasto, com consequente diminuição do volume celular e aumento na concentração de solutos. Aliada a isto, a diminuição da turgescência pode ser admitida como consequência do estresse hídrico, sendo o processo de crescimento, principalmente em extensão, o primeiro a ser afetado (NOGUEIRA *et al.*, 2005).

Expansão celular, síntese da parede celular e síntese proteica estão entre os processos mais sensíveis ao déficit hídrico, que leva a concluir que a redução da expansão foliar é uma das primeiras respostas à pouca água disponível, já que esse processo é dependente do crescimento celular (SADRAS; MILROY, 1996). As diferenças entre espécies com relação ao crescimento e sobrevivência sob déficit hídrico estão nas diferentes maneiras adotadas para aquisição e transporte de água que evitem

mudanças drásticas no metabolismo vegetal naquele determinado momento do ciclo de vida da planta (CHAVES *et al.*, 2002).

Muitas adaptações para aumentar a tolerância à seca são detectadas nos diversos órgãos dos vegetais superiores. Nas folhas, ocorrem diminuição da emissão e redução da área foliar, redução no tamanho e número de estômatos, fechamento estomático e desenvolvimento do parênquima paliçádico; no caule, ocorre baixa resistência ao fluxo hídrico nos tecidos vasculares, e nas raízes, há um expressivo aumento no crescimento, alta razão raiz/parte aérea e alto potencial de regeneração das raízes após o transplântio (KOZLOWSKI; PALLARDY, 2002).

Correia e Nogueira (2004) avaliaram o crescimento do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetido ao déficit hídrico e observaram que o déficit hídrico por 35 dias provoca redução do crescimento de plantas de amendoim, sem, contudo paralisá-lo. Os autores observaram que o estresse hídrico determinou reduções na altura, número de folhas e área foliar das plantas e na matéria seca das folhas e dos caules, e a suspensão total de rega promoveu redução na alocação de biomassa para as folhas e caules e aumentou a alocação de biomassa para as raízes.

Em estudo conduzido por Heinemann e Stone (2009), com o objetivo analisar os efeitos da deficiência hídrica, no desenvolvimento e componentes do rendimento de quatro cultivares de arroz de terras altas, foi verificado que a deficiência hídrica reduziu a produtividade de grãos, pela redução no número de panículas e de grãos por panícula e pelo aumento da esterilidade das espiguetas. A menor produtividade de grãos das cultivares precoces, sob deficiência hídrica, ocorreu pela coincidência da sua floração com o período de máxima intensidade do estresse.

Quando o trigo é submetido a déficit hídrico na ocasião do início de florescimento, há redução significativa na altura de plantas, na área foliar, na massa seca total e número de perfilhos por planta, bem como no número de grãos por planta, massa de mil grãos e produção por planta (SANTOS *et al.*, 2009).

Em estudo com o propósito de testar o crescimento foliar assimétrico induzido pela deficiência hídrica em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) Souza *et al.* (2005) observaram que a deficiência hídrica induziu redução em 80% assimetria foliar. A fotossíntese foi afetada de duas formas: uma redução de seus níveis fisiológicos e um aumento na variabilidade entre os folíolos direito e esquerdo.

1.2 Aspectos gerais sobre o Silício

O silício é o segundo elemento mais abundante da superfície terrestre, superado apenas pelo oxigênio. Ocorre principalmente como mineral inerte das areias, quartzo (SiO_2 puro), caulinita, micas, feldspatos e em outros argilomineraissilicatados (MARSCHNER, 1995). O silício está presente na solução do solo como ácido monossilícico H_4SiO_4 (LIMA *et al.*, 2011) e pode ser proveniente da decomposição de resíduos vegetais, da transformação de compostos minerais no solo e aplicação de fertilizantes silicatados (OLIVEIRA, 2009).

Efeitos relacionados à eficiência do elemento podem ser observados nos solos pela aplicação de materiais silicatados, que atuam positivamente sobre a correção da acidez do solo, neutralização do H e Al tóxicos, além da interação com outros nutrientes, aumentando a concentração na solução do solo, proporcionando maior disponibilidade e absorção pela planta, como é o caso do fósforo.

Nas plantas, podemos relacionar a presença do elemento à maior resistência ao acamamento, diminuição do ataque por pragas e doenças (por conta de alterações na anatomia da planta, como a formação de células epidérmicas mais grossas e maior grau de lignificação e/ou silicificação), maior resistência a condições adversas, causadas por situações de estresse biótico e abiótico, como menor efeito deletério provocado pela geada, menor taxa de evapotranspiração (em situações de déficit hídrico), favorecimento de nodulação em leguminosas, ativação da atividade de enzimas, efeitos na composição mineral (MALAVOLTA, 2006; EPSTEIN; BLOOM, 2005).

Além disso, devido ao acúmulo de Si na epiderme das folhas, o elemento é capaz de ativar genes envolvidos na produção de compostos secundários do metabolismo, como polifenóis e enzimas relacionadas aos mecanismos de defesa das plantas, como as Enzimas Reativas de Oxigênio (ERO) (GRATÃO *et al.*, 2005).

Vários estudos têm mostrado efeitos benéficos da aplicação de Si, especialmente em culturas como arroz, cana-de-açúcar, cevada, milho, sorgo e trigo (MA *et al.*, 2001; GONG *et al.*, 2005; HATTORI *et al.*, 2005), que são consideradas acumuladoras desse elemento. Porém, o Si ainda é um elemento pouco conhecido e utilizado na agricultura brasileira.

O uso do silício como fertilizante na agricultura ocorre em vários países, como Estados Unidos, Austrália, África do Sul e Japão, este último utiliza o Si no cultivo do arroz há pelo menos seis décadas (RODRIGUES *et al.*, 2011). No Brasil, o silício foi incluído na Legislação para Produção e Comercialização de Fertilizantes e Corretivos,

sob decreto de lei nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, como nutriente benéfico para as plantas, podendo ser comercializado de forma isolada ou em mistura com outros nutrientes (BRASIL, 2004).

Os benefícios da utilização do silício na agricultura são citados tanto para utilização como corretivo no solo, quanto como fertilizante para as plantas. No solo, os silicatos indisponibilizam metais pesados como o cádmio, cromo, mercúrio, chumbo, níquel e arsênio para as culturas, e ainda melhoram os atributos químicos do solo e a nutrição das plantas. Tem ainda reação mais lenta que o calcário, tendo caráter residual, fato importante que contribui para a manutenção da neutralização da acidez do solo e para a disponibilização de nutrientes e do próprio silício (PRADO *et al.*, 2001).

Para Rodrigues *et al.* (2011), os ânions silicatos aumentam o pH do solo, podendo fazer com que a atividade dos elementos tóxicos seja diminuída, precipitando-os em compostos insolúveis ou formando polímeros de baixa disponibilidade para a planta. Com o alumínio, por exemplo, pode formar hidroxialuminossilicatos (HAS), que reduzem a toxicidade de alumínio em solos ácidos. Ocorrida a absorção do ácido monossilícico pelas plantas, ele se transloca através das membranas das células epidérmicas por via apoplástica, simplástica, por difusão ativa, canais de entrada de água ou por meio de proteínas específicas. Seu transporte e acúmulo podem ser regulados por um processo ativo, que é desencadeado pelo estímulo à proteção contra doenças, pragas e outras condições de estresse (OLIVEIRA, 2009).

Na epiderme foliar, a sílica é incorporada à matriz celular, principalmente nas paredes exteriores da epiderme adaxial e abaxial e dentro do lúmen de algumas células, tricomas e nas células buliformes. Seu depósito na parede exterior da epiderme forma uma dupla camada com cutícula, fato que ajuda na defesa contra as mais variadas adversidades (OLIVEIRA, 2009).

Teixeira *et al.* (2008), ao avaliarem fontes de silício em cultivares de feijão nas safras das águas e da seca, constataram que a cultivar Aporé apresentou maiores teores de Si em comparação com a Pérola. Esse resultado foi confirmado na safra da “seca”, quando as cultivares Aporé, seguida pela BRSMG Talismã, acumularam mais silício em suas folhas em relação à cultivar Pérola, podendo-se afirmar que existem diferenças entre os genótipos de feijão quanto ao acúmulo de silício em suas folhas, hipótese esta levantada, mas não testada, por Mauad *et al.* (2003), em plantas de arroz.

Apesar de não serem compreendidos, ao certo, os mecanismos envolvidos no processo de absorção do silício pelas plantas, é crescente o número de pesquisas que

evidenciam o benéfico da utilização dos silicatos para inúmeras espécies. A tolerância das plantas, associadas ao uso do Si e às condições de seca, por exemplo, tem sido atribuída ao acúmulo de enzimas na parte aérea, indicando ser um mecanismo regulador de mudanças fisiológicas na planta, pela redução do potencial hídrico celular, levando, conseqüentemente, ao fechamento dos estômatos e ao desenvolvimento de processos reguladores de perda de água (NERI *et al.*, 2009).

Além disso, o Si proporciona maior rigidez estrutural dos tecidos e aumenta a resistência mecânica, por deixar as folhas mais eretas; reduz o auto sombreamento e acamamento; aumenta a área fotossintética e absorção de CO₂; provoca aumento no teor de clorofila e retarda a senescência; responde de forma satisfatória a fatores abióticos, como estresse salino, geadas e secas prolongadas; e aumenta a resistência a insetos por meio da formação de uma barreira física, além de proteger contra estresses bióticos por meio da diminuição da incidência de patógenos (NEVES *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2011; GAO, 2006).

Segundo Lima *et al.* (2011), a aplicação de silício em milho e em feijão-de-corda, sob estresse salino, melhorou o aproveitamento da água devido à baixa transpiração. Neves *et al.* (2012), ao avaliarem os teores de prolina, aminoácidos e proteínas solúveis em resposta à deficiência hídrica e concentrações de Si em plantas de milho, constataram ser eficaz a utilização do silício no controle do estresse provocado pela deficiência hídrica.

Oliveira (2009) verificou em feijoeiros comuns maior crescimento das raízes em profundidade, aumentando o volume de solo explorado, possibilitando maior absorção de água e nutrientes pela planta, conferindo maior tolerância ao déficit hídrico.

Com relação à produtividade, pesquisas evidenciaram resultados benéficos promovidos pelo uso de silicatos, como na cana-de-açúcar (PRADO *et al.*, 2001), no sorgo (ROCHA *et al.*, 2011). Crusciol *et al.* (2013) evidenciaram que a aplicação foliar de silício no feijoeiro, aumentou sua concentração na folha, proporcionou maior número de vagens por planta e conseqüentemente maior produtividade. Entretanto, Teixeira *et al.* (2008), verificaram que o rendimento de grãos e seus componentes (número de vagens por planta, número de grãos por vagem e peso de cem grãos) não foram influenciados pela adubação silicatada foliar na cultura.

1.4 Silício no solo

O silício está presente na solução do solo como ácido monossilícico (H_4SiO_4), em grande parte na forma não dissociada, que é facilmente absorvida pelas plantas (RAVEN, 1983). Por isso, apesar de ser um ácido, ele tem comportamento de base, sendo representado por alguns autores como $\text{Si}(\text{OH})_4$ ao invés de H_4SiO_4 (SAVANT *et al.*, 1997).

O ácido silícico é a única forma disponível de silício para as plantas, porém diversos fatores podem influenciar seu teor no solo (REIS *et al.*, 2007). Os principais fatores que aumentam sua disponibilidade são: adição de fertilizantes silicatados, água de irrigação, dissolução de ácido silícico polimérico, liberação de silício dos óxidos de ferro e alumínio, dissolução de minerais cristalinos e não cristalinos e decomposição de resíduos vegetais. Os principais drenos são: absorção pelas plantas, formação de polímeros de silício, lixiviação, formação de minerais cristalinos (SAVANT *et al.*, 1999).

Nos solos, de modo geral, o silício aparece no quartzo (SiO_2), na caulinita e em outros argilominerais (REIS *et al.*, 2007). Os mesmos autores complementam que os teores de Si na fração de argila diminuem com o grau de intemperismo. O aumento da intensidade do intemperismo provoca maior alteração dos minerais primários e, associado à lixiviação, causa a perda de elementos mais solúveis (Ca, Mn, Na, K, etc.) e posteriormente a dessilicificação desses minerais. Esse processo de formação dos solos tropicais e subtropicais tem como minerais predominantes as argilas cauliniticas, os óxidos, oxidróxidos e hidróxidos de Fe e Al.

Carvalho-Pupatto *et al.* (2003), estudando o efeito da escória de alto forno no crescimento radicular e na produtividade do arroz de terras altas, observaram aumento do comprimento e superfície radicular em função das melhorias dos atributos químicos do solo como aumento do pH e dos teores de Ca e Mg do solo. Melo *et al.* (2003), utilizando silicato de cálcio como fonte de silício em estudo com capins do gênero *Brachiaria*, obtiveram aumento dos teores de silício no solo, porém o valor do pH não foi alterado devido ao balanceamento de cálcio e magnésio. Mauad *et al.* (2003) obtiveram, em um Latossolo Vermelho distroférico aumento do teor de silício no solo e na planta de arroz, em razão da aplicação de silicato de cálcio. Resultado semelhante foi observado por Alvarez (2004), avaliando o efeito da adubação com silicato de cálcio e magnésio na dose de 1.000 kg ha^{-1} , na linha de semeadura da cultura do arroz em um Latossolo Vermelho distroférico tipo argiloso na região de Selvíria – MS.

O uso de fertilizantes silicatados, que normalmente apresentam boas propriedades de adsorção, aumenta a eficiência da adubação NPK, proporcionando maior lixiviação de potássio e outros nutrientes móveis no horizonte superficial. Com o aumento no teor de silicato no solo, ocorrem reações químicas de troca entre o silicato e fosfatos. Desta maneira, há a formação de silicatos de cálcio, alumínio e ferro, por exemplo, com a liberação do íon fosfato, aumentando o teor de fósforo na solução do solo. Estudos indicam, também que há possibilidade de silício aumentar a translocação interna de fósforo para a parte aérea da planta (SAVANT *et al.*, 1997; TAKAHASHI, 1995; EPSTEIN, 1999).

