

UNIOESTE - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VIVIANE RUPPENTHAL

**ADUBAÇÃO SILICATADA NA CULTURA DA SOJA E SUA INFLUÊNCIA NA
TOLERÂNCIA AO DEFICIT HÍDRICO**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON

2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VIVIANE RUPPENTHAL

**ADUBAÇÃO SILICATADA NA CULTURA DA SOJA E SUA INFLUÊNCIA NA
TOLERÂNCIA AO DEFICIT HÍDRICO**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON

2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VIVIANE RUPPENTHAL

**ADUBAÇÃO SILICATADA NA CULTURA DA SOJA E SUA INFLUÊNCIA NA
TOLERÂNCIA AO DEFICIT HÍDRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Produção Vegetal.

Orientadora: Professora Dra. Maria do Carmo Lana

MARECHAL CÂNDIDO RONDON
FEVEREIRO/2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM AGRONOMIA
NIVEL MESTRADO E DOUTORADO**

VIVIANE RUPPENTHAL

**ADUBAÇÃO SILICATADA NA CULTURA DA SOJA E SUA INFLUÊNCIA NA
TOLERÂNCIA AO DEFICIT HÍDRICO**

Dissertação apresentada como pré-requisito de conclusão de curso de
Mestrado da Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Marechal Cândido Rondon, 11/02/2011.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Lana
Orientador

Prof. Dr. Alfredo Richart

Prof. Dr. Vandeir Francisco Guimarães

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca da UNIOESTE – Campus de Marechal Cândido Rondon – PR., Brasil)

R946a Ruppenthal, Viviane
Adubação silicatada na cultura da soja e sua influência na tolerância ao déficit hídrico./Viviane Ruppenthal. - Marechal Cândido Rondon, 2011.
69 p.

Orientador : Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Lana

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Marechal Cândido Rondon, 2010

1. *Glycine max*. 2. Silicato de cálcio. 3. Danos fisiológicos. 4. Nutrição de plantas. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 633.34
CIP-NBR 12899

Ficha catalográfica elaborado por Helena Soterio Bejio CRB-9^a/965

Algumas pessoas marcam nossa vida para sempre, umas porque nos ajudam na construção, outras nos apresentam projetos de sonhos e outras ainda porque nos desafiam a construí-los...

... dedico este trabalho as pessoas que contribuíram muito para ele e a todas aquelas que acreditaram que a ousadia e o erro são caminhos para as grandes realizações.

AGRADECIMENTOS

Aquele que me deu forças para continuar todos os dias... Deus, sem o qual nada seria possível.

A minha família, que me deu apoio e carinho.

À Universidade Estadual do Oeste de Paraná e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia (PPGA), pela oportunidade de realização do Mestrado.

A minha Orientadora Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Lana pela orientação, paciência, confiança e credibilidade em mim depositada.

A Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

A Agronelli Insumos Agrícolas pelo fornecimento do agrosilício.

Aos meus amigos, Jucinei Fernando Frandoloso, Fábio Steiner, Deise Dalazen Castagnara, em especial Tiago Zoz e Cristiane Claudia Meinerz, pela ajuda em todos os dias, noites, e madrugadas em que transcorreram as avaliações deste trabalho, pela convivência sincera e amiga e pelo estímulo, serei eternamente grata a vocês.

Aos membros componentes da banca examinadora, pela avaliação do trabalho, orientação, sugestões e contribuições fornecidas.

Aos funcionários do N.E.E. (Núcleo de Estações Experimentais) da UNIOESTE, em especial ao Alfeu Seibert Filho, pelo auxílio, atenção e boa vontade.

Aos colegas de pós-graduação pela convivência e amizade, em especial, Heloísa Maria Formentini, Juliane Mendes Lemos e Deisinara Giane Schulz.

As amigas, Anisele dos Santos, Débora Wolemberg e Emanuele Maccari, pela amizade e companheirismo.

E por último a todos que direta ou indiretamente colaboraram para elaboração, condução e conclusão deste trabalho.

Expressar em palavras toda a gratidão pela ajuda que recebi durante essa caminhada é impossível, porém, fica a lembrança a todos e de todos que contribuíram e as amizades feitas durante esse período.

A TODOS VOCÊS, MEU SINCERO OBRIGADA!!!!

“De tudo ficaram três coisas:

A certeza de que estamos sempre começando...

A de que precisamos continuar...

*A de que seremos interrompidos antes de
terminar.*

*Mas é possível, e aí está o ponto fundamental,
fazer...*

Da interrupção um novo caminho,

Da queda um passo de dança,

Do medo uma escada

Do sonho uma ponte

Do procurar, um encontro.”

Fernando Pessoa

RESUMO

A cultura da soja, principal produto agrícola da exportação brasileira, tem sido afetada por adversidades climáticas, como o déficit hídrico, resultando em redução de produtividade. O silício apesar de ser considerado um elemento não essencial, tem demonstrado efeito benéfico na sua aplicação, como a minimização das perdas de produção pelo déficit hídrico. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da aplicação de silício sobre as variáveis biométricas e nas características químicas e bioquímicas da soja sob déficit hídrico em Latossolo Vermelho eutroférico de textura muito argilosa. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Estação de Horticultura e Cultivo Protegido Professor Mário César Lopes, pertencente ao Núcleo de Estações Experimentais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Campus de Marechal Cândido Rondon – PR. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso em esquema fatorial 4 x 2 com quatro repetições. O primeiro fator foi composto por quatro doses de silício: 0, 224, 448 e 896 kg ha⁻¹ de SiO₂, e o segundo fator composto por dois regimes hídricos (sem e com imposição de déficit hídrico no início da fase reprodutiva, por sete dias). Cada parcela experimental foi constituída de dois vasos contendo 20 dm³ de solo e contendo duas plantas. As plantas foram conduzidas sob mesmo regime hídrico até o início da fase reprodutiva, e neste estágio diferenciaram-se os tratamentos com e sem irrigação. Os parâmetros avaliados foram: umidade gravimétrica do solo, conteúdo relativo de água, tolerância protoplasmática, atividade da enzima peroxidase, variáveis biométricas (área foliar e biomassa seca da raiz, caule + pecíolo, folhas, parte aérea e total) e teor foliar de silício, nitrogênio, fósforo e potássio. O aumento da dose de silício no solo não teve efeito na manutenção do conteúdo relativo de água em plantas de soja com déficit hídrico. A aplicação de SiO₂ até a dose de 896 kg ha⁻¹ em solo argiloso com teor inicial de 22,5 mg dm⁻³ de Si, além de não aumentar a tolerância da soja ao déficit hídrico, implicou na redução do acúmulo de massa seca e área foliar em plantas com déficit hídrico e hidratação satisfatória. A adubação com silício interferiu de forma negativa na absorção de nitrogênio em condições de déficit hídrico para a cultura da soja. A atividade da enzima peroxidase em plantas de soja é aumentada com a adubação com SiO₂ e em condições de estresse por déficit hídrico.

Palavras chaves: *Glycine max*, silicato de cálcio, danos fisiológicos, nutrição de plantas.

ABSTRACT

The soybean crop, the main agricultural product of Brazilian exports, has been affected by bad weather such as drought, resulting in reduced productivity. Despite the silicon being considered a non essential element, has demonstrated beneficial effect on your application, such as minimization of production losses by water deficit. Can be highlight the benefits of minimizing loss of production by water stress. Thus, the objective was to evaluate the effect of increasing levels of silicon in the development of soybean under drought in Latossolo Vermelho Eutroférico. The experiment was conducted in greenhouse conditions in Station Protected Cultivation and Horticulture Professor Mário César Lopes, belonging to the Center for Experimental Stations of the Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE Campus Marechal Cândido Rondon - PR. The experimental design was randomized blocks in factorial scheme 4 x 2 with four replications. The first factor was composed of four silicon rates: 0, 224, 448 and 896 kg ha⁻¹ for SiO₂, and the second factor consist of two water regimes (with and without the imposition of water deficit in the early reproductive stage for seven days). Each plot consisted of two vessels containing 20 dm³ of soil and two plants. The plants were conducted under the same water regime until the early reproductive phase, and at this stage differed from the treatments with and without irrigation. The parameters evaluated were gravimetric soil moisture, relative water content, protoplasmic tolerance, the peroxidase activity, biometric variables (leaf area and dry biomass of root, stem + petioles, leaves, shoots and total) and foliar silicon, nitrogen, phosphorus and potassium. Increasing the dose of silicon in the soil had no effect on the maintenance of relative water content of soybean plants to water deficit. The application of SiO₂ until the dose of 896 kg ha⁻¹ in clay soil with 22.5 mg dm⁻³ initial Si, do not increase in soybean tolerance to drought, resulted in the reduction of biomass accumulation and leaf area on plants with water deficit and hydration satisfactory. The silicon fertilization influenced negatively on the uptake of nitrogen in water deficit conditions for the crop. The peroxidase activity in soybean plants is increased by fertilization with SiO₂ and under stress by water deficit. And did not increase the resistance of soybean to water deficit, contributed to the reduction of biomass accumulation in both water regimes imposed, and negatively affect the absorption of nitrogen in water deficit conditions. The peroxidase activity in soybean plants is increased with fertilization and SiO₂ under stress by water deficit.

Key words: *Glycine max*, calcium silicate, physiological damage, plant nutrition.

ÍNDICES DE FIGURAS

- Figura 1.** Umidade gravimétrica do solo (U_g) durante o período de imposição do déficit hídrico e reidratação de soja sob manejo normal de irrigação (SD) e com imposição de déficit hídrico no início do florescimento da cultura (CD). Unioeste, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010.40
- Figura 2.** Conteúdo relativo de água das folhas (CRA) no “pre down” de soja submetidas ao déficit hídrico e reidratação e mantidas sob manejo normal de irrigação, no início do florescimento da cultura. Unioeste, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010.41
- Figura 3.** Porcentagem de integridade absoluta (PIA) no momento da reidratação de soja em função das doses crescentes de SiO_2 . UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010. (* significativo pelo teste t a 5% de probabilidade).....45
- Figura 4.** Atividade da enzima peroxidase da soja no momento da reidratação e três dias após a reidratação nos dois regimes hídricos impostos (a), e atividade da enzima peroxidase da soja no momento da reidratação e três dias após a reidratação em função das doses de SiO_2 aplicadas (b). UNIOESTE, marechal Cândido Rondon – PR, 2010. (* significativo pelo teste t a 5% de probabilidade). ...47
- Figura 5.** Massa seca de folhas (a), massa seca de caule + pecíolo (b), massa seca de raiz (c), massa seca da parte aérea (d) e massa seca total (e) da soja em função das doses crescentes de SiO_2 . UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010 (** e *, significativo pelo teste t a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente)....49
- Figura 6.** Teor de Si foliar em plantas de soja em função das doses crescentes do nutriente aplicadas no solo e em função dos sistemas hídricos impostos, sem déficit hídrico (SD) e com déficit (CD). UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010 (** significativo pelo teste t a 1% de probabilidade).....51
- Figura 7.** Teor de Nitrogênio foliar em plantas de soja em função das doses crescentes de SiO_2 aplicadas no solo e em função dos regimes hídricos impostos, sem déficit hídrico (SD) e com déficit (CD). UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010 (*, significativo pelo teste t a 5% de probabilidade).....52

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Características químicas do Latossolo Vermelho eutroférico coletado na camada de 0-20 cm de profundidade utilizado no experimento. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2009..... | 33 |
| Tabela 2. Características granulométricas do Latossolo Vermelho eutroférico coletado na cama de 0-20 cm de profundidade utilizado no experimento. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon, 2009..... | 33 |
| Tabela 3. Condutividade livre (CL) e porcentagem de integridade absoluta (PIA) no momento da reidratação e três dias após a reidratação da soja sob manejo normal de irrigação e com indução de déficit hídrico no início do florescimento. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010..... | 44 |
| Tabela 4. Massa seca de folhas (MSF), massa seca de caule + pecíolo (MSCP), e massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca total (MST) e área foliar (AF) da soja em função dos regimes hídricos impostos. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010..... | 48 |
| Tabela 5. Teor de Fósforo foliar em plantas de soja em função dos regimes hídricos impostos. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010..... | 53 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| ÍNDICES DE FIGURAS..... | ix |
| ÍNDICE DE TABELAS | x |
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 15 |
| 2.1 Cultura da soja..... | 15 |
| 2.2 Déficit hídrico | 16 |
| 2.2.1. Déficit hídrico e suas consequências na cultura da soja | 22 |
| 2.3 Silício | 23 |
| 2.3.1 Silício no solo | 24 |
| 2.3.2 Silício na planta | 27 |
| 2.2.3 Silício na cultura da soja..... | 29 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 32 |
| 3.1 Localização do experimento | 32 |
| 3.2 Delineamento experimental e tratamentos | 32 |
| 3.3 Implantação e condução do experimento | 32 |
| 3.4 Avaliações | 34 |
| 3.4.1. Avaliações durante o período de imposição do déficit hídrico | 34 |
| 3.4.2 Avaliações após o período de imposição do déficit hídrico | 37 |
| 3.5 Determinação dos teores de nitrogênio, fósforo, potássio e silício foliar | 38 |
| 3.6 Análise dos dados | 39 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 40 |
| 4.1 Avaliações durante a imposição do déficit hídrico | 40 |
| 4.1.1 Umidade gravimétrica do solo..... | 40 |
| 4.1.2 Conteúdo relativo de água nas folhas..... | 41 |
| 4.1.3 Tolerância protoplasmática (Liberação de eletrólitos) | 43 |
| 4.1.4 Atividade da enzima peroxidase | 46 |
| 4.2 Avaliações após o período de imposição do déficit hídrico..... | 47 |
| 4.2.1 Análise biométrica | 47 |
| 4.2.2 Teores de nitrogênio, fósforo, potássio e silício no tecido foliar | 50 |

| | |
|--|-----------|
| 5. CONCLUSÕES | 54 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 55 |

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L. Merrill) é uma cultura de clima tropical, sendo o Brasil um dos maiores produtores e exportadores mundiais de grãos de soja, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (EUA). No Brasil, a soja é a cultura com maior área cultivada, com 24,08 milhões de hectares de área de plantio na safra de 2010/2011 de, o que corresponde a um crescimento de 2,6%, ou 611,0 mil hectares superior a safra de 2009/2010, quando foram cultivadas 23,47 milhões de hectares, constituindo-se na maior área cultivada com a oleaginosa (CONAB, 2011).

Apesar do cenário favorável para a cultura da soja no Brasil, a ocorrência de adversidades climáticas ainda é um fator de risco e de insucesso no cultivo da soja, conforme mostra o relatório sobre a seguridade agrícola elaborado pelo Ministério do Planejamento. Dentre estas adversidades, a ocorrência de secas tem sido apontada como o principal evento prejudicial à cultura da soja.