Considerado um dos principais constituintes dos argilo-minerais no processo de formação dos solos, o Si pode afetar de forma significativa a nutrição das plantas. Os solos em geral, pelo alto grau de intemperismo, apresentam em média cerca de 5 a 40% de Si em suas composições (MA *et al.*, 2001).

O Si está presente no solo sob diversas formas: pode ser encontrado em minerais primários, minerais secundários, ou então, adsorvido aos coloides do material. Porém, encontramos maior concentração do nutriente na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), disponível na solução do solo, não se encontrando a maior parte dissociada, fato este que torna o nutriente mais prontamente disponível para as plantas, levando, também, a possíveis perdas por lixiviação. Dessa forma, conclui-se que a quantidade do elemento disponível na solução do solo é diretamente dependente da estabilidade dos minerais da fase sólida, ou seja, ocorre correlação positiva entre os teores do elemento e os teores de argila no material coloidal (MEYER; KEEPING, 2001).

O elemento é absorvido de forma ativa por proteínas de membranas sintetizadas de gene específico (MA; TAKAHASHI, 2002). Dessa forma, podemos considerar que sua absorção pelas plantas pode ocorrer ao longo de todo o seu ciclo, já que não segue um gradiente de concentração. A incidência da forma dissociada do elemento - ácido silícico, H_4SiO_4 – está intimamente relacionada ao pH do solo, já que o pH da rizosfera apresenta importante influência sobre a solubilidade dos nutrientes e sua absorção pelas raízes (MARSCHNER; RÖMHELD, 1983).

Para a cultura do arroz, assim como para a maioria das plantas acumuladoras de Si, a disponibilidade do elemento no solo e sua consequente absorção pelas plantas estão intimamente relacionados ao pH do solo: quanto maior o pH, maior a disponibilidade do elemento no solo, levando, conseqüentemente, à maior absorção pela planta (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

Camargo *et al.* (2007), avaliando o efeito da reação do solo com base em diferentes materiais silicatados (silicato de cálcio e magnésio, ácido silícico e wollastonita) em comparação ao calcário calcítico, sobre a disponibilidade de Si e a produção de matéria seca e absorção do nutriente por plantas de arroz, concluíram que a absorção de Si pela parte aérea das plantas foi linearmente crescente com as doses de wollastonita, seguida do silicato de cálcio e magnésio, ácido silícico e calcário calcítico. Relacionando os efeitos sobre o pH do solo, os materiais avaliados, com exceção do ácido silícico, proporcionaram aumento favorável para a variável analisada. Pulz *et al.* (2008), avaliando os efeitos da aplicação de silicato de cálcio e magnésio na correção das características químicas do solo; e sua consequente influência na nutrição e produtividade de tubérculos de batata observaram que, para o parâmetro correção das características químicas do solo, os tratamentos com silicato de cálcio e magnésio e calcário não diferiram estatisticamente entre si; entretanto, o material silicatado proporcionou maior disponibilidade de P e Si no solo e maior absorção destes elementos pelas plantas de batata, resultando em aumento da produtividade e melhor arquitetura das plantas.

Em estudo realizado objetivando avaliar alterações na disponibilidade de fósforo durante o estabelecimento do capim-marandu, por meio da aplicação conjunta de fosfato e silicato, em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, a combinação de doses intermediárias de fósforo e altas doses de Si levou a maior número de folhas expandidas, área foliar e, consequente, maior produção de matéria seca (MELO *et al.*, 2007).

Sobral *et al.*, (2011), com o intuito de avaliar a disposição final da escória de aciaria de forno elétrico e o fornecimento de Si, macronutrientes (Ca, Mg e P), micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni) e elementos tóxicos (Cd e Pb) para a cultura da cana-de-açúcar observaram que o material silicatado aumentou significativamente os teores de Ca, Mg, P, Si, Fe, Mn e Zn no solo e reduziu a acidez potencial, além de aumento na área foliar e na altura dos colmos, tanto quanto no teor de Zn nas folhas. Não foi detectada a presença de Ni, Cd e Pb no solo nem na planta, indicando, desta forma, que a utilização do material residual não causa danos ambientais ao sistema.

Considerando a série liotrópica dos elementos no solo (FASSBENDER, 1978), em que os nutrientes são classificados de acordo com a susceptibilidade à lixiviação e com seu raio iônico, temos que o silicato é um dos elementos mais facilmente lixiviáveis no perfil do solo. Considerando isso, pode-se estabelecer que, assim como o

Na e o K, o íon silicato apresenta menor efeito agregante no solo, o que facilita o caminhamento do elemento ao longo do perfil, aumentando perdas por lixiviação, evidenciada nos baixos teores deste elemento em solos tropicais.

Grande número de materiais tem sido utilizado como fonte de Si para as plantas, entre eles as escórias de siderurgia, wollastonita, metassilicato de cálcio, silicato de potássio, termofosfato, silicato de cálcio e silicato de magnésio (PRADO; FERNANDES, 2001) para promover a correção da acidez dos solos, além de adicionar Si ao sistema solo-planta.

No Brasil, o material mais utilizado para fins de correção de acidez dos solos é o calcário, sendo este o mais barato e eficiente modo de se elevar o índice de eficiência do fertilizante empregado em áreas de produção de grãos. Porém, como este material é pouco solúvel e os produtos da sua reação têm mobilidade limitada, sua ação inicial normalmente fica restrita às camadas superficiais, principalmente em solos cultivados sob Sistema Plantio Direto, pela ausência de seu revolvimento (SORATTO; CRUSCIOL, 2008). A utilização de materiais contendo Si em sua constituição para a correção da acidez é válida, desde que contenham um “constituente neutralizante” como óxidos, hidróxidos, carbonatos e silicatos de cálcio e/ou magnésio.

Materiais contendo o íon silicato em sua composição, como o silicato de cálcio e magnésio, além das vantagens de promoverem a elevação do pH, dos teores de cálcio e de magnésio trocáveis, CTC e V% (PRADO; FERNANDES, 2003), aumento na disponibilidade de fósforo, e redução de toxidez de ferro, manganês e alumínio, são ainda, fonte de Si para as plantas, pelo fato de apresentarem em sua composição constituintes neutralizantes - SiO_3 - (ALCARDE ; RODELLA, 2003), apresentarem, também, micronutrientes (com efeito fertilizante), sendo, portanto, justificado seu uso como corretivo de acidez (PRADO *et al.*, 2002, CARVALHO-PUPATTO *et al.*, 2004). A recomendação de aplicação deve ser baseada em qualquer um dos métodos utilizados para recomendação de calagem (KORNDÖRFER *et al.*, 2004).

Corrêa *et al.* (2009), em estudo realizado sobre a adição de escória de aciaria em solo cultivado sob Sistema Plantio Direto, afirmam que o silicato presente no material exerce função corretiva no solo, podendo ser comparado ao calcário, por apresentar maior solubilidade, além de levar à neutralização da acidez do solo, pelo fato de apresentar, em sua constituição, elementos como CaO, CaOH, SiO_3 e NaOH.

Em ensaio realizado em Latossolo Vermelho distroférico típico, avaliando o efeito de doses de silicato de cálcio em comparação com aplicação de calcário em

diferentes profundidades e épocas de avaliação, Luz *et al.* (2011) observaram aumentos significativos da aplicação do silicato nos teores de $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$, teores de Ca, Mg, K, H^+Al e V% quando em comparação com o calcário, para todas as profundidades avaliadas, em curto período de reação dos materiais no solo; entretanto, o material calcário proporcionou melhor efeito de correção a longo prazo.

Estudo conduzido para quantificar a dessorção competitiva entre os ânions silicato e fosfato na fração argila gibbsítica de um Gleissolo Melânico, com o Si e o P previamente adsorvidos ao material coloidal, adicionando-se, na sequência, o P e o Si intercalados, mostrou que a aplicação prévia de Si reduziu a fixação de fosfato. Desse modo, a aplicação de Si previamente à de fósforo favorece sua fitodisponibilidade em solos altamente intemperizados, evidenciando interação entre os dois nutrientes (POZZA *et al.*, 2007).

1.4 Silício na planta

O silício não é um elemento essencial para as plantas, porém Epstein e Bloom (2005) ressaltam que plantas crescendo em ambiente rico em silício devem diferir daquelas presentes em ambientes deficientes nesse elemento, e podendo ser considerado um elemento agronomicamente essencial, pois propicia vários efeitos positivos para mais de 30 espécies (KORNDÖRFER; OLIVEIRA, 2010).

As plantas absorvem o silício da solução do solo na forma de ácido de monossilícico (H_4SiO_4) (MITAMI; MA, 2005). O processo de absorção do ácido monossilícico, que tem carga neutra, ocorre pela dissolução através da membrana, podendo ocorrer por apoplasto ou por simplasto. O mecanismo de absorção radicular de silício pelas plantas foi considerado por muito tempo, exclusivamente, passivo, sendo feito por difusão ou fluxo de massa (JONES; HANDRECK, 1967), porém, atualmente, são bem detalhados os mecanismos de absorção ativa de silício, que é feito por proteínas de membranas específicas, codificadas por genes específicos para este fim nas culturas do arroz, milho e cevada (MA *et al.*, 2007; MITAMI *et al.*, 2009; CHIBA *et al.*, 2009).

Após ser absorvido e transportado até parte aérea, o ácido monossilícico deposita-se, na forma de sílica amorfa hidratada inicialmente nos tecidos mais jovens e posteriormente vai se acumulando rapidamente nas células senescentes, sob a forma de sílica polimerizada (SiO_2), também chamada de opala biogênica, fitólitos (DAYANANDAM *et al.*, 1983). Em geral, a concentração de sílica é maior nas folhas velhas do que na raiz e ocorre de forma mais rápida nas gramíneas (RAFI; EPSTEIN, 1999). Sangster *et al.* (2001) complementam que o acúmulo de silício é governado pelo desenvolvimento celular e maturação dos tecidos e, portanto, pode ser influenciado por vários fatores, como idade, tipo de tecido ou órgão, transpiração e absorção radicular. Nos cereais, o conteúdo de silício nos órgãos é maior com o aumento da idade da planta.

Yoshida *et al.* (1962) e Agarie *et al.* (1998) observaram que a maior parte do silício absorvido pela planta é depositada na folha, nos tecidos da epiderme logo abaixo da cutícula, mais precisamente nas paredes celulares mais externas.

Na planta, o silício se concentra nos tecidos de suporte, do caule e nas folhas, podendo ser encontrado em pequenas quantidades nos grãos. Em geral, o conteúdo

médio de silício das raízes é menor se comparado com o caule e folhas, em alguns casos, como por exemplo, na soja, o teor de silício na raiz é maior do que nas folhas (OLIVEIRA; CASTRO, 2002).

A deposição de silício na forma de sílica polimerizada ocorre com 99% do silício total absorvido e menos de 1% fica na forma coloidal ou iônica (MA *et al.*, 2001) e ocorre com maior frequência nas regiões onde a água é perdida em grande quantidade (EPSTEIN, 1999; MA *et al.*, 2001). Porém o transporte e o acúmulo de sílica podem ser regulados também por processo ativo, que é desencadeado pelo estímulo à proteção contra doenças, pragas e outras condições de estresse (MARSCHNER, 1995; CURRIE; PERRY, 2007).

Em geral, as plantas mostram concentrações de silício na sua matéria seca, de 1 a 100 g kg⁻¹ de silício do peso seco (EPSTEIN, 1999). A forma como o silício é absorvido e depositado difere entre as espécies, as quais podem ser classificadas em três grupos: as acumuladoras de silício, em geral as monocotiledôneas (gramíneas), que têm processo ativo de absorção de silício, com teor foliar acima de 10,0 g kg⁻¹ de silício na matéria seca; as não acumuladoras, em geral leguminosas, que absorvem silício a favor de um fluxo de transpiração de forma mais lenta que a absorção de água e discriminam o silício na absorção por simplasto, sendo estas plantas exclusoras na absorção de silício, ou seja, à medida que as raízes absorvem silício, elas também o eliminam para a solução do solo e têm teor foliar menor que 5,0 g kg⁻¹ de silício na matéria seca; e as intermediárias na acumulação de silício têm absorção de Si por simplasto na mesma velocidade que a absorção de água, e teor menor que 10 g kg⁻¹ (TAKAHASHI *et al.*, 1990).

Os vasos do xilema são os responsáveis pelo transporte do elemento na planta, e sua distribuição é diretamente dependente das taxas de transpiração dos órgãos. Esta distribuição varia de acordo com a espécie estudada: ocorre de maneira uniforme em plantas que acumulam pouco Si, e nas acumuladoras, como o arroz (*Oryza sativa*), 90% do elemento se encontra na parte aérea (MENGEL; KIRKBY, 1987).

Maiores concentrações de Si podem ser encontradas em tecidos suportes do caule e das folhas, e também nos grãos, em baixa concentração. De toda a quantidade do elemento acumulado nas plantas, 99% está sob a forma de ácido silícico polimerizado, fórmula esta de difícil solubilização.

Considera-se, normalmente, que a concentração média de Si nas raízes seja um décimo da concentração no caule, e sua movimentação dentro da planta depende das

concentrações presentes na solução do solo, além da taxa transpiratória do órgão e da espécie em questão (MARSCHNER, 1995).

Apesar de não ser considerado elemento essencial às plantas, estudos relacionam a aplicação de Si ao solo com o crescimento e aumento de produtividade das culturas, principalmente as espécies gramíneas, consideradas acumuladoras.

Além disso, o fornecimento de Si poderia acarretar maior estabilidade produtiva, em razão da maior tolerância ao estresse hídrico, uma vez que a quase totalidade da produção de grãos está situada em áreas com ocorrência de veranicos, principalmente na região dos cerrados. Nota-se ainda que a maioria dos trabalhos realizados mostra apenas o efeito da aplicação de corretivos na nutrição e produtividade das culturas, sem, no entanto, verificar qual componente da produção foi alterado, visto poderem ser alterados por condições climáticas, fertilidade do solo e práticas agrícolas, refletindo-se na produtividade de grãos. (CASTRO, 2009).

Aumentos de produtividade devido ao manejo integrado e sustentável da aplicação de Si na cultura do arroz também foram evidenciados por Alvarez e Datnoff (2001), que concluíram que os ganhos obtidos com a aplicação deste elemento ultrapassam os custos de aplicação, tornando-se, também, uma prática viável economicamente.

OBJETIVOS

1. Geral

O objetivo deste trabalho será avaliar o desempenho de cultivares de feijão, submetidas a diferentes épocas de supressão da irrigação, sob aplicação de silício via solo.

2. Específicos

1. Verificar o efeito do estresse hídrico nos diferentes estádios fenológicos de desenvolvimento do feijoeiro;
2. Avaliar se o silício, quando aplicado, influenciará o melhor desempenho no desenvolvimento do feijoeiro sob diferentes épocas de supressão da irrigação;
3. Avaliar qual cultivar, entre as duas a serem testadas apresentará melhores resultados sob as diferentes épocas de supressão da irrigação; e
4. Analisar o comportamento das plantas que receberão aplicação de silício via adubação sob estresse hídrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, A.M.A. *et al.* Silicato de cálcio como amenizante da toxidez de metais pesados em mudas de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 2, p.180-188, 2009.

AGARIE, S.; HANAOKA, N.; UENO, O.; MIYAZAKI, A.; KUBOTA, F.; AGTA, W.; KAUFMAN, P. B. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in Rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. **Plant production Science**, v. 1, n.2, p. 96-103. 1998.

ALCARDE, J. A.; RODELLA, A. A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N. *et al.* (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003, v. 3, p. 291-334.

ALVAREZ, C. C. A. **Produção do arroz em função da adubação com silício e nitrogênio no sistema de sequeiro e irrigado por aspersão**. 2004. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

ALVAREZ, J.; DATNOFF, L. E. The economic potential of silicon for integrated management and sustainable rice production. **Crop Protection**, v.1, n. 20, p. 43-48, 2001.

AMORIM NETO, M. S.; MAGALHÃES, P. C.; GOMIDE, R. L. Aspectos fenológicos da cultura do feijoeiro submetidos a diferentes tensões de umidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 1995, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1995. p. 134-136.

BEZERRA, F. M. L.; ARARIPE, M. A. E.; TEÓFILO, E. M.; CORDEIRO, L. G.; SANTOS, J. J. A. Feijão caupi e déficit hídrico em suas fases fenológicas. **Revista Ciência Agronômica**, v. 34, n. 1, p. 13-18, 2003.

BRASIL. Decreto n. 4.954, de 14 de janeiro de 2004. **Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e**

substratos para plantas destinados à agricultura. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d4954.htm. Data de acesso 10 de maio de 2016.

CAMARGO, M.S.de; PEREIRA, H.S.; KORNDÖRFER, G.H.; QUEIROZ, A.A.; REIS, C.B.dos. Soil reaction and absorption of silicone by rice. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.64, n.2, p.176-180, 2007.

CARVALHO-PUPATTO, J. G.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n.12, p. 1213-1218, 2004.

CARVALHO-PUPATTO, J. G.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MAUAD, M.; SILVA, R. H. Efeito de escória de alto forno no crescimento radicular e na produtividade de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n.11, p. 1323-1328, 2003.

CASTRO, G.S.A. **Alterações físicas e químicas do solo em função do sistema de produção e da aplicação superficial de silicato e calcário.** 2009, 160f. Dissertação (Mestrado em agricultura) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2009.

CHAVES, M. M.; PEREIRA, J. S.; MAROCO, J.; RODRIGUES, M.; RICARDO, C. P. P.; OSÓRIO, M. L.; CARVALHO, I.; FARIA, I.; PINHEIRO, C. How plants cope with stress in the field: photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, Oxford, v. 89, p. 907-916, 2002.

CHIBA, Y.; MITANI, N.; YAMAJI, N.; MA, J. F. Hvlsi1 is a silicon influx transporter in barley. **Plant Journal**, v. 57, n.5, p. 810-818. 2009.

CORRÊA, J.C. *et al.* Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.2, p.263-271, 2009.

CORREIA, K. G.; NOGUEIRA, R. J. M. C. **Avaliação do crescimento do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetido ao déficit hídrico.** Ver. de Biologia e Ciências da Terra, v. 4, n. 2, 2004. Disponível em: <<http://eduep.uepb.edu.br/rbct/sumarios/pdf/amendoimdeficit.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

COSTA, A. R. **Texto acadêmico: As relações hídricas das plantas vasculares.** Portugal. Editora da Universidade de Évora, 2001. 75 p.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P., G. S.A. CASTRO.; COSTA C. H. M.; NETO J. F. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, n. 2, p. 404-410, 2013.

CURRIE, H. A.; PERRY, C. C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. **Annals of Botany**. v. 100, n.7, p. 1383-1389. 2007.

DAYANANDAM, P.; KAUFFMAN, P. B.; FRANKIN, C. I. Detection of silica in plant. **American Journal of Botany**, v. 70, n.1, p. 1079-1084. 1983.

EPSTEIN E.; BLOOM, A. J. **Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives**. ed., Sinauer Associates, Inc., 2005. 400p.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 641-664, 1999.

FASSBENDER, H.W. **Química de Suelos, com Ênfase em Suelos de América Latina**. Ed. IICA. San José, Costa Rica, 1978, 398 p.

GAO, X. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**. v.29, n.1, p.1637–1647, 2006.

GONG H. *et al.* Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v.169, n.2, p.313-321, 2005.

GRATÃO, PL. *et al.* Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, v.32, n.2, p.481-494, 2005.

HATTORI T. *et al.* Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. **Physiology Plant.**, v.123, n.2, p.459-466, 2005.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F. Efeito da deficiência hídrica no desenvolvimento e rendimento de quatro cultivares de arroz em terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n.4, p. 134-139, 2009.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. **Advances in Agronomy**, v. 19, p. 107-149. 1967.

KELLING, C. R. S. **Efeito da disponibilidade de água no solo sobre os componentes do balanço hídrico e o rendimento do feijoeiro**. Santa Maria, 1995. 91f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 1995.

KORNDÖRFER, G. H.; OLIVEIRA, L. A. Uso do silício em culturas comerciais. In: Simpósio Brasileiro sobre Silício na Agricultura, 5., 2010, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV/DFP, p. 3-25, 2010.

KORNDÖRFER, G.H.; NOLLA, A.; LARA CABEZAS, W.A.R.. **Impacto ambiental del uso de la vinaza en la agricultura y su influencia en las características químicas y físicas del suelo**. Palmira, Colombia, 2004. 233 p.

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. **The Botanical Review**, v. 68, n. 2, p. 270-334. 2002.

LIMA, M. de A.; CASTRO, V. F. de; VIDAL, J. B.; ENEAS, F, J. Aplicação de silício em milho e feijão-de-corda sob estresse salino. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.2 p. 398-403, 2011.

LUZ, P.H.C. *et al.* Effect of silicate fertilization on soil and on palisade grass plants under grazing intensities. **Revista Brasileira Zootecnia**, v.40, n.7, p.1458-1465, 2011

MA, J. F.; YAMAJI, N.; MITAMI, N.; TAMAI, K.; KONISHI, S.; FUJIWARA, T.; KATSUHARA, M.; YANA, M. An efflux transporter of silicon in rice. **Nature**, v. 448, n.1, p. 209-212. 2007.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. "Soil fertilizer and plant silicon research in japan", In: **Kyoto University Technical conferences**, n. 5, 2002, p. 112.

MA, J.F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants, In: DATNOFLF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Eds). **Silicon in Agriculture**. The Netherland, Elsevier Science, 2001, p.17-39.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Editora Ceres, 2006. 631p.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. Viçosa, MG: UFV, 2005. 451 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. San Diego. Academic Press., 1995. 889p.

MAUAD, M.; FILHO, G. F.; CRUSCIOL, C. A. C.; CORRÊA, J. C. Teores de silício do solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 04, p. 867-873, 2003.

MELO, S.P.; MONTEIRO, F.A.; MANFREDINI, D. Silicate and phosphate combinations for marandu pallisadegrass growing on an oxisol. **Scientia Agrícola**, v.64, n.3, p.275-281, 2007.

MELO, S. P.; KONDORFER, G. H.; KONDORFER, C. M., LANA, R. M. Q.; SANTANA, D.G. Silicon accumulation and water deficit tolerance in brachiaria grasses. **Scientia Agrícola**, v. 60, n. 4, p. 755-759, 2003.

MENGEL K, KIRKBY, EA. Principles of Plant Nutrition. Worblaufen-Bern, Switzerland: **International Potash Institute**, 1987.

MEYER, J.H.; KEEPING, M.G. Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H., eds. **Silicon in agriculture**. Amsterdam, Elsevier Science, p.257-276, 2001.

MITAMI, N.; YAMAJI, N.; MA, J. F. Identification of maize silicon influx transporters. **Plant Cell Physiology**, v. 50, n.1, p. 5-12. 2009.

MITAMI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n.2, p. 1255-1261, 2005.

NASCIMENTO, J. T.; PEDROSA, M. B.; SOBRINHO, J. T. Efeito da ação da variação

de níveis de água disponível no solo sobre o crescimento e produção do feijão caupi, vagens e grãos verdes. **Horticultura Brasileira**, v. 22, n. 2, p. 174-177, 2004.

NEVES, M. G.; SILVA, J. N.; SILVA, L. S.; SOUZA, L. C. **Teores de Prolina, Aminoácidos e Proteínas Solúveis Totais em Resposta a Deficiência Hídrica e Concentrações de Silício em Plantas de Milho**. Anais do XXIX Congresso Nacional de milho e sorgo - Águas de Lindóia - 26 a 30 de Agosto de 2012.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; ALBUQUERQUE, M. B.; SILVA, E. C. Aspectos ecofisiológicos da tolerância à seca em plantas da caatinga. In: NOGUEIRA, R. J. M. C.; ARAÚJO, E. L.; WILLADINO, L. G.; CAVALCANTE, U. M. T. **Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas**, Recife: UFRPE, Imprensa Universitária, p. 22-31, 2005.

NERI, D. K. P. GOMES, F. G.; MORAES, J. C.; GÓES, G. B. MARROCOS, S. T. P. Influência do silício na suscetibilidade de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) ao inseticida lufenuron e no desenvolvimento de plantas de milho. **Ciência Rural**, vol.39, n.6, p. 1633-1638, 2009.

OLIVEIRA, L.A.; KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, A.C. Acumulação de silício em arroz de diferentes condições de pH da rizosfera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.4, p.685-690, 2007.

OLIVEIRA, L. A. **Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio**. 2009. 157 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

OLIVEIRA, L. A.; CASTRO, N. M. **Ocorrência de Sílica nas folhas de *Curatella americana* L. e de *Davilla elliptica* ST. Hil.** Ver. Horizonte Científico, 2002. Disponível em: <www.propp.ufu.br/revistaeletrônica/B/OCORRENCIA.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2010.

PAIVA, R.; OLIVEIRA, L.M. **Fisiologia e Produção Vegetal**. Lavras. Ed. UFLA, 2006. 104 p.

PIMENTEL, C.; SARR, B.; DIOUF, O.; ABBOUD, A. C. S.; ROY-MACAULEY, H. Tolerância protoplasmática foliar à seca em dois genótipos de caupi cultivados em campo. **Revista Universidade Rural, Série. Ciências da Vida**, v. 22, n. 1, p. 7-14, 2002.

POZZA, A.A.A. *et al.* Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos e gibbsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.11, p.1627-1633, nov. 2007.

PRADO, R. M.; COUTINHO, E. L. M.; ROQUE, C. G.; VILLAR, M. L. P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivos da acidez do solo no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 4, p. 539-546, 2002.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de**

Ciência do Solo, v.27, n.2, p.287-286, 2003.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil – Estudos na cultura da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, Funep, 2001. 68p.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.9, p.1199-1204, 2001.

PULZ, A.L. *et al.* Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.4, p.1651-1659, 2008.

RAFI, M. M.; EPSTEIN, E. Silicon absorption by wheat (*Triticum aestivum* L.) **Plant and Soil**, v. 211, n.2, p. 223-230, 1999.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews**, New York, v. 58, n.2, p. 179-207, 1983.

REIS, T. H. P.; GUIMARÃES, P. T. G.; FIGUEIREDO, F. C.; POZZA, A. A. A.; NOGUEIRA, F. D.; RODRIGUES, C. R. **O silício na nutrição e defesa de plantas**. Belo Horizonte: EPAMIG, (EPAMIG. Boletim Técnico, 82), 2007. 120p.

ROCHA, L. C. M.; PRADO, R de M.; ALMEIDA, T. B. F. Efeito residual da escória de siderurgia como fonte de silício para a cultura do sorgo. **Revista da FZVA**, v.18, n.2, p. 101-115, 2011.

RODRIGUES, F. A.; OLIVEIRA, L. A.; KORNDÖRFER, A. P. Silício: um elemento benéfico e importante para as plantas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 134, p. 14-20, 2011.

SADRAS, V. O.; MILROY, S. P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. **Field Crops Research**, v. 47, n.2-3, p. 253-266, 1996.