Nas secas ocorridas nas safras de 1977/78, 78/79, 85/86 e 99/00, ocorreram perdas na produção em torno de 31%, 30%, 22% e 9%, respectivamente, em consequência do déficit hídrico (Miyasaka e Medina, 1981; Bergamaschi et al., 1986) Apesar dos números mostrarem que houve boa produção nos últimos anos, levantamentos e análises concluídos pelos técnicos do Departamento de Economia Rural da Secretaria da Agricultura, Deral (2009), apontaram que as perdas de grãos da soja devido à estiagem chegaram a 20% na safra de 2008/2009, no estado do Paraná.

A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta, atuando em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos. Desempenha a função de solvente, por meio do qual gases, minerais e outros solutos entram nas células e movem-se na planta. Tem, ainda, papel importante na regulação térmica da planta, agindo tanto no resfriamento como na manutenção e distribuição do calor (NEUMAIER e NEPOMUCENO, 1994).

O efeito da deficiência hídrica na produção depende da época de ocorrência e de sua severidade. A soja é particularmente sensível à deficiência hídrica durante a emergência das plântulas e na fase de florescimento e enchimento dos grãos, podendo ocorrer perdas significativas de produção, dependendo da duração e intensidade da falta de água. De acordo com Fageria (1989), nas fases de germinação e emergência, diminui o estande de plantas, no florescimento, causa o

aborto das flores e impede a antese, enquanto no enchimento dos grãos, afeta o peso dos grãos e, conseqüentemente, a produção.

Diante disso, torna-se necessário a realização de estudos que contribuam para a minimização das perdas de rendimento e depreciação da qualidade dessa oleaginosa, ocasionadas pelo déficit hídrico. Estudos mostram que mesmo o silício não sendo essencial, do ponto de vista fisiológico para o desenvolvimento das plantas, sua aplicação na agricultura é de grande relevância para as plantas cultivadas em lugares onde o período de estiagem é longo e severo, devido ao acúmulo de silício nos órgãos de transpiração que provoca a formação de uma dupla camada de sílica, a qual, pela redução de transpiração, faz com que a exigência de água pela plantas seja menor (RAIZER NETO, 2007).

O acúmulo de Si nas células da epiderme, particularmente em gramíneas, mantém as folhas mais eretas, aumentando a penetração da luz no dossel, diminui a transpiração excessiva, evitando ou diminuindo o déficit hídrico nas folhas e aumenta a resistência ao acamamento, pois aumenta a força mecânica do colmo. Com isso, ocorre um estímulo na fotossíntese e uma elevação no teor de clorofila, aumentando a assimilação de N em compostos orgânicos nas células, o suprimento de carboidratos, o fornecimento de material para a parede celular e a atividade radicular. Conseqüentemente, há uma maior absorção de água e nutrientes, notadamente nitrogênio, fósforo e potássio (MARSCHNER, 1995; TAKAHASHI, 1995).

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da aplicação de silício sobre as variáveis biométricas e nas características químicas e bioquímicas da soja sob déficit hídrico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma leguminosa anual, pertence à família Leguminosae, subfamília Papilionoideae. O gênero *Glycine* Willd inclui doze espécies perenes no subgênero *Glycine* e duas espécies anuais no subgênero Soja (PINTO, 1999).

Embora a soja tenha sido introduzida no Brasil no final do século XIX, ela foi, durante várias décadas, uma cultura marginal. Isso porque era explorada, sobretudo, para fornecer alimentos para animais criados em pequenas propriedades rurais do Rio Grande do Sul. Porém, especialmente a partir do início da década de 1970, a oleaginosa rompeu os limites regionais e o sistema tradicional de produção, para se transformar em um dos cultivos mais importantes da agricultura brasileira (EMBRAPA, 2009). Entre 1970 e 1985, a expansão da soja ocorreu baseada na abertura e consolidação de novas áreas para agricultura nas regiões Sul e Centro-Oeste. Essa forma de expansão deveu-se, em grande parte, a três fatores: mercados nacional e internacional favoráveis, políticas agrícolas de incentivo ao complexo agroindustrial nacional e desenvolvimento e oferta crescentes de modernas tecnologias de produção (EMBRAPA, 2009).

No contexto das grandes culturas produtoras de grãos, a soja foi a que mais cresceu em termos percentuais desde a década de 1970, tanto no Brasil quanto em nível mundial. De 1970 a 2007, o crescimento da produção global de soja foi da ordem de 500% (de 44 para 220 milhões de toneladas) (EMBRAPA, 2010). No Brasil a soja é a cultura com maior área cultivada, com uma área de plantio na safra de 2010/2011 de 24,08 milhões de hectares, o que corresponde a um crescimento de 2,6%, ou 611,0 mil hectares superior a safra de 2009/2010, quando foram cultivadas 23,47 milhões de hectares, constituindo-se na maior área cultivada com a oleaginosa (CONAB, 2011).

A produção de grãos de soja no Estado do Paraná passou de oito mil toneladas de média dos anos 1960 e 1961, para 150 mil na média dos anos 60; para 3,5 milhões de toneladas na média dos anos 70; para 4,5 milhões de toneladas na média dos anos 80 e para 6,5 milhões de toneladas na média dos anos 90 (EMBRAPA, 2003). O Paraná é o segundo maior produtor de soja do Brasil, ficando

atrás apenas do estado do Mato Grosso, com uma produtividade de 14 mil toneladas na safra de 2009/2010, e com um crescimento de 128,1 mil hectares em área cultivada na safra de 2010/2011 (EMBRAPA, 2010).

Apesar dos números mostrarem que houve boa produção nos últimos anos, levantamentos e análises concluídos pelos técnicos do Departamento de Economia Rural da Secretaria da Agricultura, Deral (2009), apontou que as perdas de grãos da soja devido à estiagem chegaram a 20% na safra de 2008/2009, no estado do Paraná.

Muchow et al. (1993), destacam que a soja na maioria das vezes está sujeita a déficit hídrico, com maior ou menor intensidade, o que pode afetar seu desenvolvimento. Desta forma, tanto seu desenvolvimento como seu rendimento são altamente dependentes da precipitação pluvial, principalmente devido à distribuição irregular durante o ciclo da cultura (COSTA et al., 1999).

O efeito do déficit hídrico na produção depende de que fase de desenvolvimento a cultura se encontra quando se dá sua ocorrência e de sua severidade. Em soja, nas fases de germinação e emergência, diminui o estande de plantas (CASAGRANDE et al., 2001). No florescimento, causa o aborto das flores e impede a antese, enquanto no enchimento dos grãos, afeta o peso dos grãos e, conseqüentemente, a produção (FAGERIA, 1989).

2.2 Déficit hídrico

A baixa disponibilidade hídrica é atualmente o principal fator ambiental que limita o crescimento e a produtividade de plantas em todo o mundo, e as mudanças climáticas globais provavelmente contribuirão para que a falta de água se torne um fator de restrição ainda maior da produção em diversas áreas (CHAVES et al., 2003; HAMDY et al., 2003).

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 conseqüentemente, 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, ao fechamento estomático, e ao decréscimo da difusão intercelular de CO₂ (SOUZA et al, 2005a).

Segundo Kelling (1995), o efeito do déficit hídrico sobre a produção das culturas está vinculado ao período de ocorrência durante o desenvolvimento das plantas. Para Chaves (1991), a extensão dos efeitos do déficit hídrico nas espécies vegetais depende de sua intensidade e duração e da capacidade genética das plantas em responder às mudanças do ambiente.

As respostas dos vegetais à seca são caracterizadas por mudanças fundamentais na relação da célula com a água, nos processos fisiológicos, na estrutura de membranas, além de mudanças morfológicas e fenológicas (PIMENTEL, 2004).

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. Aliado a isto, a diminuição da turgescência pode ser admitida como consequência do estresse hídrico, sendo o processo de crescimento, principalmente em extensão, o primeiro afetado (NOGUEIRA et al., 2005).

Expansão celular, síntese da parede celular e síntese protéica estão entre os processos mais sensíveis ao déficit hídrico, que leva a concluir que a redução da expansão foliar é uma das primeiras respostas a pouca água disponível, já que esse processo é dependente do crescimento celular (SADRAS e 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).

Benincasa (1988) ressalta que a análise de crescimento é de fundamental importância para o entendimento das reações do vegetal em consequência de fatores ambientais. Por sua vez, Taiz e Zeiger (2002), apresentam a redução de área foliar como a primeira resposta a redução da disponibilidade hídrica, como consequência da diminuição do conteúdo de água da folha, contração das células e afrouxamento da parede celular. McCree e Fernández (1989) e Taiz e Zieger (1991), complementam que além do decréscimo da produção da área foliar, também ocorre

o fechamento dos estômatos, aceleração da senescência e a abscisão das folhas. Como a pressão de turgor é a principal força que alavanca a expansão foliar, em situações de déficit hídrico as folhas não têm como manter normal a sua expansão. Após essa parada no crescimento da parte aérea, ocorre uma conseqüente diminuição na demanda de fotoassimilados, que podem ser alocados para a parte subterrânea, favorecendo o crescimento de raízes que se mantenham em locais mais úmidos (TAIZ e ZIEGER, 2002).

O déficit hídrico aumenta a senescência das folhas (VALENTINUZ e TOLLENAAR, 2004), isto ocorre porque o solo seco não pode fornecer principalmente nitrogênio suficiente para suprir as necessidades de crescimento da cultura e o nitrogênio do interior da planta é retranslocado das folhas mais velhas para os pontos de crescimento. Entretanto, a intensidade da senescência depende da quantidade de nitrogênio e de água no solo, das reservas de nitrogênio na planta e da demanda de nitrogênio dos pontos de crescimento (LARCHER, 2000).

É conhecido o grande número de mecanismos de adaptação ao déficit hídrico desenvolvido pelas plantas. Em condições naturais, estes são mais importantes para a sobrevivência da planta que para alta produtividade (SUBBERAO et al, 1995). Estes mecanismos podem ser selecionado em plantas para aumentar a produtividade agrícola em regiões com baixa pluviosidade (TURNER, 1986). O importante é identificar os atributos que contribuem para a adaptação à seca nos ambientes nativos e utilizá-los para combinar com cultivares já utilizadas nos sistemas de produção dos dias atuais (SUBBARAO et al., 1995). O que se busca em plantas cultivadas é a manutenção de produtividade sob estresse relativamente brando. Ao se considerar uma planta tolerante, deve-se levar em conta aquelas que possuem a habilidade de manter rendimentos razoáveis na ocorrência de déficit moderado, e não a habilidade de sobreviver na ocorrência de prolongados períodos de déficit hídrico (TADIEU, 1997).

Dentre as estratégias desenvolvidas pelas plantas como mecanismos de adaptação à seca, Subbarao et al. (1995) em sua revisão, baseando-se em estudos de Fischer e Turner (1978); Levitt (1972;1980) e Turner (1986), classificou-as nas seguintes estratégias: escape, "evitamento" e tolerância à desidratação. A primeira se baseia num rápido desenvolvimento fenológico durante o período de disponibilidade de água, antes que a seca se estabeleça, minimizando o impacto na produção das culturas em ambientes onde a estação de crescimento é curta. A

segunda estratégia é caracterizada por mecanismos que buscam manter o “status” hídrico da planta dentro de limites que permitam o funcionamento normal do metabolismo, quando o suprimento de água é limitado ou a demanda evapotranspiratória é excessiva, podendo ser dividida em dois grupos: maximização da absorção de água através de um aumento na capacidade do sistema radicular e controle das perdas de água e otimização do uso da água absorvida para a produção de matéria seca. Terceira estratégia se caracteriza pela habilidade das células em continuar o metabolismo, mesmo com certo nível de desidratação dos tecidos. Além destas estratégias, Subbarao et al. (1995) ainda evidência a importância de características que contribuem para a boa performance das culturas como estabelecimento de plântulas, rápido vigor de crescimento e manutenção de área foliar. Estas são determinadas pela integração de mecanismo que podem contribuir tanto para o “evitamento” como para a tolerância.

Muitas adaptações para aumentar a tolerância à seca são detectadas nos diversos órgãos dos vegetais superiores. Nas folhas, ocorre a 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 a 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 e 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; o estresse hídrico determinou reduções na altura, número de folhas e área foliar das plantas e na matéria seca das folhas e dos caules; a suspensão total de rega promoveu redução na alocação de biomassa para as folhas e caules e aumenta a alocação de biomassa para as raízes.

Em estudo realizado 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, verificaram 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 de espiguetas. A menor produtividade de grãos das cultivares precoces, sob deficiência hídrica, ocorreu devido à 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 a 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. (2005a), observaram que a deficiência hídrica induziu a redução em 80% a 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.

Segundo Barbosa (1986), a ocorrência irregular do veranico, de ano para ano, torna a cultura do milho vulnerável ao déficit hídrico em qualquer estágio de desenvolvimento, com prejuízos visíveis na sua produção. No caso do milho, Espinoza et al. (1980) verificaram reduções de até 60% no rendimento da cultura quando o déficit hídrico ocorreu desde o estágio de floração até o enchimento dos grãos, e de 40% quando ocorreu durante a iniciação floral.

Uma das principais limitações à produção de soja nos cerrados deve-se aos veranicos, os quais afetam significativamente a produção. Espinoza (1982), encontrou rendimentos 24 a 55% superiores da cultura da soja irrigada em relação aos cultivos em que a água foi limitante. Magalhães e Millar (1978) encontraram reduções de 20, 38 e 52% na produção de feijão, para veranicos de 14, 17 e 20 dias ocorridos a partir do início da floração, respectivamente.

Segundo Barbosa (1986), veranicos que atingem os estádios de floração e enchimento de grãos são extremamente limitantes para a produção de sorgo. Costa e Couto (1986) encontraram produções de sorgo de 4250 e 1950 kg ha⁻¹, correspondendo a 650 e 220 mm de água, respectivamente.

Carvalho et al. (2000), avaliaram o efeito de diferentes níveis de déficit hídrico sobre a produção de feijão caupi em casa de vegetação, os resultados alcançados mostraram que os rendimentos de grãos e de vagens foram reduzidos com o aumento do déficit hídrico, independentemente da etapa fenológica em que esse ocorreu. A queda de rendimento variou de acordo com a intensidade do déficit e com a etapa fenológica. Na etapa de crescimento, a queda de rendimento variou de 100% a 35%, para reposições de água de 20 e de 80%, respectivamente; na etapa de floração, houve queda da produção que variou de 81% a 34%, enquanto na etapa

de frutificação a queda da produção variou de 73% a 32%, para reposições de água de 20 e de 80%, respectivamente.

O estresse hídrico também é conhecido por causar danos oxidativos às plantas, levando ao aumento nos níveis de produção das espécies reativas de oxigênio (ROS). Essas espécies incluem radical superóxido (O_2^-), radical hidróxido (OH) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que são produzidos durante a atividade de transporte de elétron, assim como por um número de vias metabólicas, causando danos em biomolécula, tais como lipídios das membranas, proteínas, pigmentos dos cloroplastos, enzimas, ácidos nucléico e outros (VERMAS E DUBEY, 2003).

O peróxido de hidrogênio é um constituinte do metabolismo oxidativo que pode reagir com radicais superóxidos e formar radical oxigênio livre e radicais hidroxilas, na presença de traços ferro ou cobre (BOWLER et al., 1992).

Os radicais hidróxidos produzidos iniciam reações próprias de propagação conduzindo à peroxidação dos lipídeos da membrana e destruição de proteína (HALLIWELL, 1987).

As espécies reativas de oxigênio são primeiramente produzidas nos cloroplastos e mitocôndrias atuando como compostos tóxicos alterando o metabolismo e induzindo à tolerância ao estresse oxidativo (LEVINE et al., 1994).

O sistema de defesa da planta aos danos oxidativos envolve enzimas como a catalase, peroxidases, superóxido dismutase e constituintes não enzimáticos como o α -tocoferol, ascorbato e glutathione redutase que retiram, neutralizam ou eliminam as espécies reativas de oxigênio (SHAH et al., 2001).

Os efeitos deletérios causados por radicais livres e pela peroxidação dos lipídeos podem ser reduzidos ou prevenidos pelo metabolismo oxidativo envolvendo enzimas antioxidantes como as peroxidases (CHANG e KAO, 1998). Assim, o aumento da atividade da enzima peroxidase pode ser considerado uma ação protetora.

O grupo das peroxidases inclui enzimas capazes de catalisar a transferência do hidrogênio de um doador para o H_2O_2 , sendo que em plantas esse grupo de enzimas constitui uma proteção antioxidante (ROSSI et al., 1997). A atividade da peroxidase pode aumentar em plantas submetidas a diversos tipos de estresse (SIEGEL, 1993).

As peroxidases são proteínas que contêm o grupo heme e utilizam o H_2O_2 na oxidação de vários substratos orgânicos e inorgânicos (ASADA, 1994). As

peroxidases podem localizar-se no citossol, vacúolo, parede celular, espaço extracelular e cloroplasto (VERMAS E DUBEY, 2003).

Chandru et al. (2003), observaram aumento da atividade de enzimas antioxidantes em folhas de arroz sob condições de estresse, assim como mudanças na atividade dessas enzimas em diferentes estádios de crescimento.

2.2.1. Déficit hídrico e suas consequências na cultura da soja

A temperatura e a disponibilidade de água no solo influenciam diretamente o desenvolvimento da soja no campo. Em condições climáticas desfavoráveis, com altas temperaturas e falta de precipitação, o desenvolvimento das sementes de soja é retardado, ou em extremo caso, é inibido. A quantidade de água disponível no solo para as plantas está ligada diretamente à quantidade e distribuição das chuvas e à capacidade do solo de reter a água. O déficit hídrico é definido como falta de água acessível à planta, o que resulta em modificações fisiológicas, químicas e bioquímicas da planta e de suas sementes (BORRMANN, 2009).

A soja é particularmente sensível à deficiência hídrica durante a emergência das plântulas e na fase de florescimento e enchimento dos grãos, podendo ocorrer perdas significativas de produção, dependendo da duração e intensidade da falta de água (DOSS e THURLOW, 1974; CÂMARA e HEIFFIG, 2000). O entanto, segundo Kron et al. (2008), plantas de soja submetidas à deficiência hídrica durante a fase de desenvolvimento V4 podem ter sua tolerância aumentada em razão da falta de água em estágios posteriores.

Casagrande et al. (2001), complementa que nas fases de germinação e emergência, diminui o estande de plantas. No florescimento, causa aborto das flores e impede a antese, enquanto no enchimento dos grãos, afeta o peso dos grãos e, conseqüentemente, a produção (BERLATO, 1981; FAGERIA, 1989).

Em soja que sofre déficit hídrico durante o enchimento dos grãos, os grãos são reduzidos em peso e em tamanho (NOGUEIRA e NAGAI, 1988). Porém, é importante ressaltar que os grãos pequenos não necessariamente são resultados de déficit hídrico, mas sim, que existem variedades que naturalmente produzem grãos menores. Uma resposta comum ao déficit hídrico é a retenção da cor verde nos grãos. A falta de água prejudica a atividade de enzimas responsáveis pela

degradação da clorofila, o que resulta em alto teor de grãos verdes (ADAMS et al., 1983).

Sionit e Kramer (1976), Monem et al. (1979) e Ahmed (1984) estudando o efeito do déficit hídrico durante diferentes estádios de desenvolvimento em soja, concluíram que plantas estressadas durante os estádios de pré-floração e floração produzem menor quantidade de flores, vagens e sementes devido ao encurtamento desses estádios e ao aborto de algumas flores.

Firmano et al. (2009), observaram que plantas de soja submetidas ao déficit hídrico imposto logo após a formação do primeiro par de folhas totalmente expandidas apresentaram menor biomassa na parte aérea, no sistema radicular e nas vagens.

2.3 Silício

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, 27% em massa, superado apenas pelo oxigênio. É encontrado somente em formas combinadas, como a sílica e minerais silicatados. Cerca de 80% dos minerais das rochas ígneas e metamórficas são silicatos, enquanto em rochas sedimentárias o conteúdo é menor (JACKSON, 1964). Os silicatos são sais nos quais a sílica é combinada com oxigênio e outros elementos, como Al, Mg, Ca, Na, Fe, K e outros, em mais de 95% das rochas terrestres (cerca de 87% em massa), meteoritos, em todas as águas, atmosfera (pó silicoso), vegetais e animais (LIMA FILHO et al., 1999).

Os minerais silicatados mais comuns são o quartzo, os feldspatos alcalinos e os plagioclásios. Os dois últimos são aluminossilicatos, contribuindo significativamente com o conteúdo de Al na crosta. Todos estes minerais sofrem o processo de intemperização, cuja taxa depende de uma série de fatores, incluindo temperatura, pH, composição iônica do solvente, etc. O quartzo é relativamente estável, intemperizando-se muito lentamente. Portanto, não é considerado uma fonte disponível de ácido silícico. Os feldspatos, por sua vez, intemperizam-se mais rapidamente, resultando em argilas (caulinita ou montmorilonita) e ácido silícico (EXLEY, 1998).

O silício não é considerado essencial, do ponto de vista fisiológico e metabólico para o crescimento e desenvolvimento das plantas (EPSTEIN, 1999). Mesmo assim, o aumento de sua disponibilidade ao sistema radicular de algumas espécies tem revelado, em alguns casos, efeitos benéficos em diversas culturas, especialmente, quando submetidas a algum tipo de estresse, seja ele de natureza biótica ou abiótica (GONG et al., 2005; HATTORI et al., 2005).

2.3.1 Silício no solo

O silício está presente na solução do solo como ácido monossilícico (H_4SiO_4), em grande parte na forma não dissociada ($\text{pK}_1=9,6$), que é facilmente absorvido pelas plantas (RAVEN, 1983). Por isso, apesar de ser um ácido possui comportamento de base, sendo representado por alguns autores como $\text{Si}(\text{OH})_4$ ao invés de H_4SiO_4 (MENGEL e KIRKBY, 1987; SAVANT et al., 1997).

O ácido silícico é a única forma disponível de silício para as plantas, porém diversos fatores podem influenciar o seu teor no solo (REIS et al., 2007). Os principais fatores que aumentam a 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 que possuem como minerais predominantes as argilas cauliniticas, os óxidos, oxidróxidos e hidróxidos de Fe e Al. Solos tropicais altamente intemperizados podem apresentar teores de Si menores que 2 mg kg^{-1} no extrato saturado (BRADY, 1992). De modo geral, as soluções dos

solos apresentam teores de Si dissolvidos variando entre 2,8 a 16,8 mg L⁻¹ (EPSTEIN, 1995).

Estes solos, normalmente, apresentam baixo pH, alto teor de Al, baixa saturação por bases e alta capacidade de fixação de P, além de uma atividade microbiológica reduzida (LIMA FILHO et al., 1999). A compactação do solo também pode reduzir a quantidade de Si disponível para as plantas, pois aumenta o nível de ácidos polissílicos, diminuindo o teor de ácido monossílico (MATYCHENKOV et al., 1995). Regiões agrícolas importantes são pobres em silício, como o Centro-Oeste brasileiro, podendo ser de 5 a 10 vezes menor que nos solos de regiões temperadas.

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.

Em solos de textura e idade variadas do Estado de São Paulo, Raij e Camargo (1973), verificaram os menores valores de Si solúvel no Latossolo fase arenosa, e os maiores valores num Argissolo. Esses pesquisadores atribuíram a referida observação à reduzida porcentagem de argila no Latossolo, aliada à menor superfície específica total para o Argissolo, menos intemperizado e mais argiloso. Além disso, eles verificaram, ainda, teores de Si extraível com CaCl₂ 0,0025 mol L⁻¹, variando de 1 a 43 mg dm⁻³. É válido ressaltar que os valores maiores foram encontrados nos solos mais argilosos e houve também uma relação inversa com o grau de intemperismo. No entanto, existem questionamentos quanto à disponibilidade de silício no solo e o extrator a ser usado. Ao longo dos anos de pesquisa com Si alguns trabalhos com extratores foram testados, no entanto, ainda

não existe um consenso sobre o melhor extrator (KORNDÖRFER e BERTHELSEN, 2008).

Korndörfer et al. (1999a), estudando quatro solos do Triângulo Mineiro, observaram que a disponibilidade de silício seguiu a seguinte ordem decrescente: Latossolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho-escuro, Latossolo Vermelho-amarelo álico e areia quartzosa álica, encontrados valores de 10,5; 6,6; 5,7 e 3,2 mg dm⁻³, respectivamente, em extração com ácido acético 0,5 mol L⁻¹. Essa diferença está relacionada ao teor de argila onde os solos arenosos, por apresentarem predominância de quartzo na composição mineralógica, tendem a adsorver menores quantidades de Si (VIDAL, 2005).

Para Snyder (1991), solos com teores de silício menores que 10 mg dm⁻³ devem receber adubação silicatada, enquanto os solos com teores iguais ou maiores que 15 mg dm⁻³ não necessitariam de adubação silicatada. Korndörfer et al. (1999b) conduziram 28 experimentos de campo no período de 1992 a 1996 com a cultura do arroz, e sugeriram os níveis de silício no solo como baixo, menor que 6 mg dm⁻³, médio entre 6 a 24 mg dm⁻³, e alto acima de 24 mg dm⁻³.

As fontes de silício comercialmente utilizadas são os metassilicatos de sódio e de potássio (preferidos em cultivos hidropônicos e em aplicações foliares devido à alta solubilidade) e ácido silícico, com efeitos e utilização semelhantes. Outra opção é a utilização de escórias básicas de siderurgia (silicatos de cálcio e magnésio), que constituem fontes excelentes de silício a baixo custo, além de possível uso destes como corretivos do solo, devido à sua basicidade (KORNDORFER e DATNOFF, 1995; PIAU, 1991; DATNOFF, 2001).

As melhorias nas características químicas do solo pela utilização de materiais silicatados, decorrem da ação neutralizante do SiO₃²⁻ e conseqüentemente, da elevação do pH e dos teores de Ca e Mg, CTC e V% e da diminuição da concentração de H + Al (PRADO e FERNANDES, 2000; PRADO et al., 2002).

O uso de fertilizantes silicatados, que normalmente apresentam boas propriedades de adsorção, aumenta a eficiência da adubação NPK, proporcionando uma 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 do silício aumentar

a translocação interna de fósforo para a parte aérea da planta (SAVANT et al., 1997; TAKAHASHI, 1995; EPSTEIN, 1999).

2.3.2 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 pode ser considerado um elemento agronomicamente essencial, pois propicia vários efeitos positivos para mais de 30 espécies (KORNDORFER e OLIVEIRA, 2010).

As plantas absorvem o silício da solução do solo na forma de ácido de monossilícico (H_4SiO_4) (MITAMI e MA, 2005). O processo de absorção do ácido monossilícico, que possui 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 como sendo, exclusivamente, passivo, sendo feito por difusão ou fluxo de massa (JONES e HANDRECK, 1967), porém atualmente são bem detalhados, os mecanismos de absorção ativa de silício, o qual 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 acumulando-se 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 e EPSTEIN, 1999). Sangster et al. (2001), complementa, 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. (1998a) 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 concentra-se 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, a soja, o teor de silício na raiz é maior do que nas folhas (OLIVEIRA e 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 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 e 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 tem processo ativo de absorção de silício possuindo 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, estas são exclusoras na absorção de silício, ou seja, à medida que as raízes absorvem silício, elas também o eliminam para a solução do solo. Estas possuem teor foliar menor que 5,0 g kg⁻¹ de silício na matéria seca; e as intermediárias na acumulação de silício tem 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).

2.2.3 Silício na cultura da soja

Pouco se conhece sobre o efeito do silício em soja, cultura considerada intermediária no acúmulo de silício, sendo assim, se faz necessária a realização de pesquisas que comprovem o efeito da aplicação de silício na fisiologia e crescimento da cultura da soja, uma vez que a maioria dos trabalhos foram realizados em gramíneas. De acordo com Korndorfer et al. (2004a), o teor de silício na matéria seca das folhas varia de 0,10 a 0,35 %.

Em leguminosas, como a cultura da soja, a absorção de silício ocorre de forma “rejeitada”, ou seja, as plantas o absorvem sem translocá-lo (MA et al., 2001). Devido a este fato, segundo Oliveira e Castro (2002) o teor de silício na raiz é maior do que nas folhas. Korndorfer e Danoff (2000), afirmaram que o silício é pouco móvel no interior das plantas, fato que é reforçado também em trabalhos de Marschner (1995), com as culturas de arroz (*Oryza sativa*), trigo (*Triticum aestivum*) e soja (*Glycine max* L. Merrill), concluindo que a absorção e distribuição radial de silício através das raízes da soja para os vasos do xilema são mais restritas a altas concentrações de silício, o que pode indicar um mecanismo efetivo de exclusão.

A soja transporta o silício para a parte aérea até um limite. No cultivar Garimpo Comum, em plantas com cerca de 40 dias após a germinação, as folhas e hastes chegaram a um limite em torno de 4.500 a 650 mg kg⁻¹ de silício, respectivamente. As raízes, por outro lado, acumularam quantidades proporcionalmente crescentes de Si, conforme se aumentou o nível do elemento no meio. A partir da adição de 30 mg kg⁻¹ de silício ao meio nutriente, a taxa de acumulação do elemento no órgão subterrâneo foi superior a dos demais órgãos da planta. Este mecanismo de acumulação radicular contribui para controlar e manter estável os níveis elevados de Si na parte aérea da soja (LIMA FILHO et al., 1999).

Segundo Miyake e Takahashi (1985), na soja, a deficiência de silício causa sintomas característicos, como a má formação de folhas e a redução da fertilidade do grão-de-pólen. Em condições hidropônicas, cultivaram-se plantas de soja em solução com 100 mg L⁻¹ de silício, mostrando incrementos em biomassa vegetal de aproximadamente 20% em relação à testemunha sem silício. Estudou-se também aveia, e foi observado aumentos significativos nas biomassas de panículas e de grãos. Entretanto, não foram observadas diferenças significativas para biomassa vegetal.