SANGSTER, A. G.; HODSON, M. J.; PARRY, D.W. Silicon deposition and anatomical studies in the inflorescence bracts of four *Phalaris* species with their possible relevance to carcinogenesis. **New Phytologist**, v. 93, n.1, p. 105 – 122, 2001.

SANTOS, D. dos; FIOREZE, S. L.; FANO, A.; MACHADO, F. R.; PIVETTA, L. G.; COSTA, A. C. T. da; GUIMARÃES, V. F. Características morfofisiológicas de três cultivares de trigo submetidos ao déficit hídrico no início do florescimento. In: Seminário Internacional da Cadeia do Trigo, 4., Cascavel, 2009. **Anais...** Cascavel: FAG, 2009.

SAVANT, N. K.; KORNDORFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1999.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. D.; DATNOFF, L. E. Silicon in management and

sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, v. 58, n.1, p. 151-199, 1997.

SILVEIRA, P. M. da; STONE, L. F. Irrigação. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 25, n. 223, p. 74–82, 2004.

SOBRAL, M.F. *et al.* Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.867-872, 2011.

SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes pela aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, n.4, p. 928-935, 2008.

SOUZA, G. M.; VIANA, J. De O. F.; OLIVEIRA, R. F. de. Asymmetrical leaves induced by water deficit show asymmetric photosynthesis in common bean. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 2, p. 223-227, 2005.

SZILAGYI, L. Influence of drought on seed yield components in common bean. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, Sofia, Special Issue, p. 320-330, 2003.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. p.449-484.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. **Science of the rice plant: physiology**, Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, cap. 5, p. 420-433. 1995.

TAKAHASHI, E.; MA, J. F.; MIYAKE, Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, v. 2, n.2, p. 2-122. 1990.

TEIXEIRA, I. R.; SILVA, R. P.; SILVA, A. G.; KORNDÖRFER, P. H. Fontes de silício em cultivares de feijão nas safras das águas e da seca. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 39, n. 4, p. 562-568, 2008.

VERSLUES, P.E.; AGARWAL, M.; KATIYAR-AGARWAL, S.; ZHU, J.; ZHU, J.K.. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal**, v. 45, p. 523–539, 2006.

ZLATEV, Z.; STOYANOV, Z. Effects of water stress on leaf water relations of young bean plants. **Journal Central European Agriculture**, Zagreb, v. 6, n.1, p. 5-14, 2005.

YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Chemical forms, mobility and deposition of silicon in rice plant. **Soil Science Plant Nutrition**, v. 8, n.3, p. 15-21, 1962.

CAPÍTULO I – Estresse hídrico em cultivares de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) adubado com silício

(Normas de acordo com a revista *Ciência Agronômica*)

Hidrical stress on common bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) fertilized with silicon

RESUMO – Objetivou-se neste trabalho avaliar o desempenho das cultivares BRS Estilo e Pérola com o estabelecimento de períodos de supressão da irrigação em diferentes estádios do ciclo vital (vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e maturação) sob duas condições de adubação com silício (Uso e Ausência). Os tratamentos foram dispostos em delineamento experimental inteiramente casualizados, com vinte tratamentos, em três repetições. Avaliaram-se a massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca de sementes, massa da matéria seca de raízes, altura das plantas, diâmetro do caule, número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade de grãos. Para número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade de grãos conforme se protelou a irrigação houve um incremento na cultivar BRS Estilo. A cultivar BRS Estilo apresentou para número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade maiores médias, quando adubadas com silício. A cultivar Pérola, adubada com silício, apresentou as maiores médias nas épocas de supressão da irrigação em relação às plantas não adubadas para massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca de sementes e massa da matéria seca de raízes. A cultivar Pérola, adubada com silício apresentou as maiores médias para altura de plantas em relação às não adubadas nas diferentes épocas de supressão da irrigação. A cultivar Pérola apresentou no estádio maturação as maiores médias para número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade quando adubadas com silício.

Palavras-chave: BRS Estilo, Pérola, supressão da irrigação, silicato de cálcio e magnésio.

ABSTRACT - This study aimed to evaluate the performance of BRS Style and BRS Pearl cultivars with the establishment of irrigation suppression periods at different stages of the life cycle (vegetative, pre-flowering, full blossom, pod filling, and ripening), under two silicon fertilization conditions (Usage and Absence). The treatments were arranged in a completely randomized experimental design, with twenty treatments in three replicates. The dry mass of the aerial part, seed dry matter mass, root dry matter mass, plant height, stem diameter, pods amount per plant, grains amount per pod, and grain yield were evaluated. For pods amount per plant, grains amount per pod, and grain yield, there was an increase in the BRS Style cultivar, as the irrigation delayed. The BRS Style cultivar presented higher averages for pods amount per plant, grains amount per pod, and productivity, when fertilized with silicon. The Pearl cultivar fertilized with silicon presented the highest averages in the irrigation suppression periods in relation to the unfertilized plants for dry mass of the aerial part, seed dry matter mass, and root dry matter mass. The Pearl cultivar fertilized with silicon presented the highest averages for plant height in relation to unfertilized ones in the different irrigation suppression periods. The Pearl cultivar presented in the ripening stage the highest averages for pods amount per plant, grains amount per pod, and productivity, when fertilized with silicon.

Keywords: BRS Style, BRS Pearl, Irrigation Suppression, Calcium and Magnesium Silicate.

INTRODUÇÃO

O feijão é um dos principais constituintes da alimentação da população brasileira, sendo um alimento que apresenta em sua constituição todos os aminoácidos essenciais (RIBEIRO, 2007). Além disso, O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) tem grande destaque no setor agrícola nacional e mundial. No entanto, fatores ambientais, como o estresse hídrico, são indicados como um dos motivos para os baixos rendimentos, na produtividade do feijão no Brasil (FIGUEIREDO *et al.*, 2007).

De acordo com dados da CONAB na safra 2015/2016, o Brasil implantou a cultura em 477,2 mil hectares, tendo o Centro-Oeste contribuído com 85,3 mil hectares de feijão de 3ª safra, ou seja, o feijão irrigado, Goiás participado com 41,2 mil hectares, com produtividade média de 2.886 kg ha⁻¹ de grãos.

A adaptação de plantas a ambientes de estresse é um desafio da agricultura moderna, fato que torna necessário entender o seu comportamento em ambientes contrastantes, com e sem estresse, e a inter-relação entre eles. Entre os vários estresses abióticos, a deficiência

hídrica se destaca pela amplitude de ocorrência e pela redução na produtividade.

Os solos do Bioma Cerrado apresentam características peculiares, como pH em H₂O baixo (<5,5), alta saturação de Al³⁺ e baixos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, abrangendo as camadas superficial (0-20 cm) e sub-superficial (>20 cm) (SOUSA; LOBATO, 2004), além de baixos teores de silício (Si) trocável, em virtude do alto intemperismo, o que limita sua capacidade de fornecimento de Si solúvel às plantas (BRADY, 2007).

O silício é capaz de ser acumulado na parede celular, formando, assim, uma dupla camada de sílica-cutícula e sílica-celulose, trazendo inúmeros benefícios às plantas, sendo que, o acúmulo de sílica na parede celular reduz a perda de água por transpiração, podendo ser um fator de adaptação ao estresse hídrico. Porém, são escassos os estudos que visam a analisar a influência do Si no crescimento, desenvolvimento e produtividade na cultura do feijoeiro comum, sendo ainda incipientes e poucos conclusivos (CRUSCIOL *et al.*, 2013).

Os silicatos de Ca e Mg, apresentam composição semelhante à dos carbonatos, os quais podem substituir os calcários e são recomendados com base nos métodos de calagem (KORNDÖRFER *et al.*, 2004). Os autores, mencionam que os benefícios proporcionados pelos silicatos de Ca e Mg estão associados ao aumento da disponibilidade de Si, à elevação do pH e ao aumento de Ca e Mg trocável. Contudo, o efeito do fornecimento de Si à cultura do feijoeiro e sua relação com a resposta da cultura à deficiência hídrica ainda não são bem entendidos.

O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de cultivares de feijão, submetidas a diferentes épocas de supressão da irrigação, com e sem a aplicação de silício no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no período de março a maio de 2015 em ambiente controlado em uma casa de vegetação climatizada instalada na área experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde/GO cujas coordenadas geográficas são 17°48'19,89" latitude (S); longitude (W) – 50°54'15,81", altitude média de 747 m. A casa de vegetação é constituída de cobertura de filme plástico de polietileno transparente, de 150 micra e laterais fechadas, com tela tipo sombrite com 30% de interceptação.

A casa de vegetação utilizada tem sistema de climatização (temperatura e umidade) por circulação e refrigeração de água, aeração controlada por exaustores e cortina de sombreamento. Todos esses dispositivos são automatizados e controlados por regulagem em

um painel de controle principal. A temperatura média do ambiente de controle foi de $27^{\circ}\text{C} \pm 3$, a umidade relativa média de $70\% \pm 3$ e a velocidade do vento de $2,4 \text{ km h}^{-1}$ (ventilador exaustor ligado).

O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico de textura franco-arenosa (EMBRAPA 1999). As amostras para determinação da análise de solo foram retiradas sob profundidade de 0 a 20 cm. As análises química e textural foram feitas conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (1997) se encontram na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química e textural do solo na profundidade de 0-20 cm.

pH	Ca	K	Mg	Al	H+Al	K	P(Mellich)	M.O.	Argila	Silte	Areia
CaCl ₂ 0,01M	cmolc dm ⁻³			mg dm ⁻³			g kg ⁻¹	g kg ⁻¹			
4,7	0,41	0,01	0,22	0,07	1,22	5,0	0,22	7,7	120	40	840

O delineamento adotado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2x5x2 com três repetições, perfazendo um total de 60 unidades experimentais (vasos).

O experimento foi composto por vinte tratamentos, estabelecidos pela combinação das épocas de supressão da irrigação [Vegetativo (20 DAP), Pré-floração (40 DAP), Plena floração (50 DAP), Enchimento de grãos (70 DAP) e Maturação (90 DAP)] das cultivares Pérola e BRS Estilo e do Silício (Uso e Ausência).

As sementes foram disponibilizadas pela Embrapa Arroz e Feijão.

Utilizou-se para o tratamento que recebeu silício o silicato de cálcio e magnésio com nome comercial de agrosilício aplicado 30 dias antes da semeadura, para elevar a saturação de bases a 70%, com uma dose de 1.800 kg ha^{-1} , sendo o equivalente a 900 mg dm^{-3} de solo, tendo o agrosilício as seguintes características: (PRNT = 72,3%, CaO = 42,1%, MgO = 12,4%, Si total = 8,1% e Si solúvel = 6,0%).

Todos os vasos continham 10 kg de solo oriundo de área cultivada do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, tendo sido utilizada adubação equivalente para a formulação de NPK de 94 mg dm^{-3} de nitrogênio, 577 mg dm^{-3} de fósforo e $258,62 \text{ mg dm}^{-3}$ de potássio conforme Novais (1991). Foram semeadas três sementes em cada vaso.

Após a emergência, uma plântula foi selecionada e conduzida durante o experimento. Para obter a irrigação recomendada adicionou-se uma determinada quantidade de água, a mesma para todos, até os vasos pararem de drenar, assim, obtivemos a umidade na capacidade de campo do solo (cm^3 de água cm^{-3} de solo). Todos os dias ao final da tarde, era feita irrigação até o solo atingir a capacidade de campo.

Foi feita, aos 25 dias após a emergência (DAE) uma adubação de N em cobertura, na

dose de 160 mg dm^{-3} , utilizando uréia como fonte para todos os tratamentos.

Antes que a cultura completasse seu ciclo, aos 85° DAE, foram feitas as medições de altura, diâmetro do caule, e contagens para número de vagens planta⁻¹ e número de grãos vagem⁻¹ e produção por vaso. Posteriormente, multiplicou-se o resultado pelo número de plantas ha⁻¹, obtendo-se assim a produtividade, tendo os dados sido tabulados. Posteriormente aos 90° dia após a semeadura as plantas foram colhidas e a parte aérea separada das raízes.

Na parte aérea, foram analisados: massa da matéria seca da parte aérea (g), massa da matéria seca de sementes (g), diâmetro do caule (mm), altura da planta (cm), número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade (kg ha⁻¹).

Na parte subterrânea, foi analisada a massa da matéria seca de raízes (g). As amostras para determinação da massa da matéria seca de raízes foram obtidas colocando-se, individualmente, o volume de solo correspondente ao vaso de 10 kg sobre uma peneira com malha de 10 mm, onde receberam jatos de água de torneira para separar o solo das raízes. Concluído o processo de lavagem, as raízes foram postas para secar em estufa com temperatura ajustada para 65°C.

As raízes, a parte aérea e as sementes, separadamente, foram postas em estufa com temperatura ajustada para 65° C até que todo o material atingisse peso constante. Após seco, o material vegetal foi pesado e os resultados obtidos para massa da matéria seca das raízes, massa da matéria seca da parte aérea e peso da matéria seca das sementes foram registrados.

O diâmetro do caule foi determinado a um cm do nível do solo com o auxílio de um paquímetro. A altura de planta foi medida a partir do nível do solo adotando-se como base para medição, o meristema apical das plantas, utilizando uma trena.

As diferenças entre as médias foram avaliadas pelo teste estatístico de Tukey à 5% de probabilidade, utilizando-se o pacote estatístico Statistical Analysis Systems (1991).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cultivar BRS Estilo

Ao suprimir a irrigação nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultivar BRS Estilo adubada com silício, observou-se redução significativa no acúmulo de matéria seca da parte aérea nos estádios vegetativo e pré-floração (Tabela 2). No entanto, quando a cultivar não foi adubada com silício todos os estádios apresentaram semelhança na maturação, exceto

o estágio vegetativo, que apresentou as menores médias (Tabela 2). Observou-se que a cultivar apresentou diferentes comportamentos dentro de uma mesma época de supressão da irrigação, em relação à presença ou ausência do elemento Si no solo, para massa da matéria seca da parte aérea. Um dos motivos seria a redução da área foliar, que é a resposta mais provável das plantas ao déficit hídrico, principalmente nos estádios iniciais de desenvolvimento e, conseqüentemente, da massa seca da parte aérea, quando ocorre uma reação de defesa da planta ao déficit hídrico, diminuindo a transpiração da planta e, conseqüentemente, a perda de água para a atmosfera. Taiz e Zeiger (2013) relatam que área foliar menor transpira menos, conservando efetivamente, um suprimento de água limitado no solo por um período mais longo.