Moreira et al. (2010), ao avaliarem o efeito de aplicações de silício foliar sobre o crescimento e produtividade da soja variedade DB BRS Favorita RR em condições de campo, verificaram que quando se realizou três aplicações de 500 mL ha⁻¹ de Silício Samaritá (15,0% K₂O e 10,0% de Si), nos estádios fenológicos V8, R1 e R5.1, aumentou-se o acúmulo de fitomassa seca e a taxa de crescimento da cultura. Estes efeitos fisiológicos foram responsáveis pelo incremento médio de 19 sc ha⁻¹ na produção.

Em contrapartida, Zago et al. (2010) com o intuito de avaliar o efeito da aplicação de cinco diferentes doses de silício (2, 4, 6 e 8 L ha⁻¹) na forma de silicato de potássio (12,2% de Si e 15,0% de K₂O) na produtividade final de plantas de soja, observaram que as diferentes doses de silicato de potássio não alteraram o desenvolvimento da soja, e não alteraram significativamente no processo fotossintético da clorofila A, B e total. Resultados semelhantes foram obtidos por Dosso e Alovisei (2010), em trabalho realizado com a aplicação de diferentes doses de silício via foliar (0; 0,5; 0,7 e 1 L ha⁻¹) com e sem utilização de matéria orgânica, observaram que o desenvolvimento das plantas, com aumento na quantidade de vagens e produtividade somente ocorreu quando a adubação com silício foi associada a adubação com a matéria orgânica.

Outros estudos com Si realizados em soja estão principalmente relacionados com algumas doenças e pragas. Lima (1998) observou que o aumento da resistência da soja ao cancro da haste pode ser induzido, em condições de hidroponia, por meio do incremento do teor de Si. Verificou também que ocorrem diferenças varietais significativas em relação à absorção de Si por plantas de soja. Juliatti et al. (1996) verificaram a redução da infecção por cancro da haste em diferentes cultivares de soja pela aplicação de wollastonita via solo. Pulverizações em plantas de soja com silicato de potássio, mistura de silicato com fungicida protetor (mancozeb) e mistura de silicato com fungicida sistêmico (epoxiconazole + piraclostrobin) reduziram a severidade da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) em 34%, 76% e 83,3%, respectivamente (Nascimento et al., 2005).

Lima (2006) observou a redução em 24,5% da severidade da ferrugem da soja em plantas supridas com silicato de potássio, bem como o aumento do conteúdo de clorofila b e carotenóides, do teor de lignina das folhas, observando também a camada de cera epicuticular mais desenvolvida. Ferreira (2006) observou comportamento diferente de cultivares de soja com a aplicação de Si em vasos, na

forma de ácido silícico diluído em 250 ml de H₂O, na concentração de 1%, sendo que na cultivar IAC-19 houve aumento do grau de resistência à mosca-branca (*Bemisia tabaci*) biótipo B, ocorrendo também a potencialização da produção de nitrogênio não-protéico em plantas de soja associada à mesma cultivar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação modelo Van der Hoeven, com umidade relativa de 65% e temperatura de 28 °C mantida por sistema de refrigeração com água corrente por parede de argila expandida e exaustor, na Estação de Horticultura e Cultivo Protegido Professor Mário César Lopes, pertencente ao Núcleo de Estações Experimentais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Campus de Marechal Cândido Rondon - PR. O município está localizado no extremo Oeste do Estado do Paraná sob as coordenadas geográficas 54° 22' W longitude, latitude 24° 46' S e altitude média de 420 metros.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 4 x 2, com quatro doses de silicato de cálcio e dois regimes hídricos, com quatro repetições.

As doses de silicato de cálcio (Agrosilício – 10,5% de Si e 25,0% de Ca) utilizadas foram 0, 1000, 2000 e 4000 kg ha⁻¹, que correspondem a 0, 224, 448 e 896 kg ha⁻¹ de SiO₂, enquanto os regimes hídricos adotados consistiram da imposição ou não de déficit hídrico. Cada parcela experimental foi constituída de dois vasos com duas plantas, resultando em 64 vasos. Um vaso de cada parcela foi utilizado para a coleta de material durante a imposição e recuperação do déficit hídrico, e outro vaso para a análise biométrica no final do período do déficit.

3.3 Implantação e condução do experimento

O experimento foi implantado e conduzido em vasos de polietileno, de 22 dm³, contendo 20 dm³ de solo peneirado em malha de 5 mm. O solo utilizado para o preenchimento dos vasos foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico

(LVef) (Embrapa, 2006), de textura muito argilosa, sendo retirado da camada arável (0 – 20cm), coletado no município de Marechal Cândido Rondon – PR. Antes da instalação do experimento foi coletada amostra de solo para caracterização química e física, as quais estão contidas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Características químicas do Latossolo Vermelho eutroférico coletado na camada de 0-20 cm de profundidade utilizado no experimento. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2009

| Ca ⁽²⁾ | Mg ⁽²⁾ | K ⁽¹⁾ | Al ⁽²⁾ | H+Al ⁽³⁾ | SB | CTC | MO ⁽⁴⁾ | V | P ⁽¹⁾ | pH |
|--|-------------------|------------------|-------------------|---------------------|------|--------------------|--------------------|---------|---------------------------|-------------------|
| ----- cmol _c dm ⁻³ ----- | | | | | | | g dm ⁻³ | -- % -- | -- mg dm ⁻³ -- | CaCl ₂ |
| 5,06 | 1,69 | 1,07 | 0,00 | 5,15 | 7,83 | 12,98 | 21,40 | 60,00 | 41,20 | 4,96 |
| Micronutrientes | | | | | | | | | | |
| Fe | Mn | Cu | | | Zn | Si ^{(5)*} | | | | |
| ----- mg dm ⁻³ ----- | | | | | | | | | | |
| 123,0 | 444,0 | 15,1 | | | 6,7 | 22,5 | | | | |

⁽¹⁾ Extrator Mehlich - 1; ⁽²⁾ Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ⁽³⁾ pH SMP (7,5); ⁽⁴⁾ Método Walkey-Black; ⁽⁵⁾ Extrator CaCl₂

Análise realizada no Laboratório de Química Ambiental e Instrumental da UNIOESTE. Campus Marechal Cândido Rondon, PR. * Análise realizada pelo Laboratório de Solos da Fundação ABC. Castro, PR.

Tabela 2. Características granulométricas do Latossolo Vermelho eutroférico coletado na cama de 0-20 cm de profundidade utilizado no experimento. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon, 2009

| Argila | Silte | Areia |
|--------------------------------|-------|-------|
| ----- g kg ⁻¹ ----- | | |
| 721,0 | 108,0 | 171,0 |

Análise realizada no Laboratório de Física do Solo da UNIOESTE. Campus Marechal Cândido Rondon, PR.

A adubação de base foi realizada segundo recomendação de Oliveira et al. (2008), e constou da aplicação de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 40 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente. Estas fontes foram adicionadas ao solo juntamente com as doses de silício, com o auxílio de uma betoneira.

A semeadura foi realizada no dia 28/12/2009, utilizando-se a cultivar de soja V-Max de ciclo super precoce. Esta cultivar apresenta as seguintes características: crescimento indeterminado, resistente ao cancro da haste, suscetível ao *Meloidogyne incógnita* e ao *M. javanica*, boa amplitude de época de semeadura em

regiões quentes e possui alta potencial de rendimento de grãos em solos de alta fertilidade.

As sementes foram previamente inoculadas com bactérias do gênero *Rhizobium* (Nitragin Cell Tech HC[®]), para efeito de fornecimento de nitrogênio para as plantas e tratadas com fertilizante líquido contendo cobalto e molibdênio (Omega CoMol 118[®]), com o objetivo de estimular a formação de nódulos pelas bactérias.

Para a implantação do experimento foram semeadas 10 sementes por vaso e sete dias após a emergência das plantas, realizou-se o desbaste, deixando duas plantas por vaso. Após o desbaste os vasos foram cobertos com uma camada de 2 cm de palha de tifton, com o objetivo de minimizar as perdas por evapotranspiração durante o ciclo da cultura.

Durante o desenvolvimento vegetativo da cultura foram realizadas quatro aplicações dos inseticidas Actara[®] (Tiametoxam 250 g kg⁻¹) na dose de 250 mg ha⁻¹ e Decis[®] (Deltametrina 25 g L⁻¹) na dose de 300 mL ha⁻¹ (a primeira 15 dias após a semeadura, e as demais a cada dez dias), e uma aplicação de fungicida Folicur[®] (Tebuconazole 200 g L⁻¹) na dose de 0,5 L ha⁻¹, 30 dias após semeadura.

Todos os tratamentos foram conduzidos sob manejo normal de irrigação, mantendo-se o solo próximo da capacidade de campo até o início do período de florescimento (R1-R2) quando foi realizada a diferenciação dos tratamentos (11/02/2010). Iniciou-se a imposição do déficit hídrico nas unidades experimentais (vasos) destinadas a este tratamento, enquanto as demais unidades permaneceram sob manejo normal de irrigação.

Os tratamentos submetidos ao déficit hídrico permaneceram sem irrigação por sete dias. Em seguida foi retomada a irrigação dos vasos que foram impostos ao déficit hídrico, sendo então, todos os vasos conduzidos sob manejo normal de irrigação por um período de três dias.

3.4 Avaliações

3.4.1. Avaliações durante o período de imposição do déficit hídrico

Desde o início da imposição do déficit hídrico até a reidratação das plantas, foram determinadas as variáveis descritas a seguir:

3.4.1.1 Conteúdo relativo de água nas folhas (CRA)

O conteúdo relativo de água nas folhas (CRA) foi determinado seguindo-se a metodologia proposta por Barrs (1968). Foram retirados, diariamente, dez discos de 10 mm de diâmetro, de folhas totalmente expandidas, sempre antes do nascer do sol (pré-down), para que a umidade relativa (condições de déficit de pressão de vapor) estivessem uniformes para todas as medidas em todos os dias de avaliação. Os discos foram imediatamente pesados em balança de precisão de 0,001 g para obtenção da massa fresca (MF), e em seguida acondicionados em placas de petry com água destilada e deionizada e mantidos em temperatura ambiente. Após 5 horas, os discos foram novamente pesados, retirando o excesso de água superficial com papel toalha, obtendo-se assim a massa túrgida ou saturada (MT). Então foram submetidos à secagem em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 65 °C, até atingirem massa constante (\cong 24 horas), com posterior pesagem para a obtenção da massa seca (MS).

O CRA foi definido como a relação entre o conteúdo de água de uma amostra de folha imediatamente após a sua coleta (MF), e o conteúdo de água da mesma amostra após a recuperação total da turgescência (MT), comparativamente a massa seca (MS), sendo determinado pela seguinte equação:

$$\text{CRA} = [(MF - MS) / (MT - MS)] \times 100$$

3.4.1.2 Umidade gravimétrica do solo (Ug)

Durante o período de déficit hídrico e reidratação, foram coletadas amostras de solo de todos os vasos para a determinação da umidade gravimétrica do solo (Ug). As amostras foram coletadas diariamente no período da manhã, e acondicionadas em latas de alumínio e levadas ao Laboratório de Física do Solo, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná para pesagem. Em seguida, as latas foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 105 °C até

atingirem massa constante para o cálculo da umidade gravimétrica, sendo obtida pela seguinte equação:

$$U_g = \text{massa de água} / \text{massa de água e sólidos nela contidos}$$

3.4.1.3 Tolerância protoplasmática (Liberação de eletrólitos)

A determinação indireta da tolerância protoplasmática foi realizada sete dias após a imposição do déficit hídrico e três dias após a reidratação, utilizando-se a metodologia descrita por Leopold et al. (1981), com modificações.

Com essa metodologia foi possível inferir sobre a tolerância protoplasmática celular à desidratação, através da quantidade de eletrólitos liberados pelo tecido foliar em água destilada, medida pela condutividade elétrica da solução. Para tanto, foram coletados 20 discos foliares com 13,35 mm de diâmetro, provenientes de folhas totalmente expandidas das duas plantas de cada parcela experimental, ao invés de 25 discos de 5 mm de diâmetro como descrito na metodologia. Os discos coletados foram lavados três vezes com água destilada e deionizada, e em seguida colocados em tubos de ensaio com 30 mL de água destilada e deionizada. Procedeu-se a realização das leituras de condutividade elétrica a partir da primeira hora após a coleta dos discos e após a vigésima quarta hora, os mesmos foram submetidos em banho maria a 100 °C por 1 h, e após o resfriamento mediu-se novamente a condutividade elétrica. As leituras da condutividade elétrica da solução foram realizadas com um condutivímetro de bancada modelo Digimed DM 31.

A primeira leitura foi considerada como sendo a condutividade livre (CL), e a leitura após o banho maria foi chamada de condutividade total (CT). A partir desses dados foi calculada a porcentagem de integridade absoluta ($PIA = 1 - CL/CT$), a porcentagem de integridade relativa ($PIR = PIA \text{ das plantas sem déficit hídrico} / PIA \text{ das plantas em déficit hídrico}$), e a porcentagem de danos ($PD = 100 - PIR$), segundo a metodologia descrita por Vasquez-Tello et al. (1990).

3.4.1.4 Atividade da enzima peroxidase

Para análise da atividade da enzima peroxidase, foram coletadas amostras de tecido foliar no momento da retomada da irrigação (17/02/2010) e três dias após a reidratação (20/02/2010).

A amostragem procedeu-se da seguinte maneira: foram coletadas as folhas centrais dos trifólios situados no terço médio da planta.

As amostras foliares de 2 g foram homogeneizadas em 4 mL de tampão fosfato 0,01 mol L⁻¹ (pH 6,0) em almofariz de porcelana previamente resfriado. O homogeneizado foi centrifugado a 14.500 rpm durante 20 min. O sobrenadante obtido, considerado como a fração contendo as proteínas solúveis, foi armazenado a 4 °C para posteriores análises bioquímicas (LUSSO e PASCHOLATI, 1999).

A atividade de peroxidases foi determinada a 30 °C, pelo método espectrofotométrico direto (HAMMERSCHMIDT et al., 1982). A mistura da solução consistiu de 2,8 mL do substrato para enzima (306 µL de peróxido de hidrogênio p.a., 12,5 mL de guaiacol 2% e 87,5 mL de tampão fosfato 0,01 mol L⁻¹ (pH 6,0) e 0,2 mL de preparação enzimática. A cubeta de referência continha 3 mL do substrato para enzima. A reação foi seguida em espectrofotômetro a 470 nm, pelo período de 2 min. A atividade foi determinada pela variação ocorrida entre os valores extremos, situados na faixa de incremento linear, e expressa em variação (Δ = delta) de unidade de absorvância (abs). min⁻¹ mg⁻¹ de peso fresco (mg.p.f.).

3.4.2 Avaliações após o período de imposição do déficit hídrico

3.4.2.1. Variáveis biométricas:

Após o final da imposição do déficit hídrico, no momento da reidratação, foram realizadas as análises biométricas dos tratamentos, como descrito a seguir:

- *Área foliar*: foi determinada seguindo metodologia proposta por Benincasa (1988), com modificações. Após a separação de todas as folhas, foram retirados quinze discos foliares de área conhecida (1,77 cm²) de cada parcela experimental, que foi considerada a área foliar da amostra (AF_{amostra}). Em seguida, após a secagem em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 65 °C, até

atingirem massa constante (\cong 24 horas), foi determinada a massa seca da amostra ($MS_{amostra}$) e a massa seca das folhas (MSF). A área foliar total (AF) foi obtida através da seguinte equação:

$$AF = [(AF_{amostra} \times MSF)/MS_{amostra}].$$

- *Massa seca:* para a determinação da biomassa seca dos diferentes órgãos, as plantas, após coletas, foram seccionadas nas diferentes partes de interesse, colocadas em sacos de papel, etiquetados e levados à estufa de circulação forçada de ar a 60-70°C até atingirem massa constante. Em seguida, foi determinada a massa seca utilizando-se uma balança de precisão. Foram determinadas as massa seca das folhas, caule + pecíolo, da parte aérea, raízes e total.

3.5 Determinação dos teores de nitrogênio, fósforo, potássio e silício foliar

Para determinação dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e silício (Si), foram utilizadas amostras do material coletado para avaliação de biomassa seca das folhas. As folhas foram submetidas a uma lavagem rápida com água destilada e colocadas para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 60-70 °C, por 72 horas, sendo em seguida moídas em moinho tipo Willey. Os teores de N, P e K foram avaliados segundo a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Para a análise de silício utilizou-se metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004b). Amostras de 0,1 g da parte aérea foram colocadas em tubos plásticos, seguido do acréscimo de 2 mL de H_2O_2 p.a (30%) e 3 mL de NaOH (1:1) para digestão. Os tubos foram agitados e colocados em banho-maria a 90°C por uma hora. Durante esse período os tubos foram agitados, para evitar o extravasamento do conteúdo devido à intensa oxidação gerada pela NaOH. Em seguida os tubos foram levados para autoclave por um período de 1 hora a 123°C e 1,5 atm de pressão. Após retirar os tubos da autoclave adicionou 45 mL de água destilada e transferiu o conteúdo para um recipiente de plástico (copo plástico), deixando em repouso até o dia seguinte.

Uma alíquota de 1 mL da matéria digerido foi retirada e colocada em copos plásticos. Em seguida acrescentaram-se 19 mL de água destilada, 1 mL de HCl (1:1) e 2 mL de molibdato de amônio, seguido de uma leve agitação. O Si presente no material transforma-se em H_4SiO_4 que desenvolve a cor amarela na presença do agente complexante, que é o molibdato de amônio em meio ácido.

Depois de 5 a 10 minutos, adicionaram-se 2 mL de ácido oxálico, procedendo-se novamente uma leve agitação. A leitura foi feita em espectrofotômetro no comprimento de onda de 410 nm, após dois minutos.

3.6 Análise dos dados

Os dados obtidos foram tabulados e submetidos à análise de variância pelo teste F, e as médias referentes às doses de silício submetidas a análise de regressão, utilizando o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2000).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliações durante a imposição do déficit hídrico

4.1.1 Umidade gravimétrica do solo

Nos tratamentos conduzidos com irrigação diária a umidade gravimétrica (U_g) sofreu poucas alterações permanecendo de forma geral, constante durante o período de avaliação, apresentando valores variando de $19,42 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$ no primeiro dia até $26,13 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$ no décimo dia (Figura 1).

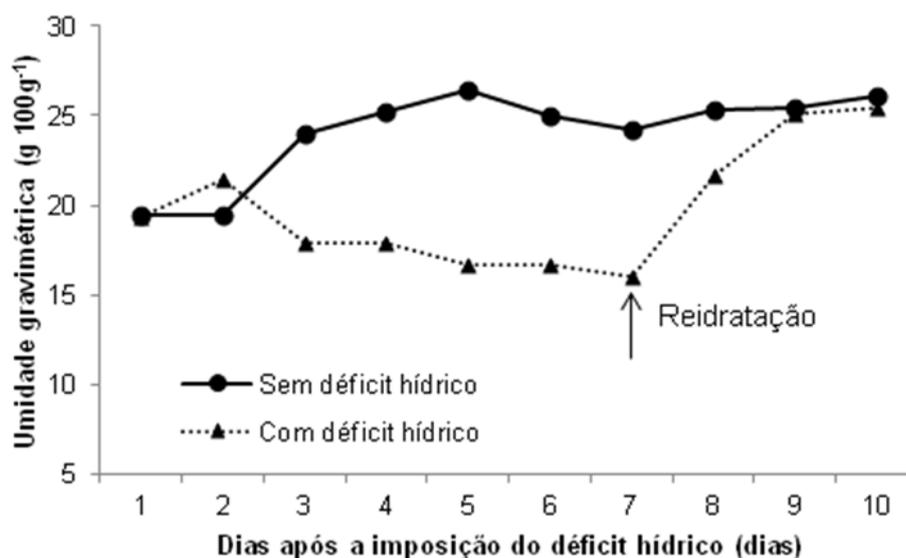


Figura 1. Umidade gravimétrica do solo (U_g) durante o período de imposição do déficit hídrico e reidratação de soja sob manejo normal de irrigação (SD) e com imposição de déficit hídrico no início do florescimento da cultura (CD). Unioeste, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010.

A U_g permaneceu constante em ambos os regimes hídricos nos dois primeiros dias de imposição do déficit hídrico. A partir do terceiro dia teve início a diferenciação dos regimes, nos tratamentos em que ocorreu a imposição do déficit hídrico, a perda de água do solo ocorreu lentamente, passando de $19,33 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$ no primeiro dia, para $16,03$ no sétimo dia (momento da reidratação). Estes resultados podem ser explicados por dois motivos, primeiramente devido a presença da cobertura os vaso com tifton, e em segundo, pelo fato do experimento ter sido

conduzido em casa de vegetação onde a temperatura era mais amena e a umidade relativa do ar mais alta do que o meio externo, ocorrendo uma baixa demanda evapotranspiratória,. Desta forma, a retomada da irrigação (reidratação) dos vasos em que ocorreu o déficit hídrico foi realizada no sétimo dia após o início do déficit hídrico.

Após a reidratação, os valores de umidade gravimétrica aumentaram rapidamente, alcançando valores semelhantes aos tratamentos sob manejo normal de irrigação.

4.1.2 Conteúdo relativo de água nas folhas

As plantas conduzidas sob manejo normal de irrigação, os valores do conteúdo relativo de água nas folhas (CRA) permaneceram constantes durante o período de avaliação (Figura 2).

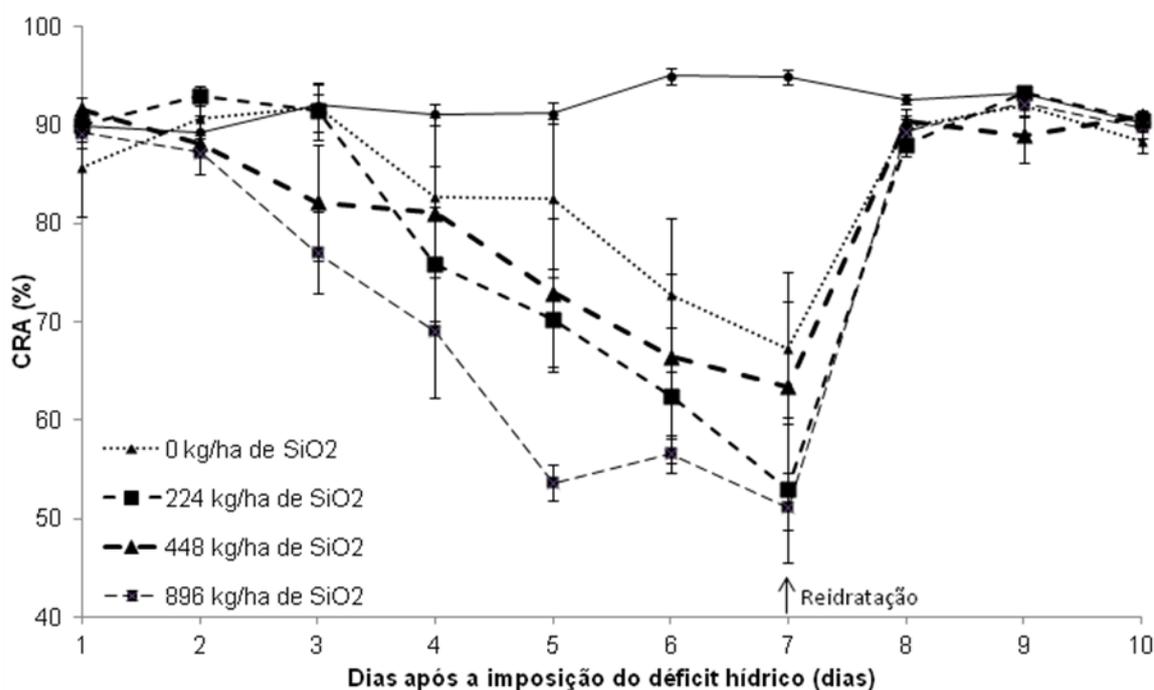


Figura 2. Conteúdo relativo de água das folhas (CRA) no “pré down” de soja submetidas ao déficit hídrico e reidratação e mantidas sob manejo normal de irrigação, no início do florescimento da cultura. Unioeste, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010.

O CRA sofreu variação entre os regimes hídricos impostos a partir do terceiro

dia até o oitavo dia de avaliação, sendo que as plantas submetidas ao déficit hídrico apresentaram menores valores de CRA. Este comportamento se deve à menor disponibilidade de água presente no solo. A menor disponibilidade de água no solo associada à perda de água via transpiração reduziu o CRA caracterizando o déficit hídrico nas plantas submetidas à suspensão temporária da rega.

Nota-se que as plantas submetidas ao déficit hídrico permaneceram sem suprimento de água até o CRA atingir aproximadamente 51%, que ocorreu sete dias após a imposição do déficit hídrico. Porém no primeiro dia após a reidratação, alcançaram valores semelhantes ao dos tratamentos mantidos com irrigação satisfatória. Lawlor e Uprety (1993) e Taiz e Zeiger (1998), relatam que a redução do conteúdo de água nas células afeta diretamente os processos de fotossíntese e expansão foliar.

Resultados semelhantes foram evidenciados por Fioreze (2007), o qual ao avaliar o efeito do déficit hídrico em três cultivares de soja, verificou que o conteúdo relativo de água nas folhas nos tratamentos sob manejo normal de irrigação (100% da capacidade de campo) se manteve constante (>90%) durante todo o período de avaliação. Por sua vez, quando se manteve a umidade do solo em 65% da capacidade de campo (-0,1 MPa), o conteúdo relativo de água nas folhas de soja mostrou-se estatisticamente inferior.

A redução dos valores de CRA também foi observada por vários outros autores em diferentes plantas submetidas ao déficit hídrico, tais como, aceroleiras (NOGUEIRA et al., 2001), trigo (FUMIS e PEDRAS, 2002), cana-de-açúcar (SILVA, et al., 2007), feijão (GUIMARÃES, 2001 e MACHADO, 2007) e soja (ZOZ, 2009).

O CRA segundo Hsiao (1990), apesar de simples pode ser mais eficiente para indicar a intensidade do estresse hídrico do que o potencial água das folhas (Ψ_h), principalmente em plantas que não realizam ajuste osmótico, como o caso da soja.

As doses de silício aplicadas diferenciaram-se estatisticamente ($P < 0,05$) apenas no terceiro dia de imposição ao déficit hídrico, onde os valores de CRA nas doses de 0 e 224 kg ha⁻¹ de SiO₂, foram superiores as demais doses, mas foram semelhantes a média dos tratamentos conduzidos sob irrigação satisfatória (Figura 2). Resultados estes inesperados, visto que segundo Dayanandam et al (1983), os depósitos de sílica nos tecidos foliares promovem a redução na taxa de transpiração. Outros autores complementam, que o acúmulo de silício nos órgãos de transpiração provoca a formação de dupla camada de sílica (OLIVEIRA E CASTRO,

2002), que causa redução da transpiração por diminuir a abertura dos estômatos, limitando a perda de água (FARIA, 2000). Assim, esperava-se que nas maiores doses aplicadas de silício as perdas por transpiração fossem menores.

Uma hipótese para explicar estes resultados é o fato desses mecanismos de absorção, distribuição e acumulação de silício estão intimamente ligados à gramíneas, que apresentam maiores tendências ao acúmulo de sílica em seus tecidos. Em, leguminosas, a absorção de silício ocorre de forma “rejeitada” onde as plantas o absorvem sem translocá-lo (Ma et al., 2001). A absorção e distribuição radial do silício através das raízes da soja para os vasos do xilema são mais restritas a altas concentrações de silício, o que pode indicar um mecanismo efetivo de exclusão (MARSCHER, 1995). O solo utilizado no experimento apresenta 22,5 mg dm⁻³ de Si (Tabela 1), considerado por Korndorfer et al. (1999a) um valor médio, e por ser um solo de textura muito argilosa o silício está mais prontamente disponível a cultura (Camargo et al., 2002).

Cabe salientar que solos argilosos com textura mais fina retêm água em maior quantidade que os solos de textura arenosa, devido à maior área superficial e a poros menores entre partículas (TAIZ e ZIEGER, 1991). À medida que o solo seca, torna-se mais difícil às plantas absorverem água, porque aumenta a força de retenção e diminui a disponibilidade de água do solo às plantas (BERGAMASCHI, 1992). De acordo com Ludlow e Muchow (1990) a redução no conteúdo de água no solo causa significativa variação na distribuição e desenvolvimento radicular, podendo mudar o período de disponibilidade e a quantidade de água disponível para as plantas. Desta forma, nem toda água que o solo armazena é disponível as plantas (CARLESSO, 1995).

4.1.3 Tolerância protoplasmática (Liberação de eletrólitos)

Na tabela 3 são apresentados os valores referentes à condutividade livre (CL) e porcentagem de integridade absoluta (PIA) da membrana no momento da reidratação e três dias após. Ocorreram diferenças ($P < 0,05$) entre os regimes hídricos impostos, onde no momento da reidratação os tratamentos com déficit hídrico apresentaram menor condutividade livre (CL), o que ocorreu devido a planta apresentar maior integridade absoluta (PIA) da membrana, fazendo com que não

houvesse liberação de solutos para a solução por parte da célula. O mesmo comportamento foi observado três dias após a reidratação.

Os parâmetros condutividade total (CT), porcentagem de integridade relativa (PIR) e porcentagem de danos (PD), não tiveram diferenças significativas entre os tratamentos impostos.