Tabela 2 – Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e maturação na massa da matéria seca da parte aérea (M.S.P.A.), massa da matéria seca de sementes (M.S.S.) e massa da matéria seca de raízes (M.S.R.) da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.

Estádios	M.S.P.A. (g)		M.S.S (g)		M.S.R. (g)	
	Silício (Si)					
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
Vegetativo	2,0566 aB	1,9857 aC	0,0000 aD	0,0000 aC	3,7317 aC	1,9405 bB
Pré-floração	2,6008 bB	3,2707 aB	0,0000 aD	0,0000 aC	1,7867 bD	5,4500 aA
Plen.floração	5,7437 aA	6,0766 aA	1,1795 aC	0,0000 bC	12,3118 aA	5,3766 bA
Enc. de vagens	7,2859 aA	3,6289 bB	1,6073 aB	1,0163 bB	7,7100 aB	2,7776 bB
Maturação	6,3313 aA	5,3263 bAB	4,2290 aA	1,6789 bA	1,7816 bD	6,7962 aA

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Segundo Hattori *et al.* (2005), a redução de massa seca de folhas pode ser atribuída à sensibilidade da cultura à deficiência hídrica, pois, mesmo num período curto de déficit hídrico a planta pode reduzir sua área foliar, e conseqüentemente, a fotossíntese, resultando em menor acúmulo de massa seca e menor produção.

Os dados obtidos confirmam aqueles encontrados por Firmano *et al.* (2009), que observaram que plantas de soja submetidas ao déficit hídrico apresentaram menor biomassa na parte aérea. Freire *et al.* (2012) em estudo sobre o acúmulo de massa seca em gliricídia em resposta ao estresse hídrico (com e sem estresse hídrico) e a doses de fósforo, também observaram que a massa seca da parte aérea das plantas foi reduzida com o estresse hídrico.

Analisando a Tabela 2 observa-se que plantas de feijão submetidas a estresse hídrico nas diferentes épocas de supressão adubadas com silício apresentaram para peso da matéria seca de sementes valores iguais a zero, ou seja, não produziram sementes as plantas com supressão hídrica nos estádios vegetativo e pré-floração para plantas adubadas com silício. Segundo Costa *et al.* (2008) o estresse hídrico reduz a produção de matéria seca e o rendimento da cultura, dependendo esta redução das proporções com que o estresse tenha

afetado as áreas de atividade fotossintética pelo déficit imposto.

Os dados referentes às mesmas condições de estresse, mas sem adubação com silício, para massa da matéria seca de sementes, seguiram o mesmo comportamento, observando-se valores iguais a zero nos estádios de supressão da irrigação, vegetativo, pré-floração e plena floração, ou seja, a planta não conseguiu produzir sementes. Fazendo uma análise entre plantas adubadas com silício e não adubadas observa-se que plantas adubadas com silício apresentaram maiores médias.

Para massa da matéria seca de raízes, observa-se, na Tabela 2 que a cultura apresentou diferentes comportamentos conforme se suprimia a irrigação, tendo sido observado que no estágio de plena floração a cultura apresentou as maiores médias de desenvolvimento radicular superando a da testemunha (maturação) para plantas que receberam silício via adubação. Oliveira (2009) verificou em feijoeiros comuns maior crescimento das raízes em profundidade sob aplicação de silício no solo, aumentando o volume de solo explorado, possibilitando maior absorção de água e nutrientes pela planta, conferindo maior tolerância ao déficit hídrico. A relação entre a matéria seca da raiz e a matéria seca da parte aérea expressa um valor funcional entre a taxa fotossintética e a absorção de água pelas raízes, que em condições tidas como normais, apresenta certo equilíbrio (TAIZ; ZEIGER, 2013). Por outro lado sob condições de estresse hídrico, geralmente aumenta a relação entre matéria seca da raiz e a matéria seca da parte aérea. Esse aumento é derivado provavelmente da redução da área foliar que ocorre antes da redução da taxa fotossintética, resultando em excesso de carboidratos para as raízes, contudo há relatos variados nesta relação sob condições de deficiência hídrica.

Analisando-se a Tabela 2 quando não houve uso do silício observou-se que as médias para esta variável foram menores em relação ao tratamento com silício, exceto no estágio de pré-floração e maturação. Santos *et al.* (2013) avaliaram a capacidade de adaptação e os mecanismos de resposta ao estresse hídrico de duas cultivares de *Brachiaria brizantha* (Marandu e BRS Piatã) submetidas ao déficit hídrico. Observou-se para estas cultivares um aumento da percentagem de raízes nas camadas mais profundas do solo. No entanto, de acordo com Pinto *et al.* (2008), plantas cultivadas em um volume limitado de solo pode ter o desenvolvimento do sistema radicular comprometido, ou seja, prejudicado. A massa seca da parte aérea (MSPA) das plantas foi reduzida com o maior tempo de estresse hídrico (Tabela 2), provavelmente em decorrência da baixa produção de fotoassimilados causada pela redução na disponibilidade de água para as plantas. O estresse hídrico causa redução no potencial hídrico foliar, na transpiração (KUMAR; SHARMA, 2009), e na atividade das enzimas do

Ciclo de Calvin, além de alterar a partição de assimilados entre as partes das plantas (KUMAR; SHARMA, 2009), resultando em menor produção de massa seca. Kumar e Sharma (2009) observaram que plantas de *Vigna radiata* cultivadas no campo e submetidas ao estresse hídrico através da suspensão da irrigação acumularam maior quantidade de massa seca na parte aérea em relação às raízes quando submetidas a estresse hídrico. Além disso, observaram que o estresse hídrico reduziu a massa seca das folhas, hastes, vagens e grãos. Em plantas de amendoim, gergelim e mamona, cultivadas em vaso e submetidas a diferentes ciclos de deficiência hídrica, Pinto *et al.* (2008) observaram limitações no acúmulo de massa seca na parte aérea, causadas pela deficiência hídrica.

De maneira geral, o maior crescimento da raiz em relação à parte aérea é um caráter adaptativo, comum às plantas submetidas a estresse hídrico. A redução da produção da parte aérea das plantas submetidas ao déficit hídrico tem sido constatada por vários autores (PINTO *et al.*, 2008).

Observa-se, na Tabela 3, no que se refere à altura de plantas, que elas seguiram o mesmo comportamento da Tabela 2 para peso médio da matéria seca de raízes, ou seja, plantas sob déficit hídrico apresentaram maior alongamento do caule e conseqüentemente maior peso de matéria seca da parte aérea. Os resultados encontrados na literatura quanto ao comportamento do caráter altura de plantas são divergentes, sendo que, em alguns casos os genótipos apresentaram redução da estatura de planta pelo fato do estresse hídrico reduzir o turgor das células e, conseqüentemente, seu crescimento (COSTA *et al.*, 2008), porém, em outros casos, ocorre um aumento quando submetido ao estresse hídrico, conseqüência do estiolamento das plantas quando submetidas a essas condições (AGUIAR *et al.*, 2008), sendo que, os genótipos que apresentaram redução na altura não têm atributos de tolerância ao estresse hídrico.

Para diâmetro do caule não houve diferença significativa quanto ao uso e ausência de silício nas diferentes épocas de supressão da irrigação (Tabela 3). No entanto, observou-se que, quanto mais se protelou a irrigação maiores valores para diâmetro do caule foram obtidos. Vale *et al.* (2012) em estudo sobre avaliação sobre tolerância ao estresse hídrico em feijão não, obtiveram para os diferentes genótipos de feijão estudados diferença significativa. Segundo os autores, o diâmetro de caule é de grande importância para a arquitetura da planta, visto que caules espessos e rígidos podem evitar o acamamento. Em função disso, esta pode ser uma variável eficiente na discriminação de genótipos de feijão, submetidos à deficiência hídrica (Vale *et al.*, 2012).

Tabela 3 – Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimentos de vagens e maturação na altura de plantas (A.P.) e diâmetro do caule da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.

Estádios	A.P. (cm)		Diâmetro do caule (mm)	
	Silício (Si)			
	Com	Sem	Com	Sem
Vegetativo	42,3766 aC	42,7000 aC	4,9000 aC	4,8500 aC
Pré-floração	49,2533 bB	53,1000 aB	4,8800 aC	4,8366 aC
Plen.floração	63,1667 bA	65,5900 aA	5,1833 aB	5,2300 aB
Enc. de vagens	68,0000 aA	49,3266 bB	5,3766 aA	5,3700 aA
Maturação	64,8333 aA	63,7433 aA	5,4133 aA	5,3766 aA

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A redução no número de vagens por planta foi mais acentuada nas fases iniciais de supressão da irrigação (vegetativa e pré-floração) tanto na presença quanto na ausência de silício (Tabela 4). Observa-se que as médias para número de vagens por planta foram maiores quando as plantas receberam silício quando a supressão da irrigação ocorreu a partir da plena floração (Tabela 4). O mesmo comportamento ocorreu para número de grãos por vagem, ou seja, houve redução conforme se suprimia a irrigação. Comportamento semelhante foi evidenciado para produtividade conforme Tabela 4, sendo que a cultivar BRS Estilo apresentou maiores médias de produtividade sob aplicação de silício. A redução na produtividade foi mais acentuada nos estádios em que ocorreu a supressão da irrigação no início (vegetativo e pré-floração), tendo sido observado que as reduções em termos de percentagem para a cultivar BRS Estilo adubada com Si foram respectivamente de 100% para os estádios vegetativo e pré-floração, 72% plena floração e de 61,99% para a fase de enchimento de grãos em relação à maturação. Quando não recebeu adubação com Si, a cultura apresentou os seguintes resultados para produtividade em relação à maturação: 100% para os estádios vegetativo, pré-floração e plena floração e 39,46% para enchimento de vagens. Sousa *et al.* (2009) em estudo sobre estresse hídrico e profundidade de incorporação do adubo afetando os componentes de rendimento, avaliaram produtividade (kg ha^{-1}), número de vagens por planta e número de grãos por vagem, tendo, a supressão da irrigação, durante os diferentes estádios de desenvolvimento do feijoeiro, interferido significativamente, de modo negativo, em todas as variáveis de rendimento analisadas.

Estes dados confirmam aqueles encontrados por Freitas *et al.* (2014) em estudo sobre crescimento de feijão-caupi sob efeito de veranico nos sistemas de plantio direto e convencional avaliando a variável matéria seca das vagens, que também obtiveram redução em função do estresse.

Tabela 4 – Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimentos de vagens e maturação no número de vagens planta⁻¹ e produtividade de grãos da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.

Estádios	N.V.P		N.G.V		Produtividade (kg ha ⁻¹)	
	Silício (Si)					
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
Vegetativo	1,6666 aC	1,3333 aD	0,0000 aD	0,0000 aC	0,0000 aD	0,0000 aC
Pré-floração	2,6666 aC	2,6666 aC	0,0000 aD	0,0000 aC	0,0000 aD	0,0000 aC
Plen.floração	8,3333 aB	2,5566 bC	3,3333 aC	0,0000 bC	283,0880 aC	0,0000 bC
Enc. de vagens	8,3445 aB	6,6432 bB	4,6667 aB	1,6667 bB	385,7520 aB	243,91bB
Maturação	12,3544 aA	8,3452 bA	7,6668 aA	4,6667 bA	1014,9600 aA	402,944 bA

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Cultivar Pérola

A massa da matéria seca da parte aérea do feijoeiro é uma importante variável de crescimento, estando associada significativamente com a acumulação de nutrientes pela cultura. A Tabela 5 mostra que as plantas de um modo geral, de modo geral, apresentaram um acúmulo de matéria seca da parte aérea conforme se protelava a irrigação. Segundo Taiz e Zeiger (2013), como a célula é a unidade básica da vida, pode-se dizer que o crescimento do organismo reflete o crescimento de suas células individualmente, o crescimento como um aumento irreversível em tamanho (volume) ou em massa. Visto que a maior parte do volume da célula é ocupado por água, pode-se admitir que, para uma célula aumentar seu volume ela precisa absorver água. Caso uma célula não possa absorver água, ela não poderá crescer, ou seja, acumular massa. Analisando a Tabela 5, observa-se que a cultivar Pérola, sob adubação com silício, apresentou as maiores massas de matéria seca. Segundo Gunes *et al.* (2008) os silicatos de cálcio e magnésio aliviam o estresse à seca, pois, evitam danos à membrana celular, visto que, em plantas sob estresse hídrico ocorrem aumento na resistência estomática, acumulação de prolina e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e peroxidadação lipídica da membrana, porém, com a presença do silício, ocorre a diminuição de seus níveis de dano à membrana, aumentando o teor de água nas folhas, havendo com isso, aumento do processo fotossintético e formação dos esqueletos de carbono. Freitas *et al.* (2014), em estudo sobre crescimento de feijão-caupi sob efeito de veranico nos sistemas de plantio direto e convencional também obtiveram redução em função do estresse hídrico para peso de matéria seca da parte aérea, independentemente do sistema de plantio, afirmando ainda que os índices de crescimento são influenciados pela fase fenológica da planta e pelo estresse hídrico.

Tabela 5 – Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimentos de vagens e maturação na massa da matéria seca da parte aérea (M.S.P.A.), massa da matéria seca de sementes (M.S.S.) e massa da matéria seca de raízes (M.S.R.) da cultivar Pérola adubada com silício e não adubada.