Tabela 3. Condutividade livre (CL) e porcentagem de integridade absoluta (PIA) no momento da reidratação e três dias após a reidratação da soja sob manejo normal de irrigação e com indução de déficit hídrico no início do florescimento. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010

| Regime | Reidratação | | Três dias após a reidratação | |
|-------------|-------------|--------|------------------------------|--------|
| | CL* | PIA** | CL* | PIA** |
| Com déficit | 31,52 b | 0,90 a | 23,91 b | 0,93 a |
| Sem déficit | 36,68 a | 0,88 b | 27,59 a | 0,90 b |
| C.V. (%) | 20,46 | 1,71 | 18,05 | 2,02 |

Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste F.

** e * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente.

Vale destacar que a condutividade livre (CL) média das plantas de soja que sofreram déficit hídrico e que estavam a três dias em reidratação satisfatória (após reidratação) foi inferior para as plantas de soja com regime normal de irrigação (Tabela 3). Isso pode ser atribuído, porque o déficit moderado não afetou de forma significativa a integridade das membranas celulares das folhas que se induziu o déficit hídrico. Esta inferioridade de CL para as plantas que sofreram déficit pode ser atribuída à queda da taxa fotossintética, o que possivelmente ocasionou a necessidade de usar os solutos orgânicos e inorgânicos celulares para a retomada do metabolismo no início da reidratação, tendo menos eletrólitos livres nas células no momento desta avaliação (MACHADO, 2007).

Pimentel et al. (2002), relatam que ocorre aumento na liberação de eletrólitos pela planta quando a mesma sofre estresse hídrico. Durante o déficit hídrico, as plantas apresentam alteração no transporte de elétrons mediado pelos radicais superóxido formados (O_2^-) que competem com o NADP para redução no fotossistema I (REDDY et al., 2004). Como consequência, pode ocorrer a perda e redução das proteínas D1 e D2 do fotossistema II (REDDY et al., 2004). A diminuição da assimilação de CO_2 , a redução das atividades dos fotossistemas e alteração no sistema de transporte de elétrons, aceleram a geração de EROs, via cloroplasto que tem a capacidade de danificar estruturas e componentes celulares

importantes (ASADA, 1999), como as biomembranas, causando danos na estrutura e funcionamento da mesma, alterando sua fluidez, inativando receptores e enzimas e aumentando a permeabilidade a íons (HALLIWELL e CHIRICO, 1993).

Observou-se um acréscimo significativo na porcentagem de integridade de membrana (Figura 3) com o aumento das doses de SiO₂. Esse resultado pode ser atribuído ao fato de que o silício forma complexos com polifenóis e assim serve como alternativa à lignina no reforço das paredes celulares (Taiz e Zeiger, 2009). Barbosa Filho et al. (2001), relatam que a presença de silício na parede celular pode elevar os conteúdos de hemicelulose e lignina, aumentando a rigidez da célula. Resultados semelhantes foram observados por Gunes et al. (2008) em girassol, onde o fornecimento de Si minimizou significativamente os danos causados nas membranas e aumentou o conteúdo relativo de água nas folhas.

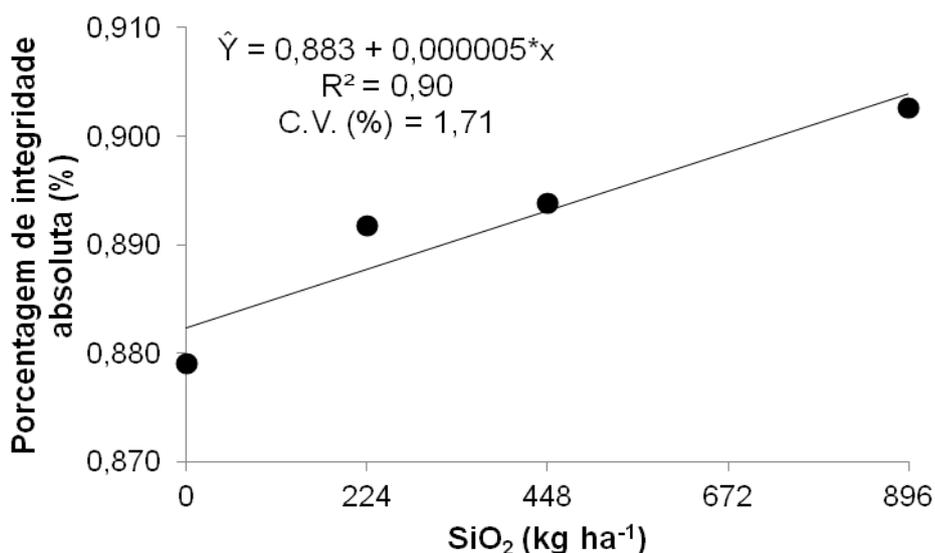


Figura 3. Porcentagem de integridade absoluta (PIA) no momento da reidratação de soja em função das doses crescentes de SiO₂. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010. (* significativo pelo teste t a 5% de probabilidade).

O fornecimento de silício pode reduzir a taxa de transpiração (AGARIE et al., 1998b) e a exsudação de eletrólitos das células (AGARIE et al., 1998a), prevenindo a deterioração estrutural e funcional da membrana celular de plantas.

4.1.4 Atividade da enzima peroxidase

No momento da reidratação não houve diferença entre os regimes hídricos quanto à atividade da enzima peroxidase. Porém no terceiro dia após a reidratação os tratamentos submetidos ao déficit hídrico apresentaram valores de atividade de enzima peroxidase superior aos tratamentos conduzidos sob irrigação satisfatória (Figura 4a). Xiong et al. (2002) relatam que em plantas sob estresse hídrico, ocorre aumento na atividade da enzima peroxidase, ao que relacionaram ao aumento na tolerância à seca.

Foyer et al. (1994) relatam que para a proteção de organelas e das membranas celulares dos efeitos danosos das espécies reativas de oxigênio, originadas quando as plantas sofrem algum tipo de estresse, entre eles o estresse hídrico, as plantas desenvolvem um complexo mecanismo de defesa, incluindo um sistema enzimático, que compreende várias enzimas, e entre essas a peroxidase.

Chandru et al. (2003) observaram aumento da atividade de enzimas antioxidantes em folhas de arroz sob condições de estresse, assim como mudanças na atividade dessas enzimas em diferentes estádios de crescimento.

No momento da reidratação houve aumento da atividade da enzima peroxidase em função do aumento das doses de SiO_2 aplicadas, chamado também de efeito de doses dependentes (Figura 4b). Entretanto três dias após a reidratação não houve influência das doses crescentes de SiO_2 na atividade da enzima peroxidase.

Estes resultados sugerem que o silício acelerou a resposta da atividade da enzima peroxidase ao estresse ocorrido. O silício estimula os mecanismos naturais de defesa da planta como, por exemplo, a produção de compostos fenólicos, quitinases, peroxidases e acúmulo de lignina (CHERIF et al., 1994; FAWE et al., 1998).

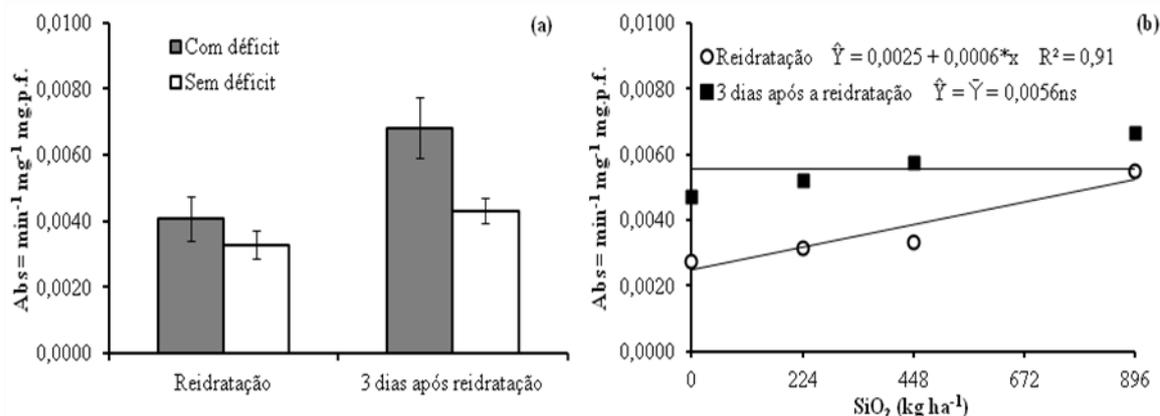


Figura 4. Atividade da enzima peroxidase da soja no momento da reidratação e três dias após a reidratação nos dois regimes hídricos impostos (a), e atividade da enzima peroxidase da soja no momento da reidratação e três dias após a reidratação em função das doses de SiO₂ aplicadas (b). UNIOESTE, marechal Cândido Rondon – PR, 2010. (* significativo pelo teste t a 5% de probabilidade).

Epstein (1999) complementa que os mecanismos de defesa mobilizados pelo silício incluem a acumulação de peroxidases evidenciando que esse elemento atua como uma espécie de mensageiro secundário na célula quando ocorre algum tipo de estresse.

O fornecimento de silício de acordo com Gunes et al. (2007) e Gunes et al. (2008), reduziu o efeito da deficiência hídrica no aumento da resistência estomática, no teor de peróxido de hidrogênio e prolina e, peroxidação de lipídeos das folhas de plantas de grão-de-bico e girassol.

4.2 Avaliações após o período de imposição do déficit hídrico

4.2.1 Análise biométrica

Os resultados referentes a massa seca de folhas (MSF), massa seca de caule + pecíolo (MSCP), massa da parte aérea (MSPA), massa seca total (MST) e área foliar (AF) de plantas de soja sob manejo normal de irrigação e com imposição de déficit hídrico no início do florescimento, são apresentados na Tabela 4. Observou-se que ocorreu redução dos parâmetros quando foi imposto o déficit hídrico.

A redução da área foliar que é a resposta mais provável das plantas ao déficit hídrico (McCREE e FERNÁNDEZ, 1989), e conseqüentemente da massa seca da

folha, da parte aérea e total ocorre como 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 (2009) relatam que a área foliar menor transpira menos, conservando efetivamente, um suprimento de água limitado no solo por um período mais longo.

Tabela 4. Massa seca de folhas (MSF), massa seca de caule + pecíolo (MSCP), e massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca total (MST) e área foliar (AF) da soja em função dos regimes hídricos impostos. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010

| Regime Hídrico | MSF** | MSCP** | MSPA** | MST** | AF** |
|----------------|----------------------|---------|---------|---------|-------------------------|
| | ----- g/planta ----- | | | | cm ² /planta |
| Com déficit | 15,74 b | 17,95 b | 49,57 b | 60,42 b | 148,56 b |
| Sem déficit | 19,38 a | 22,03 a | 60,91 a | 71,40 a | 203,38 a |
| C.V. (%) | 12,09 | 11,05 | 11,33 | 10,64 | 13,56 |

Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste F.

** significativo a 1% de probabilidade.

A redução de massa seca de folhas pode ser atribuída à sensibilidade da cultura a deficiência hídrica, pois, mesmo num período curto de déficit hídrico a planta pode reduzir área foliar, e conseqüentemente a fotossíntese, resultando em menor acúmulo de massa seca e menor produção (HATTORI et al., 2005). Pilon et al. (2010) observaram que a cultura da batata quando submetida ao déficit hídrico apresentou menor MSF.

A massa seca de caule + pecíolo também reduziu com a imposição do déficit hídrico. O crescimento do caule tem sido menos estudado do que a expansão foliar, mas provavelmente ele é afetado pelas mesmas forças que limitam o crescimento das folhas durante o estresse (Taiz e Zeiger, 2009).

Firmano et al. (2009), observaram que plantas de soja submetidas ao déficit hídrico apresentaram menor biomassa na parte aérea, no sistema radicular e nas vagens.

Para as variáveis volume radicular e massa seca de raiz não foi observado diferença significativa ($P < 0,05$) para os regimes hídricos impostos.

Na figura 5 são apresentados os dados referentes à massa seca de folhas, caule + pecíolo, raiz, parte aérea e total. Pode-se observar que as variáveis reduziram em função do aumento das doses SiO₂ aplicadas (Figura 5). Essa

redução poderia ser atribuída a algum efeito tóxico do silício, que pode ter ocasionado desequilíbrio nutricional nas plantas.

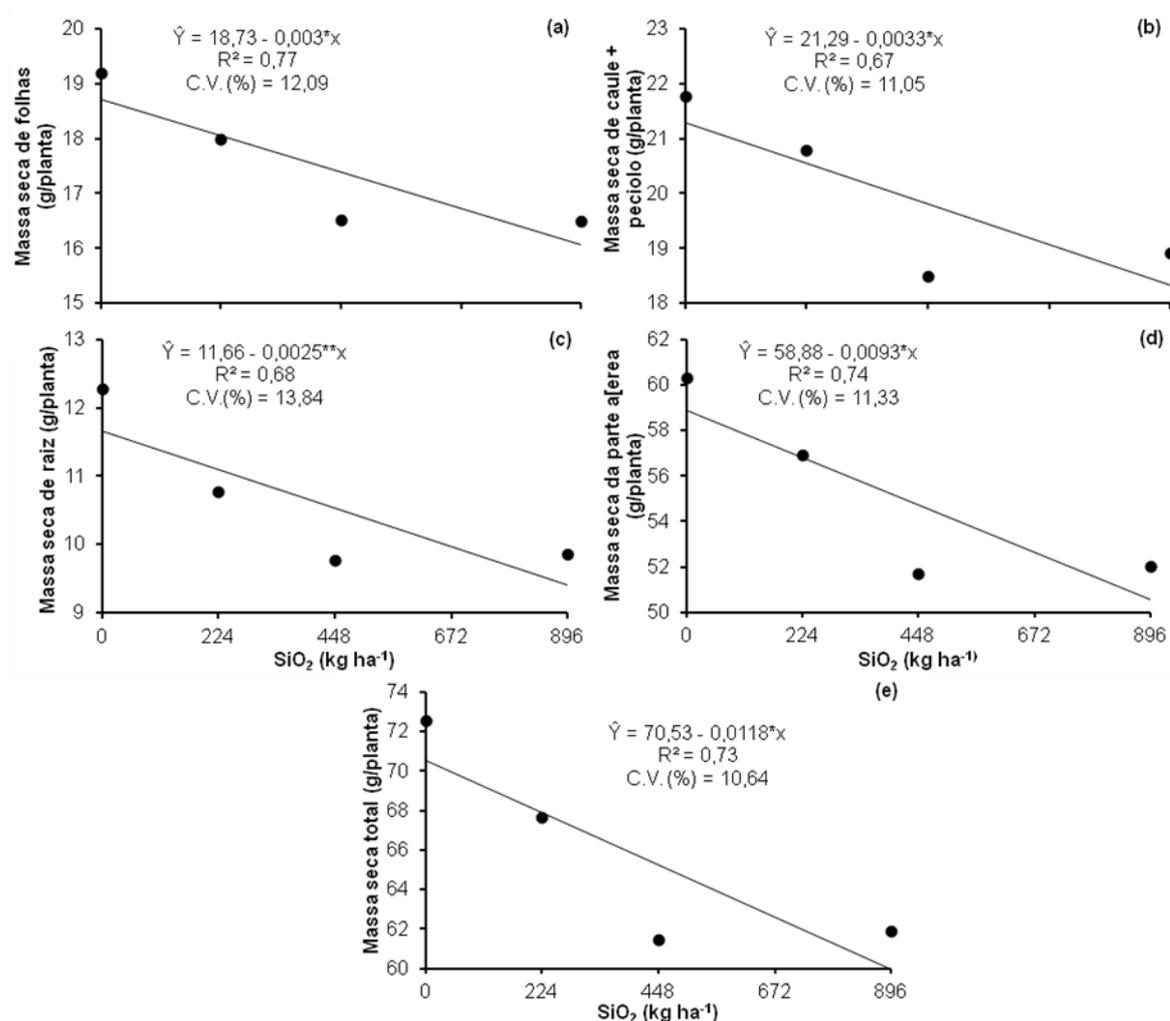


Figura 5. Massa seca de folhas (a), massa seca de caule + pecíolo (b), massa seca de raiz (c), massa seca da parte aérea (d) e massa seca total (e) da soja em função das doses crescentes de SiO₂. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010 (** e *, significativo pelo teste t a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente).

Ainda não se constatou efeito tóxico do silício, não havendo limites técnicos para a aplicação desse nutriente. Doses excessivas de silicato podem provocar aumentos de pH acima dos valores desejados, podendo causar desequilíbrios nutricionais, principalmente deficiências de micronutrientes (Cu, Fe, Zn e Mn) e P devido as reações de insolubilização (REIS et al., 2007).

Em trabalho realizado por Souza et al. (2005b), a aplicação de silicato em substituição ao carbonato foi realizada em dois solos com diferentes texturas e mineralogias para a produção de braquiarião (*Brachiaria brizantha*), observou-se que

o suprimento de silicato alterou a disponibilidade dos nutrientes para as plantas e também aumentou a produtividade dessa gramínea. Os nutrientes Ca, Mg, S e Si tiveram seus teores aumentados com o aumento do suprimento de silicato. Já para os nutrientes N, P, K, Cu, Fe, Mn e Zn ocorreu o contrário.

Em alface cultivada em solução nutritiva contendo $1,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de silício, Luz et al. (2006), verificaram que o silício promoveu redução do diâmetro de parte aérea, menor massa fresca e seca de parte aérea e de raiz, sendo essa redução atribuída ao fato do Si ter interferido na absorção de algum dos nutrientes essenciais para a alface.

Silva e Bohnen (2001) verificaram que a adição de silício em solução nutritiva para plantas de arroz reduziu os teores de boro e fósforo nas raízes, e de boro, cálcio, ferro e manganês na casca.

No caso da soja, a influência do silício no seu desenvolvimento é pouco conhecida até o presente momento, pois a maioria dos trabalhos com o uso do silício nessa cultura estão relacionados com algumas doenças e pragas, fato que não ocorre com as gramíneas. De acordo com Rajj e Camargo (1973), resultados positivos com a aplicação desse elemento são comumente observados em plantas acumuladoras de silício, como ocorre com a maioria das gramíneas (arroz, cana-de-açúcar, sorgo, milheto, milho, entre outros). Por sua vez, Marchner (1995) concluiu que a absorção e distribuição radial de silício, por meio das raízes da soja para os vasos do xilema são mais restritas a altas concentrações de silício, indicando um mecanismo efetivo de exclusão. Pereira Junior et al. (2010), complementa que no caso da soja, sendo considerada uma planta intermediária no acúmulo de silício, as respostas à aplicação desse elemento são também mais difíceis de serem observadas.

4.2.2 Teores de nitrogênio, fósforo, potássio e silício no tecido foliar

Houve interação significativa ($P < 0,01$) entre as doses de silício aplicadas no solo e os regimes hídricos impostos a cultura da soja no início do florescimento (Figura 6).

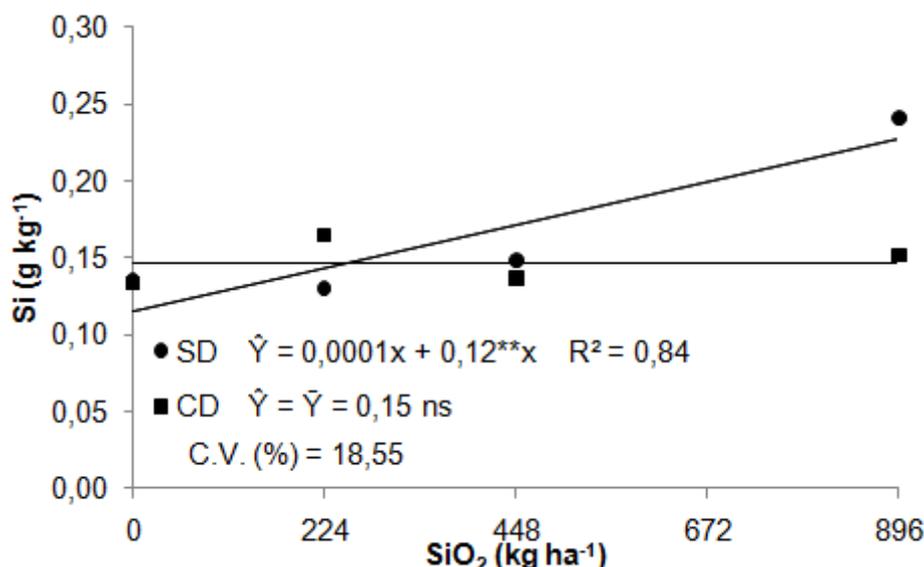


Figura 6. Teor de Si foliar em plantas de soja em função das doses crescentes do nutriente aplicadas no solo e em função dos sistemas hídricos impostos, sem déficit hídrico (SD) e com déficit (CD). UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010 (** significativo pelo teste t a 1% de probabilidade).

Pode-se constatar que as doses de silício aplicadas ao solo proporcionaram aumento linear do teor do elemento nas folhas apenas na condição de manejo normal de irrigação. Resultado este que contradiz com o obtido por Pulz et al. (2008) na cultura da batata, sendo que esta apresentou maior absorção de Si na maior tensão de água no solo (-0,05 MPa).

A soja é considerada uma planta intermediária em relação ao acúmulo de silício apresentando teores foliares variando de 0,10 a 0,35% (0,01 a 0,035 g kg⁻¹) (KORNDORFER et al., 2004a). No entanto, no presente experimento, considerando que as plantas foram cultivadas em solo com alto teor de silício disponível, Latossolo Vermelho eutroférico muito argiloso, com a aplicação das doses de silício foi observado teores variando de 0,10 a 0,26 g kg⁻¹. Portanto, os valores obtidos estão acima dos normalmente encontrados na cultura, não ocorrendo a absorção de silício de forma “rejeitada”, ou seja, as plantas absorveram e translocaram o silício para a parte aérea, contrariando a constatação de Marschner (1995), de que a absorção e distribuição radial de silício através do xilema são mais restritas a altas concentrações de silício, o que poderia indicar um mecanismo efetivo de exclusão.

Para o nitrogênio foi verificada a interação significativa entre os regimes hídricos e as doses de silício (Figura 7). Em condições de déficit hídrico as doses

crecentes de SiO₂ aplicadas, reduziram a absorção de nitrogênio pela cultura da soja.

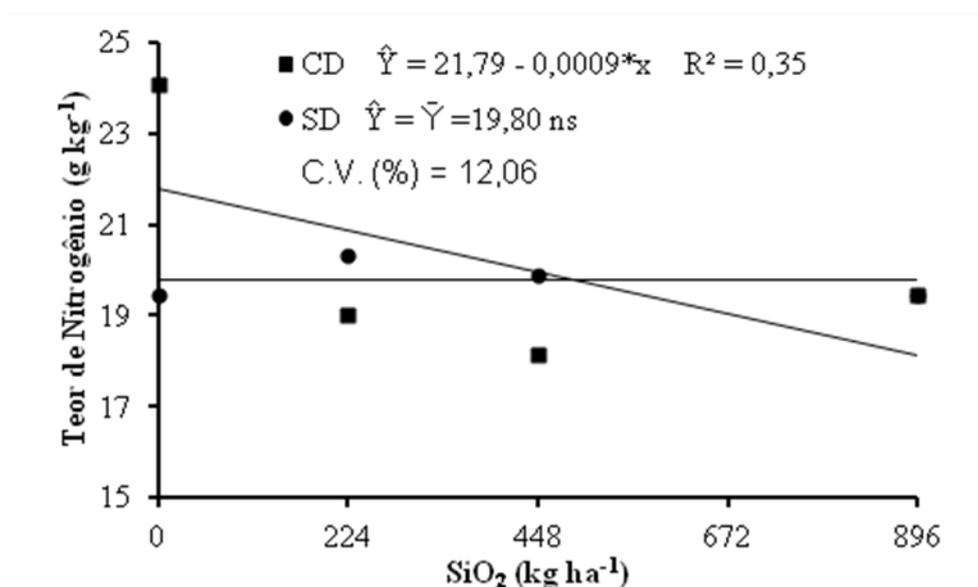


Figura 7. Teor de Nitrogênio foliar em plantas de soja em função das doses crescentes de SiO₂ aplicadas no solo e em função dos regimes hídricos impostos, sem déficit hídrico (SD) e com déficit (CD). UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010 (*, significativo pelo teste t a 5% de probabilidade).

Os teores médios de nitrogênio em ambos os tratamentos estão abaixo dos intervalos considerados adequados para a cultura da soja. De acordo com Malavolta et al. (1997) o intervalo considerado adequado é 45 – 55 g kg⁻¹, sendo que foram obtidos teores variando de 18,00 a 24,5 g kg⁻¹. Cabe salientar que a coleta das folhas para a realização das análises foi realizada após a época recomendada, sendo realizada no início da formação de grãos, quando este nutriente já estava sendo translocado para o desenvolvimento dos grãos.

Maud et al. (2003), não observaram efeito de silício no teor de N em plantas de arroz quando submetidas às variações de doses de N e Si. Ávilla et al. (2010), em trabalho realizado observaram que houve elevação dos teores de NO₃⁻ nas raízes quando o silício foi adicionado à solução nutritiva, contrariando Maud et al. (2003), os quais foram justificados por uma provável inibição competitiva entre os ânions H₃SiO₄⁻ e NO₃⁻ pelos sítios de absorção da planta.

Carvalho (2000) não encontrou diferença estatística nos teores de N, P, K, Ca, Mg e S, em função das fontes e doses de Si na cultura do arroz IAC 202, em condições de campo. Souza et al. (2005b), observaram que N, P e K, tiveram seus

teores reduzidos com o suprimento de silicato para as plantas de braquiarião (*Brachiaria brizantha*).

O teor de fósforo na planta foi influenciado apenas pelos regimes hídricos, com menor teor de P nas folhas das plantas submetidas ao déficit hídrico (Tabela 5). Evidências têm demonstrado que o silício tem papel importante no metabolismo do fósforo, sendo ambos absorvidos nos mesmo sítios (KHALID e SILVA, 1980). A similaridade química das duas formas aniônicas de P e Si, $H_2PO_4^-$ e $H_3SiO_2^-$, respectivamente, é a grande responsável por isso (HINHSTON et al., 1972).

Tabela 5. Teor de fósforo foliar em plantas de soja em função dos regimes hídricos impostos. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon – PR, 2010

| Regime Hídrico | Teor de fósforo* |
|----------------|--------------------|
| | g kg ⁻¹ |
| Com déficit | 2,98 b |
| Sem Déficit | 3,27 a |
| C.V. (%) | 12,01 |

Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste F.

* significativo a 5% de probabilidade.

Os teores médios de fósforo em ambos os regimes hídricos, encontram-se dentro dos intervalos considerados adequados para a cultura da soja, de acordo com Malavolta et al. (1997), sendo os níveis adequados 2,6 – 5,0 g kg⁻¹.

Um decréscimo da reciclagem de fósforo entre o citoplasma e estroma (FOYER, 1988) gerado por uma redução da absorção de P em função de um déficit hídrico no solo (NOVAIS e SMYTH, 1999; SANTOS et al., 2006), pode levar a um decréscimo no consumo ou na produção de ATP e NADPH, uma menor regeneração de ribulose-1,5-bifosfato, um substrato da fotossíntese (AZCÓN-BIETO, 1983), um decréscimo na expressão de genes relacionados à fotossíntese (PAUL e PELLNY, 2003), um fechamento estomático (GOLDSCHMIDT e HUBER, 1992; NAKANO et al., 2000), e um aumento da resistência à difusão de CO₂ nas células do mesófilo foliar (NAFZIEGER e KOLLER, 1976; NAKANO et al., 2000).

O teor de potássio na planta não foi influenciado pelos regimes hídricos impostos e pelas doses de silício aplicadas, porém os teores médios de potássio em ambos os tratamentos ficaram acima dos intervalos considerados adequados para a cultura da soja. De acordo com Malavolta et al. (1997) o intervalo considerado adequado é 17 – 25 g kg⁻¹, e foram obtidos teores variando de 25,3 a 38,0 g kg⁻¹.

5. CONCLUSÕES

- O incremento das doses de silício (224, 448 e 896 kg ha⁻¹ de SiO₂) não teve efeito na manutenção do conteúdo relativo de água em plantas de soja com déficit hídrico.

- A aplicação de SiO₂ até a dose de 896 kg ha⁻¹ em solo argiloso com teor inicial de 22,5 mg dm⁻³ de Si, além de não aumentar a tolerância da soja ao déficit hídrico, implicou na redução do acúmulo de massa seca e área foliar em plantas com déficit hídrico e hidratação satisfatória

- A adubação com silício interferiu de forma negativa na absorção de nitrogênio em condições de déficit hídrico para a cultura da soja.

- A atividade da enzima peroxidase em plantas de soja é aumentada com a adubação com SiO₂ e em condições de estresse por déficit hídrico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, O. A.; FJERSTAD, M. C.; RINNE, R. W. Characteristics of soybean seed maturation necessity for slow dehydration. **Crop Science**, Madison, v. 23, p. 265-267, 1983.
- AGARIE, S.; HANAOKA, N.; UENO, O.; MIYAZAKI, A.; KUBOTA, F.; AGATA, 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, p. 96-103. 1998a.
- AGARIE, S.; UCHIDA, H.; AGATA, W. KUBOTA, F.; KAUFMAN, P. B. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). **Plant Production Science**, v. 1, p. 89-95. 1998b.
- AHMED, M. F. M. Water stress effects on physiological processes and yield of soybeans. **Science and Engineering**, v. 45, p. 1078-83, 1984.
- ALVAREZ, C. C. A. **Produção do arroz em função da adubação com silício e nitrogênio no sistema de sequeiro e irrigado por aspersão**. Botucatu, 2004. 70p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista.
- ASADA, K. Production and action of active of active oxygen speceis in photosynthetic tissues. In: FOYER, C.H.; MULLINEAUX, P. (eds). Cause of Photo-oxidative stress and amelioration of defense systems in plantas. **CRC Press**, Boca Raton, Florida, p. 77- 104, 1994.
- ÁVILLA, F. W.; BALIZA, D. P.; FAQUIN, V.; ARAÚJO, J. L.; RAMOS, S. J.; Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 2, p. 184-190, 2010.
- AZCÓN-BIETO, J. Inhibition of photosynthesis by carboydrates in wheat leaves. **Plant Physiology**, Rockville, v. 73, p. 681-686, 1983.
- BARBOSA, J. V. A. Efeito do veranico sobre a produção de cultivares de milho In: **Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo: 1980-1984**. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA-CNPMS, p. 80-82. 1986.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGERA, N. K.; DANNOFF, L. E.; SILVA, O. F. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 325-330, 2001.
- BARRS, H. D. Effect of cycle variations in gás Exchange under Constant enviromental conditions on the ratio of transpiration to net photosynthesis. **Physiologia Plantarum**, v. 21, n. 5, p. 918-929, 1968.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988, 42p.