Estádios	M.S.P.A. (g)		M.S.S. (g)		M.S.R. (g)	
	Silício (Si)					
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
Vegetativo	4,5495 aC	2,5759 bB	0,0000 aC	0,0000 aB	1,6640 aD	1,5884 aC
Pré-floração	5,9625 aC	1,2927 bB	0,0000 aC	0,0000 aB	4,9260 aC	0,3098 bD
Plen.floração	8,4714 aB	5,4791 bA	2,0444 aB	0,0000 bB	7,2544 aAB	2,0639 bBC
Enc. de vagens	8,4052 aB	5,8059 bA	0,0000 aC	0,0000 aB	8,2525 aA	5,3568 bA
Maturação	12,5453 aA	6,5394 bA	3,9160 aA	0,5414 bA	6,4710 aB	3,4741 bB

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Em trabalho feito com caupi, Leite *et al.* (2004) afirmam que os efeitos negativos sobre o crescimento da cultura são maiores quando os déficits hídricos apresentam maior duração, independentemente da fase de aplicação, resultando em progressiva redução da matéria seca total, de folhas, flores e frutos. Os mesmos autores observaram que, em déficits hídricos longos, as plantas diminuíram acentuadamente seu crescimento o mesmo ocorrendo no presente estudo.

Analisando os dados para massa da matéria seca de sementes, observa-se severo dano causado pelo estresse hídrico nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, tanto para plantas que receberam silicato de cálcio e magnésio quanto para as que não receberam (Tabela 5). Houve reduções iguais à zero para os estádios vegetativo e pré-floração e enchimento de vagens (Tabela 5). Segundo Pedroso *et al.* (2009) quando o estresse hídrico ocorre nos estádios iniciais de desenvolvimento da semente, ele pode resultar em decréscimo na produção, além de efeitos negativos na atividade fotossintética, com redução na produção de assimilados para o desenvolvimento da semente. Os danos mais severos ocorreram para as plantas que não receberam silício, tendo para todas as épocas valores iguais a zero para peso de matéria seca de sementes, exceto na maturação (Tabela 5). Segundo Hong-Bo (2008), a água é considerada o principal fator ambiental da regulação do crescimento e desenvolvimento de uma planta, assim, a habilidade para resistir à falta de água é de fundamental importância para a continuidade do seu ciclo de vida. O déficit hídrico impõe um dilema entre a conservação da água pela planta e a taxa de assimilação de CO₂ para produção de carboidratos, e em resposta, a planta desenvolve mecanismos morfológicos e bioquímicos para otimizar o uso da água e reduzir sua perda, para garantir sua sobrevivência e a perpetuação da sua espécie (FARIAS *et al.*, 2007).

Observa-se também que a massa da matéria seca de raízes, nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura (vegetativo e pré-floração) apresentou as menores médias, ou

seja, o estresse hídrico inibiu o desenvolvimento do sistema radicular. Também foi verificado que nos estádios de plena floração e enchimento de vagens o desenvolvimento do sistema radicular sob estresse hídrico foi superior ao da testemunha em plantas silicatadas (Tabela 5). Em condições de déficit hídrico no solo ocorrem sinais químicos nas raízes, os quais agem no comportamento dos estômatos. Um rápido ressecamento do solo, mesmo não afetando a parte aérea, pode causar aumento na concentração de ácido abscísico no xilema, produzido provavelmente na coifa das raízes, ocasionando fechamento dos estômatos e diminuindo a expansão celular (DAVIES; ZHANG, 1991).

Observa-se pela Tabela 6 que as plantas de feijão adubadas com silício apresentaram para altura as menores médias nos estádios de supressão da irrigação vegetativo e pré-floração. Para esta mesma variável, porém, plantas que não receberam silício apresentou menores médias no estágio de pré-floração. Castro e Crusciol (2013) descobriram que a aplicação de silicato em solos com baixo teor de P, seria capaz de aumentar a disponibilidade de P. Segundo estes autores, estes resultados são atribuídos a concorrência entre Si e P para o mesmos locais de adsorção nos colóides do solo, aumentando a disponibilidade de P para as plantas e com isso seu crescimento.

Tabela 6 – Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimentos de vagens e maturação na altura de plantas (A.P.) e diâmetro do caule da cultivar Pérola adubada com silício e não adubada.

Estádios	A.P. (cm)		Diâmetro do caule (mm)	
	Silício (Si)			
	Com	Sem	Com	Sem
Vegetativo	54,3200 aD	55,1100 aB	4,8400 aC	4,8000 aC
Pré-floração	61,3600 aC	43,2633 bC	4,8600 aC	4,8500 aC
Plen.floração	72,1266 aB	63,6633 bA	5,1966 aB	5,2366 aB
Enc. de vagens	71,9433 aB	61,3000 bAB	5,3733 aA	5,3165 aBC
Maturação	79,3666 aA	61,4766 bAB	5,3533 aA	5,4000 aA

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade.

Analisando a Tabela 7 observa-se que, sob estresse hídrico, os estádios mais afetados são o vegetativo, pré-floração e enchimentos de vagens em plantas silicatadas para número de vagens por planta (Tabela 7). Observa-se também um número muito pequeno de vagens por planta na maturação para estas plantas. No entanto, sob condições de uso do silício observa-se média de 10,67 vagens por planta no estágio de maturação e de 10,50 para plena floração.

Para número de grãos por vagem, a maioria dos estádios em que houve supressão da irrigação apresentou valores iguais a zero, exceto, nos estádios de plena floração e maturação em plantas silicatadas (Tabela 7). No entanto, plantas que não receberam silício apresentaram o único estágio produtivo na maturação, ou seja, plantas irrigadas durante todo o ciclo (Tabela

7).

Observando a produtividade de grãos (kg ha^{-1}) na Tabela 7, nota-se que as plantas sofreram sob as diferentes épocas de supressão da irrigação, exceto, para a época de plena floração, apresentando médias iguais a zero tanto para plantas que receberam silício quanto para aquelas que não receberam, ou seja, apesar de produzirem vagens, Tabela 7, elas estavam chochas. Resultados semelhantes foi encontrado por Torres *et al.* (2013) trabalhando com produtividade de feijão com lâminas de irrigação e coberturas de solo, que concluíram que a produtividade do feijoeiro, o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem são maiores quando a reposição de água no solo é feita com 100% da evapotranspiração.

Tabela 7 – Influência da supressão da irrigação em relação aos dias após a emergência (DAE) no número de vagens planta⁻¹ e produtividade (kg ha^{-1}) da cultivar Pérola adubada com silício e não adubada.

Estádios	N.V.P		N.G.V		Produtividade (kg ha^{-1})	
	Silício (Si)					
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
Vegetativo	1,6667 aBC	1,6667 aA	0,0000 aB	0,0000 aB	0,0000 aC	0,0000 aB
Pré-floração	2,3333 aB	2,6202 aA	0,0000 aB	0,0000 aB	0,0000 aC	0,0000 aB
Plen.floração	10,5031 aA	2,4802 bA	5,6667 aA	0,0000 bB	490,6024 aB	0,0000 bB
Enc. de vagens	0,6666 aC	1,3023 aA	0,0000 aB	0,0000 aB	0,0000 aC	0,0000 aB
Maturação	10,6670 aA	1,2856 bA	5,5026 aA	0,6673 bA	939,8560 aA	129,952bA

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

CONCLUSÕES

1. Para número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade conforme se protelou a irrigação, houve incremento para estes componentes de rendimento na cultivar BRS Estilo;
2. A cultivar BRS Estilo apresentou, para número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade, maiores médias, quando adubada com silício;
3. A cultivar Pérola, adubada com silício, para massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca de sementes e massa da matéria seca de raízes apresentou as maiores médias nas épocas de supressão da irrigação em relação às plantas não adubadas;
4. A cultivar Pérola apresentou, no estágio maturação, as maiores médias para os componentes de rendimento número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade, quando adubada com silício.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. S.; MODA-CIRINO, V.; FARIA, R. T.; VIDAL, L. H. I. Avaliação de linhagens promissoras de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerantes ao déficit hídrico. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 1-14, 2008.
- BRADY, N. C. **The nature and properties of soils**. 14. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2007. 980 p.
- CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, v. 195-196, p. 234-242, 2013.
- CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/>. Acesso em: 05 maio 2016.
- COSTA, J. R.; PINHO, J. L. M.; PARRY, M. M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 443-450, 2008.
- CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, p. 404-410, 2013.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa/ CNPS, 412p., 1999.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª edição Rio de Janeiro, p.11, 1997.
- FIGUEIREDO, M. G.; PITELLI, M. M.; FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R. Lâmina ótima de irrigação para o feijoeiro considerando restrição de terra e aversão ao risco. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.29, supl., p. 593-598, 2007.
- FIRMANO, R. S.; KUWAHARA, F. A.; SOUZA, G. M. Relação entre adubação fosfatada e deficiência hídrica em soja. **Ciência Rural**, v. 39, n. 7, p. 1967-1973, 2009.
- FREITAS, R.M.O.de.; DOMBROSKI, J.L.D.; FREITAS, C.L.de; NOGUEIRA, N.W.; PINTO, J.R.de.S. Crescimento de feijão-caupi sob efeito de veranico nos sistemas de plantio direto e convencional. **Bioscience Journal**, v.30, n.2, p.393-401, 2014.
- GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; DEL PELOS, M.J.; OLIVEIRA, J.P.de. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.7, p.649–656, 2011.
- HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; AN, P.; MORITA, S.; LUXOVÁ, M.; LUX, A. Application of silicon enhanced drought tolerance in sorghum bicolor. **Plant Physiology**, v. 123, n.4, p. 459-466, 2005.

HONG-BO, S. *et al.* Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes Rendus Biologies**, v.331, n.3, p.215-225, 2008.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicato de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: UFU/ICIAG, 2004. (Boletim Técnico, 1).

KUMAR, A.; SHARMA, K. D. Physiological responses and dry matter partitioning of summer mungbean (*Vigna radiata* L.) genotypes subjected to drought conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 195, n. 4, p. 270-277, 2009.

LEITE, M. L.; VIRGENS FILHO, J. S. Produção de matéria seca em plantas de caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) submetidas a déficits hídricos. **Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 43-51, 2004.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. de. **Ensaio em ambiente controlado**. In: OLIVEIRA, L. A. **Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio**. 2009. 157 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

PINTO, C. M.; TÁVORA, F. J. F. A.; BEZERRA, M. A.; CORRÊA, M. C. M. Crescimento, distribuição do sistema radicular em amendoim, gergelim e mamona a ciclos de deficiência hídrica. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 3, p. 429-436, 2008.

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

SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G.; ARAÚJO, L. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; VALLE, C. B.; PEZZOPANE, C. G. Response mechanisms of *Brachiaria brizantha* cultivars to water deficit stress. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.42, n.11, p.767-773, 2013.

SOUSA, D. M.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

SOUSA, M.A.de; LIMA, M.D.B.; SILVA, M.V.V.da; ANDRADE, J.W.de.S. Estresse hídrico e profundidade de incorporação do adubo afetando os componentes de rendimento. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.39, n.2, p.175-182, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 820 p.

VALE, N.M.do; BARILI, L.D.; ROZZETO, D.S.; STINGHIN, COIMBRA, J.L.M.; GUIDOLIN, A.F.; KÖOP, M.M. Avaliação para tolerância ao estresse hídrico em feijão. **Biotemas**, v.3, n.25, p.135-144, 2012.

CAPÍTULO II – Estresse hídrico na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) adubado com silício

(Normas de acordo com a revista *Ciência Agronômica*)

Hídric stress on bean crop (*Phaseolus vulgaris*) fertilized with silicon

RESUMO – O estudo foi conduzido em condições de campo com a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar BRS Estilo, objetivando avaliar o desempenho do feijoeiro com o estabelecimento de períodos de supressão da irrigação (vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e final ou maturação), adubado e não-adubado com silício. Avaliaram-se a massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca de sementes, massa da matéria seca de raízes de 0-20 cm, massa da matéria seca de raízes de 20-40 cm, altura de plantas, diâmetro do caule, número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade de grãos. Para massa matéria seca da parte aérea, observou-se maior acúmulo conforme se protelou a irrigação, e plantas adubadas com silício apresentaram as maiores médias em relação às não adubadas. Para massa da matéria seca de raízes (0-20 cm) e (20-40 cm), plantas adubadas com silício apresentaram as maiores médias em relação às não adubadas. Para altura de plantas, o estágio mais afetado pelo estresse hídrico foi o vegetativo. Para diâmetro do caule, plantas adubadas com silício apresentaram as maiores médias, exceto no estágio pré-floração. De um modo geral, para número de vagens por planta e número de grãos por vagem, as maiores médias foram obtidas com o uso do silício em todas as épocas em que houve supressão da irrigação. Para produtividade de grãos, observou-se incremento à medida que se protelava a irrigação, sendo que plantas adubadas com silício apresentaram as maiores médias.

Palavras – chave: Raízes, déficit hídrico, supressão da irrigação.

ABSTRACT - This study was carried out under field conditions with the bean (*Phaseolus vulgaris* L.) BRS Style cultivar, and aimed to evaluate the performance of common bean plants fertilized and unfertilized with silicon, with the establishment of irrigation suppression periods (vegetative, pre-flowering, full blossom, pod filling, and final or ripening). The dry matter mass of the aerial part, seed dry matter mass, dry matter mass of 0-20 cm roots, dry matter mass of 20-40 cm roots, plant height, stem diameter, pods amount per plant, grains amount per pod, and grain yield were evaluated. It was observed that greater accumulation for dry matter of the aerial part as the irrigation was delayed, and plants fertilized with silicon presented the highest averages in relation to the unfertilized ones. For dry matter mass of 0-20 cm roots and 20-40 cm roots, plants fertilized with silicon presented the highest averages in relation to the unfertilized ones. For plant height, the vegetative stage was the most affected by hydric stress. For stem diameter, plants fertilized with silicon presented the highest averages, except at the pre-flowering stage. In general, for the pods amount per plant and grains amount per pod, the highest averages were obtained with the use of silicon in all periods, in which there was irrigation suppression. It was observed that grain yield increased as the irrigation was delayed, and plants fertilized with silicon presented the highest averages.

Keywords: Roots, Hydric deficit, Irrigation suppression.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e consumidor da espécie *Phaseolus vulgaris*, que constitui uma das mais importantes fontes de proteína, carboidratos, vitaminas, minerais, fibras e compostos fenólicos com ação antioxidante. A cultura também se destaca pela importância socioeconômica em razão da mão de obra empregada durante seu ciclo (BORÉM; CARNEIRO, 2006).

Para atender às condições climáticas de deficiência hídrica das regiões produtoras com disponibilidade irregular de chuvas, como a dos Cerrados, a tolerância a esse estresse deve ser uma característica agregada às cultivares desde que, na maioria das vezes, não ocorre boa disponibilidade de chuva. Neste sentido, deve-se considerar, na seleção, a produtividade em condições adequadas de irrigação e com deficiência hídrica (GUIMARÃES *et al.* 2011).

Outros produtos têm sido utilizados para proporcionar melhorias na resistência das plantas às intempéries, uma destas formas é a utilização do silicato de cálcio e magnésio, que tem sido considerado benéfico para inúmeras espécies de plantas. No solo, ele tem caráter residual, fato que amplia os efeitos na manutenção da neutralização da acidez do solo e na

disponibilização de nutrientes e do próprio silício. Nas plantas, seu transporte e acúmulo podem ser regulados por um processo ativo, que é desencadeado pelo estímulo à proteção por desordens de origem biótica ou abiótica. Seu depósito na parede exterior da epiderme forma uma dupla camada com cutícula que ajuda na defesa contra as mais variadas adversidades (OLIVEIRA, 2009).

Além disso, o silício melhora o aproveitamento da água, devido à baixa transpiração, em decorrência da redução do potencial hídrico celular, levando ao fechamento dos estômatos, proporciona maior rigidez estrutural dos tecidos e aumenta a resistência mecânica a insetos e fitopatógenos pela formação de uma barreira física e produção suplementar de toxinas, que podem agir como substâncias inibidoras. Com relação à produtividade, pesquisas evidenciaram aumento da produtividade promovido pelo uso de silicatos em diferentes culturas (ROCHA, 2011).

Entre os benefícios ocasionados pelo uso de adubação silicatada às plantas, relatados na literatura, têm-se resistência às doenças e pragas, tolerância à toxicidade por metais pesados, tolerância a estresses hídricos e salinos, menor transpiração, promoção de crescimento e nodulação em leguminosas, efeito na atividade de enzimas e na composição mineral, melhoria da arquitetura da planta, facilitando a mecanização, redução no acamamento e consequente aumento da taxa fotossintética e aumento de produtividade (GUNES *et al.*, 2008).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do feijoeiro sob estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento adubado com silício.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em campo na Fazenda Capivara, a 500 m da Universidade de Rio Verde (UniRV), no período de julho a agosto de 2015. A propriedade está situada no município de Rio Verde – GO, cujas coordenadas geográficas são: 17°48'19,89'' latitude (S) longitude (W) – 50°54'15,81'', com altitude média de 747m. O clima é classificado, conforme Köppen, do tipo Aw (tropical), tendo sido utilizado solo classificado como Latossolo Vermelho distroférrico de textura areno-argilosa (EMBRAPA 1999). As amostras para determinação da análise de solo foram retiradas sob profundidade de 0 a 20 cm. As análises química e textural foram feitas conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (1997) (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização química e textural do solo na profundidade de 0-20 cm

pH	Ca	K	Mg	Al	H+Al	K	P(Mellich)	M.O.	Argila	Silte	Areia
CaCl ₂ 0,01M	cmolc dm ⁻³			mg dm ⁻³			g kg ⁻¹	g kg ⁻¹			
4,9	3,52	0,35	1,18	0,03	3,87	138	6,58	40	54	12	34

A cultura anterior ao feijoeiro foi a cultura do milho. A área do experimento foi gradeada, arada e nivelada.

Utilizou-se para o tratamento que recebeu silicato de cálcio e magnésio com nome comercial de agrossilício, aplicado 30 dias antes da semeadura, para elevar a saturação de bases a 60%, com uma dose de 1.500 kg ha⁻¹, tendo o agrossilício as seguintes características: (PRNT = 72,3%, CaO = 42,1%, MgO = 12,4%, Si total = 8,1% e Si solúvel = 6,0%).

Os sulcos foram feitos com uma enxada, controlando a profundidade com o auxílio de uma trena (5 cm de profundidade). A adubação no plantio foi de 420 kg ha⁻¹ de MAP e 40 kg ha⁻¹ de KCl, feita manualmente, e uma adubação de cobertura de 40 kg ha⁻¹ de uréia aos 25 dias após a emergência (EMBRAPA, 2004). O plantio do feijão foi feito no dia 08/07/2015 com as cultivar BRS Estilo. As sementes foram distribuídas equidistantemente na linha de semeadura, de forma manual, nas proporções adequadas para a obtenção de uma população desejada de 240.000 plantas ha⁻¹ sob profundidade de deposição a 5 cm.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições, tendo nas parcelas os níveis de supressão da irrigação (vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de grãos, testemunha ou maturação), e nas subparcelas a combinação do uso ou ausência do silício.

As parcelas eram compostas por 04 (quatro) fileiras de 3,5 metros de comprimento cada, sendo a parcela útil constituída pelas duas fileiras centrais (2,0 m x 0,90 m). O espaçamento entre as linhas de semeadura foi de 0,45m e o número médio de plantas por metro linear foi de 15, sendo que ao 8º dia após a emergência foi feita a contagem, com stand final correspondente a 14 plantas por metro. A área de cada parcela foi de 6,3 m².

As diferenças entre as médias foram avaliadas pelo teste estatístico de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o pacote estatístico Statistical Analysis Systems (1991).

As sementes foram tratadas com o princípio ativo Thiamethoxan, 4 mL kg⁻¹ de semente de feijão. A mistura foi feita manualmente, tendo sido gastos 30 mL para área total, com objetivo de controlar a mosca-branca nos estádios iniciais de desenvolvimento do feijoeiro.

Foi feito no dia 16/06/2015 correspondente, ao 8º dia após o plantio (DAP), o controle de formigas cortadeiras (*Atta* spp.), utilizando o formicida isca granulada sulfuramida na quantidade de 10 g m⁻².

Em 08/08/2015 e 08/09/2015, correspondente ao 30º DAP, foi feita capina em todo o

experimento.

Aos 40° DAP, aplicou-se o inseticida de princípio ativo metamidophos (0,75 L ha⁻¹) para o controle das vaquinhas (*Diabrotica speciosa*) e da mosca branca (*Bemisia tabaci*). Nesta operação, utilizou-se um pulverizador costal de 20L, pressurizado com CO₂, munido de barra com bico do tipo leque 11002, trabalhando a uma pressão de 40 lb pol⁻².

A colheita foi feita manualmente em 11/10/2015, totalizando um ciclo de 93 dias.

O sistema de irrigação adotado foi o de microaspersão. A lâmina aplicada foi determinada pela evaporação diária medida através do tanque de evaporação “Classe A”, localizado na estação meteorológica da Universidade de Rio Verde, visando a repor a quantidade de água perdida pela planta por evapotranspiração, usando o coeficiente de cultura (Kc) segundo a fase de desenvolvimento do feijoeiro, juntamente com valores da umidade relativa do ar e velocidade do vento no local (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados climatológicos obtidos na estação meteorológica da Universidade de Rio Verde durante o período de julho a outubro de 2015.

Meses	T.ar. (°C)	U.R. (%)	Precipitação (mm)	E.C.A (mm)
Julho	23,08	58,0	10,00	226,70
Agosto	25,35	45,0	0,00	259,20
Setembro	24,35	48,0	60,00	245,05
Outubro*	24,09	48,0	38,00	21,10

T.ar - temperatura média do ar; U.R. - Umidade relativa do ar; E.C.A. – Evaporação do tanque “Classe A”.

*Dados coletados até dia 13/10/2015

A definição do momento da aplicação da irrigação foi determinado quando o somatório da evapotranspiração da cultura atingiu valores próximos a 16,4 mm de acordo com necessidade da cultura, e a curva característica de umidade da área, em função da intensidade de aplicação dos microaspersores, que forneciam vazão de 5,28 mm h⁻¹.

O microaspersor utilizador é do fabricante Naandanjain modelo Hadar 7110, bocal com diâmetro de 2,3mm e vazão de 265 L h⁻¹ de cor marrom, diâmetro molhado de 10,4 m e raio de 5,2 m.

Os coeficientes de cultura (Kc) usados no manejo da irrigação para as fases de desenvolvimento: germinação – folhas primárias (V0 – V2); primeira folha trifoliada – terceira folha trifoliada (V3 –V4); pré-floração – formação de vagens (R5 – R7); enchimento de grãos (R8) e maturação (R9), foram os propostos por Doorenbos & Kassam (1979) (Tabela 3).

Para a obtenção da curva de retenção de água no solo, foram retiradas amostras de solo, que foram saturadas com água por 24 horas e, em seguida, submetidas a diferentes potenciais mátricos (Ψ) em painéis de pressão de Richards, conforme metodologia da Embrapa (1997), sendo utilizadas seis amostras por potencial. Foram aplicados os Ψ de -0,06, -0,10, -0,33, -

0,60, -1,0 e -15 atm com o objetivo de simular um gradiente de umidade entre as amostras, obtendo para os respectivos potenciais os seguintes teores de água em %: 26, 24, 21, 20, 18,5 e 16%.

A supressão da irrigação foi feita nas seguintes datas em função do número de DAP: Fase vegetativa (28/07/2015); Pré-floração (18/08/2015); Plena floração (28/08/2015); Enchimento de grãos (18/09/2015) e Maturação ou Testemunha (08/10/2015).

Tabela 3 - Valores de coeficiente da cultura (K_c) utilizados nas diferentes fases de desenvolvimento do feijoeiro de acordo com as lâminas de água aplicadas por aspersão.

Fases de desenvolvimento				
V0-V2	V3-V4	R5-R7	R8	R9
0,30 – 0,40	0,70 – 0,80	1,05 – 1,20	0,65 – 0,75	0,25 – 0,30

Fonte: Doorenbos & Kassam (1979).

Na parte aérea, foram analisados a produtividade (kg ha^{-1}), número de vagens por planta, número de grãos por vagem, altura das plantas (cm) e diâmetro do caule (mm).

Na parte subterrânea, foi analisada a massa da matéria seca de raízes (g).

As plantas dentro das parcelas úteis foram escolhidas aleatoriamente num total de quatro plantas/ parcela.

O número de vagens/planta e o número de grãos/vagem foram obtidos através de contagens três dias antes da colheita.

O diâmetro do caule foi determinado a um cm do nível do solo, com o auxílio de um paquímetro, quatro dias antes de se realizar a colheita.

A altura de planta foi medida a partir do nível do solo, adotando como base para medição o meristema apical das plantas, utilizando uma trena, quatro dias antes da colheita.

As amostras para determinação da massa da matéria seca de raízes sob as profundidades de 0-20 e 20-40 cm representadas por uma amostra por profundidade em cada parcela, a um 1,0 cm de distância do caule do feijoeiro para amostras de 0-20 cm. Para as amostras de 20-40 cm realizou-se uma trincheira e o anel foi cravado lateralmente. As amostras de 0-20 cm e 20-40 cm foram retiradas utilizando um anel com volume ($289,35 \text{ cm}^3$), e depois colocadas individualmente sobre uma peneira com malha de 10 mm, onde receberam jatos de água de torneira, a fim de separar o solo das raízes. Posteriormente, foram levadas para estufa a 65°C por 48h e após pesadas em balança.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando a Tabela 4, observa-se que, de modo geral, conforme se protelou a irrigação houve maior acúmulo para média de massa de matéria seca da parte aérea, tendo sido observado também que plantas de feijoeiro que receberam silício apresentaram as maiores médias em todas as épocas de supressão da irrigação (Tabela 4). Estes resultados diferem dos obtidos por Oliveira *et al.* (2013) em estudo sobre crescimento de cultivares de girassol ornamental influenciado por doses de silício no solo, que obtiveram resultados em que as doses de silício aplicadas no substrato não aumentaram significativamente as produções de fitomassa seca de folhas (FSF) e de parte aérea (FSPA), confirmando dados obtidos por Carvalho *et al.* (2009). De acordo com Lima *et al.* (2011), a aplicação foliar de silicato de sódio nas culturas do feijoeiro e do milho e a aplicação no solo no feijoeiro também não proporcionaram alterações significativas na matéria seca das folhas e dos caules. Entretanto, Gunes *et al.* (2008) e Zanão Júnior *et al.* (2009) verificaram aumento da produção de matéria seca da parte aérea com o fornecimento de silício em girassol e em arroz, respectivamente. Korndörfer *et al.* (2010) e Tokura *et al.* (2007) observaram que a aplicação de silicato não fez nenhum efeito de rendimento para matéria seca da parte aérea de gramíneas de brachiaria e arroz, respectivamente.

Tabela 4 - Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e maturação na massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca de sementes e massa da matéria seca de raízes da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.

Estádios	P.M.S.P.A.		P.M.S.S		P.M.S.R. (0-20cm)		P.M.S.R.(20-40cm)	
	(g)		(g)		(g)		(g)	
	Silício (Si)							
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
Vegetativo	11,4200Ca	11,2775Ca	7,0800Da	7,7650Da	0,4128Ca	0,4301Ca	0,8493Ca	0,8032Ba
Pré-floração	10,6075Ca	8,5500Db	10,1450Ca	7,7875Da	1,2725Ba	0,0877Db	1,9259Ba	0,1205Db
Plen.floração	16,3925Ba	11,1650Cb	10,2850Ca	9,8075Ca	1,9264Aa	0,5254Cb	2,4657Aa	0,6715Bb
Enc. de vagens	16,4825Ba	14,4425Bb	19,4250Ba	15,4200Bb	2,0573Aa	1,3447Ab	2,2649Aa	1,4901Ab
Maturação	29,9575Aa	29,6925Aa	34,9925Aa	34,6050Aa	1,5785Ba	0,9150Bb	0,8819Ca	0,4840Cb

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Para massa da matéria seca de sementes, observa-se que as plantas também acumularam maior massa de matéria seca conforme se protelou a irrigação. Outro fator relevante é que plantas de feijoeiro não foram influenciadas significativamente para esta variável quando receberam silício (Tabela 4). No entanto, alguns autores afirmam que o silício influencia positivamente planta crescimento e rendimento de grãos, como consequência da melhoria da rigidez estrutural dos tecidos, melhora dos ângulos de folhas e luz de interceptação, melhorando a taxa fotossintética, e consequentemente, a massa de sementes (GONG; CHEN, 2012; MA;

YAMAJI, 2008).

Para massa da matéria seca de raízes (0-20cm), observa-se, pela Tabela 4, que as plantas sob estresse hídrico apresentaram maiores médias em relação à maturação nos estádios de plena floração e enchimento de grãos. Estes dados confirmam aqueles encontrados por Correia e Nogueira (2004) em estudo com a cultura do amendoim, submetido a déficit hídrico, em que as plantas de amendoim intensificaram a alocação de biomassa para o sistema radicular. Outro dado importante que pode ser analisado na Tabela 4 é que plantas submetidas a estresse hídrico, desde que adubadas com silício apresentaram maior massa média do sistema radicular (0-20 cm).

O comportamento da cultura sob estresse hídrico nos diferentes estádios de desenvolvimento adubada com silício apresentou as maiores médias em todos os estádios de desenvolvimento para a variável massa da matéria seca do sistema radicular (20-40 cm) (Tabela 4). No entanto, em plantas que não receberam silício para esta mesma variável, foram observadas as menores médias no estágio de desenvolvimento pré-floração (TABELA 4). Notou-se também que plantas de feijoeiro adubadas com silício apresentaram, em todos os estádios de desenvolvimento, as maiores médias para massa de matéria seca de raízes de (20-40 cm) em relação às não adubadas, fato também foi observado para massa de matéria seca de raízes de (0-20 cm) (Tabela 4). A cultura do feijoeiro apresenta a maior parte do seu sistema radicular sob a profundidade de 0-20 cm, um maior desenvolvimento do sistema radicular em profundidade fará com que a planta se torne mais resistente quando exposta a um veranico ou caso o sistema de irrigação sofra algum dano e necessite de manutenção.

Para altura de plantas, observa-se na Tabela 5 que sob estresse hídrico no estágio vegetativo, plantas adubadas com silício e não adubadas apresentaram as menores médias para esta variável em relação à testemunha. Sousa e Lima (2010) observaram que a altura das plantas do feijoeiro foi influenciada negativamente, apresentando menores médias nas fases vegetativa e pré-floração pela supressão da irrigação. Fancelli e Dourado Neto (2000), avaliando altura de plantas, concluíram que tanto o crescimento quanto o desenvolvimento e a translocação de fotoassimilados estão ligados à disponibilidade hídrica do solo. Estes resultados confirmam os obtidos por Correia e Nogueira (2004), que observaram o mesmo comportamento na cultura do amendoim. Neste estudo com supressão da irrigação em estádios de desenvolvimento da cultura, concluíram que os efeitos provocados pela supressão nos estádios iniciais reduziram seu crescimento sem, contudo, paralisá-lo. No processo de fotossíntese, a falta d'água influencia na deposição de matéria seca, limitando a disponibilidade de CO₂ e os processos de alongação celular.

Observa-se também que nos três primeiros estádios em que houve supressão da irrigação (vegetativo, pré-floração e plena floração), plantas adubadas com silício apresentaram as maiores médias para altura em relação às não adubadas. Fernandez *et al.* (2009) também observaram os mesmos resultados em que o uso de silicato de magnésio e de cálcio influenciou maior crescimento de plantas de feijoeiro.

Tabela 5 - Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e maturação na altura de plantas e diâmetro do caule da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.

Estádios	A.P. (cm)		Diâmetro do caule (mm)	
	Silício (Si)			
	Com	Sem	Com	Sem
Vegetativo	59,5000Ea	50,1500Db	5,5000Ca	2,5000Db
Pré-floração	95,7500Ba	56,7500Db	6,5000Ba	6,7500Ba
Plen.floração	75,2500Da	67,2500Cb	5,8750Ca	2,8000Db
Enc. de vagens	84,7500Ca	86,2500Ba	9,7250Aa	7,5000Ab
Maturação	91,0000Ab	102,5000Aa	10,0750Aa	5,3750Cb

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Observa-se, na tabela 5, que o estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento na cultura do feijoeiro em plantas adubadas com silício apresentou as maiores médias para diâmetro do caule em relação às não adubadas, exceto, na pré-floração. Plantas de feijoeiro com maior diâmetro do caule influenciam de forma positiva no momento da colheita, pois, estas plantas terão maior resistência ao acamamento.

Entretanto Paiva *et al.* (2015), em estudo sobre efeito do silicato de cálcio e magnésio nos parâmetros de desenvolvimento da cultura do feijoeiro comum em cultivo protegido com o uso da cultivar Pérola, não obtiveram para altura de plantas e diâmetro do caule aumentos significativos. O mesmo foi observado por Oliveira *et al.* (2013), ao verificarem que a aplicação de doses silício não influenciou a altura da planta nem o diâmetro caulinar, em estudo semelhante com girassol ornamental "Ring of Fire".

Observa-se, na Tabela 6, que, conforme se protelava a irrigação, havia um incremento na produção de vagens por planta, tanto em plantas adubadas com silício como nas não adubadas. Estudo conduzido por Oliveira *et al.* (2014) sobre desenvolvimento do feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.) sob déficit hídrico, cultivado em ambiente protegido, mostrou que o déficit hídrico afetou o desenvolvimento do feijão-fava, aumentando o abortamento de flores e vagens.

Tabela 6 - Influência da supressão da irrigação nos estádios vegetativo, pré-floração, plena floração, enchimento de vagens e maturação no número de vagens planta⁻¹, número de grãos vagem⁻¹ e produtividade (kg ha⁻¹) da cultivar BRS Estilo adubada com silício e não adubada.

Estádios	N.V.P		N.G.V		Produtividade (kg ha ⁻¹)	
	Silício (Si)					
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
Vegetativo	1,7500Da	1,7000Da	1,7500Ca	1,2500Db	1067,0100Ea	999,9425Ea
Pré-floração	13,2500Ba	7,2500Bb	5,5000Ba	2,5000Cb	1960,5250Da	1645,1825Db
Plen.floração	7,0000Ca	4,5000Cb	5,2500Ba	2,5000Cb	2579,3375Ca	1937,6450Cb
Enc. de vagens	13,0000Ba	10,2500Ab	7,5000Aa	7,2500Aa	3945,0675Ba	3845,9625Bb
Maturação	20,5000Ab	23,5000Aa	7,2500Aa	5,7500Bb	5869,3625Aa	5372,0325Ab

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Observa-se, na Tabela 6, que o estágio que mais sofreu com a supressão da irrigação, ou seja, déficit hídrico, foi o estágio vegetativo, tanto para plantas que receberam como para as que não receberam para a variável número de grãos por vagem. No entanto, observou-se também que plantas adubadas com silício apresentaram as maiores médias para esta variável, exceto no estágio enchimento de vagens (Tabela 6).

Para produtividade (kg ha⁻¹), observa-se, na Tabela 6, que conforme se protelou a irrigação, houve incremento, tanto para plantas adubadas com silício como para as que não foram. As plantas de feijoeiro que receberam silício apresentaram as maiores médias de produtividade nos diferentes estádios de supressão da irrigação, exceto no estágio vegetativo (Tabela 6).

CONCLUSÕES

1. Para massa matéria seca da parte aérea, observou-se maior acúmulo, conforme se protelou a irrigação e plantas adubadas com silício, com as maiores médias em relação às não adubadas;
2. Para massa da matéria seca de raízes (0-20 cm) e (20-40 cm), plantas adubadas com silício apresentaram as maiores médias em relação às não adubadas;
3. O estágio mais afetado pelo estresse hídrico foi o vegetativo para altura de plantas;
4. Para diâmetro do caule plantas adubadas, foram obtidas as maiores médias, exceto, no estágio pré-floração;
5. De modo geral, para número de vagens por planta e número de grãos por vagem, as maiores médias foram obtidas com o uso do silício em todas as épocas em que houve supressão da irrigação;
6. Para produtividade de grãos, observou-se incremento à medida que se protelava a irrigação, sendo que plantas adubadas com silício apresentaram as maiores médias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GONG, H.J. *et al.* Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. **Biologia Plantarum**, v.52, n.3, p.592-596, 2008.

OLIVEIRA, A. E. S.; SIMEÃO, M.; MOUSINHO, F. E. P.; GOMES, R. L. F. desenvolvimento do feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.) sob déficit hídrico cultivado em ambiente protegido. **Holos**, v.1, n.30, p.143-151, 2014.

BORÉM, A.; CARNEIRO, S. E. J. A cultura do feijão. In:_____ **Feijão**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2006. cap. 3, p. 45.

CORREIA, K.G.; NOGUEIRA, R.J.M.C. Avaliação do crescimento do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetido à déficit hídrico. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.4, n.2, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa/ CNPS, 412p., 1999.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, cap.1, p.21-53, 2000.

FERNANDEZ, F. A.; BULL, L. T.; CORREA, J. C.; CRESPIAM, D. R. Influência de silicato e calcário na decomposição de resíduos culturais e disponibilidade de nutrientes ao feijoeiro. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 33, 2009.

GONG, H.; CHEN, K. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 34, n. 4, p. 1589-1594, 2012.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, J. P. de; RANGEL, P. H. N.; RODRIGUES, C. A. P. Sistema radicular do arroz de terras altas sob deficiência hídrica. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 126-134, 2011.

GUNES, A.; INAL, A.; ADAK, M. S.; BAGCI, E.G.; CICEK, N.; ERASLAN, F. Effect of drought stress implemented at pre- or post- anthesis stage some physiological as screening criteria in chickpea cultivars. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 55, n.1, p. 59-67, 2008.

KORNDÖRFER, P. H.; SILVA, G. C.; TEIXEIRA, I. R.; SILVA, A. G.; FREITAS, R. S. Efeito da adubação silicatada sobre gramíneas forrageiras e características químicas do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 2, p. 119-125, 2010.

LIMA, M. de A.; CASTRO, V. F. de; VIDAL, J. B.; ENEAS, F, J. Aplicação de silício em milho e feijão-de-corda sob estresse salino. **Revista Ciência Agrônômica**, v.42, n.2, p. 398-403, 2011.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 65, n. 19, p. 3049-3057, 2008.

OLIVEIRA, L. A. **Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio**. 2009. 157 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

OLIVEIRA, J.T.L.; CAMPOS, V.B.; CHAVES, L.H.G.; GUEDES FILHO, D. H. Crescimento de cultivares de girassol ornamental influenciado por doses de silício no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, 2013.

PAIVA, L.C.; FREITAS, C.A.de; CURVÊLO, C.R.da.S.; PEREIRA, A.I.de.A.; VALE, D.M. Efeito do silicato de cálcio e magnésio nos parâmetros de desenvolvimento da cultura do feijoeiro comum. Congresso Estadual de Iniciação Científica do IF Goiano, 4., 2015, Urutaí. **Anais eletrônicos...** Urutaí: IFG, 2015. Disponível em: <<https://ifgoiano.edu.br/ceic/anais/files/papers/20356.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

ROCHA, L. C. M.; PRADO, R de M.; ALMEIDA, T. B. F. Efeito residual da escória de siderurgia como fonte de silício para a cultura do sorgo. **Revista da FZVA**, v.18, n.2, p. 101-115, 2011.

SOUSA, M. A. de; LIMA, M. D. B. Influência da supressão da irrigação em estádios de desenvolvimento do feijoeiro cv. Carioca comum. **Bioscience Journal**, v.26, n.4, p.550-557, 2010.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEMS INSTITUTE INC. **SAS System for linear models**. Third Edition, Cary, NC: SAS Institute Inc, 1991. 329p.

TOKURA, A. M. *et al.* Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 9-16, 2007.

ZANÃO JÚNIOR, L.A. *et al.* Rice resistance to brown spot mediated by silicon and its interaction with manganese. **Journal of Phytopathology**, v.157, n.2, p.73-78, 2009.

CONCLUSÃO GERAL

As cultivares de feijão estudadas apresentaram diferentes comportamentos sob estresse hídrico e quando adubadas com silício.

A cultura do feijoeiro nos seus primeiros estádios de desenvolvimento é muito sensível ao estresse hídrico, principalmente, quando cultivadas em solos arenosos.

Dentre as cultivares BRS Estilo e Pérola, a cultivar BRS Estilo se apresentou mais resistente ao estresse hídrico e melhores resultados quando adubadas com silício, novas cultivares devem ser testadas.

Estudos fisiológicos na planta do feijoeiro sob condições de estresse hídrico devem ser realizados para se entender o mecanismo de defesa criado pelo silício.

Uma análise econômica sobre custo benefício referente à silicatagem deve ser desenvolvida.