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. p. 25-32.

BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque "classe A" e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-59, 1986.

BERLATO, M. A. Carta de aptidão climática da soja no Rio Grande do Sul. In: MIYSAKA, S.; MEDINA, J.C. **A Soja no Brasil**. Ed 1. São Paulo: ITAL, p. 1062, 1981.

BORRMANN, D. **Efeito do déficit hídrico em características e bioquímicas de soja e na degradação da clorofila, com ênfase na formação de metabólitos incolores**. São Paulo, 2009. 107 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Faculdade de Ciência Farmacêutica, Universidade de São Paulo.

BOWLER, C.; Van MONTAGUE, M.; INZE, D. Superoxide dismutase and stress tolerance. **Annual Review Plant Physiology Plant Molecular Biology**, v. 42, p. 83-116, 1992.

BRADY, N. C. **The nature and properties of soil**. 10. ed. New York: Macmillan Publishing, 1992.

CÂMARA, G. M. S.; HEIFFIG, L. S. Fisiologia, ambiente e rendimento da cultura da soja. In: CÂMARA, G. M. DE S. (Ed.) **Soja: tecnologia da produção II**. Piracicaba: ESALQ/LPV, p. 450, 2000.

CAMARGO, M. S.; KORNDORFER, G. H.; CORRÊA, G. F. Características físicas e disponibilidade de silício em solos sob vegetação de cerrado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 9; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 7; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 4., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS, 2002. 1 CD-ROOM.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.

CARVALHO, J. C. **Análise de crescimento e produção de grãos da cultura do arroz irrigado por aspersão em função da aplicação de escórias de siderurgia como fonte de silício**. Botucatu, 2000. 119p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

CARVALHO, J. DE A.; PEREIRA, G. M.; ANDRADE, M. J. B. DE; ROQUE, M. W. Efeito do déficit hídrico sobre o rendimento do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 24, n. 3, p. 710-717, 2000.

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, p. 1323-1328, 2003.

CASAGRANDE, E. C.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; OYA, T.; PEDROSO, J.; MARTINS, P. K.; BRETON, M. C.; NEPOMUCENO, A. L. Expressão gênica diferencial durante déficit hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, n. 2, p. 168-184, 2001.

CHANDRU, H. K.; KIM, E.; YONGIN, K.; CHO, K.; HAN, O. Kinetics of wound-induced activation of antioxidative enzymes in *Oryza sativa*: differential activation at different growth stages. **Plant Science**, v. 16, p. 935-941, 2003.

CHANG, C. J.; KAO, C. H. H₂O₂ metabolism during senescence of rice leaves: changes in enzyme activities in light and darkness. **Plant Growth Regulation**, v. 25, p. 11-15, 1998.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, v. 30 p. 239–264, 2003.

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.

CHAVES, M. M. Effect of water deficits on carbon assimilation. **Journal of Experimental Botany**, v. 42, p. 1-16, 1991.

CHÉRIF, M.; ASSELIN, A.; BÉLANGER, R. R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. **Phytopathology**, St. Paul, v. 84, p. 236-242, 1994.

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2010/2011 - 4º Levantamento de grãos, Janeiro/2011**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 16 jan. 2011.

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 jan. 2010.

COSTA, L. C.; CONFALONE, A.; PEREIRA, C. R. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Tropical Science**, v. 39, p. 91-97, 1999.

COSTA, E. F.; COUTO, L. Função de produção e eficiência no uso da água pela cultura do sorgo granífero. In: **Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo 1980-1984**. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA-CNPMS, p. 161, 1986.

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

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDORFER, G. H. **Silicon on Agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. 403p.

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

DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL (DERAL) - SECRETARIA DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO. **Soja**. Boletim Diário, 29/06/2009. Disponível em: <http://www.seab.pr.gov.br/modules/qas/uploads/1998/soja_29jun2009.pdf>. Acesso em: 17 agos. 2009.

DOSS, B. D.; THULOW, D. L. irrigation, row width and plant population in relation to growth characteristics of two soybean varieties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 620-623, 1974. Disponível em: <<http://agron.scijournal.org/cgi/content/abstract/66/5/620>>. Acesso em: 20 jan. 2011.

DOSSO, V. H.; ALOVISI, A. M. T. Silício foliar e matéria orgânica na cultura da soja. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DE SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 13; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 11; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 8., 2010, Guarapari. **Anais...** Guarapari: SBCS, 2010. 1 CD-ROOM.

EMBRAPA, Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306p.

EMBRAPA SOJA. **Desenvolvimento, Mercado, Rentabilidade da Soja Brasileira**. 2010. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/download/CT74_eletronicapdf>. Acesso em: 19 jan. 2011.

EMBRAPA SOJA. **Evolução e perspectivas de desempenho econômico associados com a produção de soja nos contextos mundial e brasileiro**. 2009. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/download/DOC_319.pdf> Acesso em: 19 jan. 2011.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologia de Produção Paraná - 2004**. 2003. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/produçãosojaPR/exigencias.htm>> Acesso em: 19 jan. 2011.

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

EPSTEIN, E. Photosynthesis, inorganic plant nutrition, solutions, and problems. **Photosynthesis Research**, v. 46, p. 37-39, 1995.

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

ESPINOZA, W.; AZEVEDO, J.; ROCHA, L. D. Densidade de plantio e irrigação suplementar na resposta de três variedades de milho ao déficit hídrico na região de cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 1, p. 85-95, 1980.

ESPINOZA, W. Resposta de doze cultivares de soja ao déficit hídrico num Latossolo Vermelho-Escuro de Cerrados do Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 3, p. 447-458, 1982.

EXLEY, C. Silicon in life: a bioinorganic solution to bioinorganic essentiality. **Journal of Inorganic Biochemistry**, v. 69, p. 139-144, 1998.

FAGERIA N. K. **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**. 1^o ed. Brasília: Departamento de Publicações EMBRAP-CNPAP, p. 381-392, 1989.

FARIA, R. J. **Influência do Silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico**. 2000, 47p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras.

FAWE, A.; ABOW-ZAID, M.; MENZEIS, J. G.; BELANGER, R. R. Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. **Phytopathology**, St Paul, v. 88, n. 5, p. 396-401, may. 1998.

FERREIRA, R. S. **Influência do Si na indução de resistência á mosca-branca *Bemisia tabaci* biótipo B (Genn.) (Hemíptera: Aleyrodidae) e no desenvolvimento vegetativo de dois cultivares de soja *Glycine max* (L.) Merril**. 2006. 40 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras.

FERREIRA, D. F. **Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0**. In: 45a Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade internacional de Biometria. UFSCar, São Carlos, SP, Julho de 2000. p. 255-258.

FICHER, R. A., TURNER, N. C. Plant productivity in the arid and semiarid zones. **Review of Plant Physiology**, v. 29, p. 277-317, 1978

FIOREZE, S. L. **Resposta da soja (*Glycine max* (L.) Merril) a imposição de déficit no início do florescimento**. Marechal Cândido Rondon, 2007. 55 p. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

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.

FOYER C. H., LELANDAIS M, KUNERT K. J. Photooxidative stress in plants. **Physiologia Plantarum**, v. 92, n. 4, p. 696-717, 1994.

FOYER, C. H. Feedback inhibition of photosynthesis through source-sink regulation in leaves. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 26, p. 483-492, 1988.

FUMIS, T. F.; PEDRAS, J. F. Variação nos níveis de prolina, diamina e poliaminas em cultivares de trigo submetidas a déficits hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 4, p. 449-453, 2002.

GOLDSCHMIDT, E. E.; HUBNER, S. C. Regulation of photosynthesis by accumulation in leaves of plants storing starch, sucrose, and hexose sugars. **Plant Physiology**, Rockville Pike, v. 99, p. 1443-1448, 1992.

GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S.; ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, p. 313-321, 2005.

GUIMARÃES, V. **Efeito do estresse induzido por polietileno glycol (PEG 6000) em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Botucatu, 2001. 105 p. Tese (Doutorado em Agricultura) - Universidade Estadual Paulista.

GUNES, A.; PILBEAM, D. J.; INAL, A.; COBAN, S. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and peroxidation and lipid peroxidation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, p. 1885-1903, 2008.

GUNES, A.; PILBEAM, D. J. INAL, A.; BAGCI, E. G.; COBAN, S. Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivar under drought stress. **Journal of Plant interactions**, v. 2, p. 105-113, 2007.

HALLIWELL, B.; CHIRICO, S. Lipid peroxidation: its mechanism, measurement, and significance. **American Journal of Clinical Nutrition**, v. 57, p. 715–725, 1993.

HALLIWELL, B. Oxidative damage, lipid peroxidation and antioxidant protection in chloroplasts. **Chemistry Physic Lipids**, v. 44, p. 327-340, 1987.

HAMDY, A.; RAGAB, R.; SCARASCIA-MUGNOZZA, E. Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. **Irrigation and Drainage**, v. 52, p. 3–20, 2003.

HAMMERSCHMIDT, R.; NUCKLES, E. M.; KUC, J. Association of enhanced peroxidase activity with induced systemic resistance of cucumber to *Colletotrichum lagenarium*. **Physiological Plant Pathology**, v. 20, p. 73-82, 1982.

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, 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, p. 134-139, 2009.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite.I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 23, n. 2, p. 177-192, 1972.

HSIAO, T. C. Measurements of plants water status: In: Irrigation of Agricultural Crops. STEWART, B.A., NIELSEN, D.R. (Eds). New York: **American Society of Agronomy**, p.244-280, 1990.

JACKSON, M. L. Chemical composition of soils. In: BEAR, S.E. (ed.). **Chemistry of the soil**. 2.ed. New York: Reinhold, p. 171-141, 1964.

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

JULIATTI, F. C.; RODRIGUES, F. A.; KORNDORFER, G. H.; SILVA, O. A.; CORRÊA, G. F.; PEIXOTO, J. R. Efeito da aplicação de Si na indução de resistência a *Diaporthe phaseolorum f. sp. meridionalis* em cultivares de soja com diferentes níveis de resistência. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 21, p. 51, 1996. Suplemento.

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. 91p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria.

KHALID, R. A.; SILVA, J. A. Residual effect of calcium silicate em pH phosphorus and aluminium in a tropical profile. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 26, n.1, p.87-98, 1980.

KORNDORFER, 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.; BERTHELSEN, S. **Measuring soil, plant and fertilizer silicon availability**. In: SILICON AGRICULTURE CONFERENCE, 2008, South Africa. Disponível em: <<http://www.siliconconference.org.za/abstract/Congress08Prog.php>>. Acesso em: 10 jan. 2010.

KORNDORFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. UFU/IGIAG, (Boletim Técnico, 01 – 3ª edição), 2004a.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A.. **Análise de Silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia, (Boletim Técnico n. 2), 2004b.

KORNDÖRFER G. H.; ARANTES V. A.; CORRÊA G. F.; SNYDER, G. H. Efeito da aplicação de silicato de cálcio em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 623-629, 1999a.

KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H.; ULLOA, M.; PERDOMO, R.; POWELL, C.; DEREN, C.; DATNOFF, L. E. Soil and Plant silicon calibration for rice production. editora, **Manuscript prepared for the Rice Council Meeting, Belle Glade**. p. 14-5, 1999b.

KORNDORFER, G. H.; DATNOFF, L. E. **Papel do silício na produção de cana de açúcar**. In: SECAP 200, SEMINÁRIO DE CANA DE AÇÚCAR DE PIRACICABA, 5, Piracicaba, 2000.

KORNDORFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: Uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 70, p. 1-3, 1995.

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.

KRON, A. P.; SOUZA, G. M.; RIBEIRO, R. V. Water deficiency at different developmental stages of *Glycine max* can improve drought tolerance. **Bragantia**, Campinas, v. 67, p.43-49, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0006-87052008000100005&script=sci_arttext>. Acesso em: 20 jan. 2011.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. Brasil: E. Rima, 2000. 530p.

LAWLOR, D. W.; UPRETY, D. C. **Efeitos do estresse hídrico na fotossíntese de plantas cultivadas e o mecanismo biológico**. Photosynthesis: photoreactions to plant productivity, p. 419-449, 1993.

LEOPOLD, A. C.; MUSGRAVE, M. E.; WILLIAMS, K. M. Solute leakage resulting from leaf desiccation. **Plant Physiology**, v. 68, n. 6. p. 1222-1225, 1981.

LEVINE, A.; TENHAKEN, R.; DIXON, R.; LAMB, C. H₂O₂ from the oxidative burst orchestrates the plant hypersensitive disease resistance response. **Cell**, v. 79, p. 583-589, 1994.

LEVITT, J. **Responses of plant to environmental stresses**. London: Academic Press, 1980. 297p.

LEVITT, J. **Responses of plant to environmental stress**. New York: Academic Press, 1972. 697 p.

LIMA, L. M. **Manejo da ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow & P. Sydow)**. 2006. 81p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras.

LIMA, M. T. G. **Interação cancro da haste (*Diaporthe phaseolorum f. sp. meridionalis*), nodulação (*Bradyrhizobium japonicum*) e Si em soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. Piracicaba, 1998. 58p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”.

LIMA FILHO, O. F. de; LIMA, M. T. G. de, TSAI, S. M. O silício na agricultura. **Informações Agronômicas**, (Encarte Técnico), Piracicaba, n. 87, p. 1-7, 1999.

LUDLOW, M. M.; MUCHOW, R. C. A critical evaluation of trits for improving crop yields in water deficit and recovery. **Crop Science**, Madison, v. 28, p. 141-145, 1990.

LUSSO, M. F. G.; PASCHOLATI, S. F. Activity and isoenzymatic pattern of soluble peroxidases in maize tissues after mechanical injury or fungal inoculation. **Summa Phytopathological**, v. 25, p. 244-249, 1999.

LUZ, J. M. Q.; GUIMARÃES, S. T. M. R.; KORNDÖRFER, G. H. Produção hidropônica de alface em solução nutritiva com e sem silício. **Horticultura Brasileira**, v. 24, p. 295-300, 2006.

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, p. 209-212. 2007.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: Silicon in Agriculture. In: Datnoff, L.E.; Snyder, G. H.; Korndorfer, G. H. (eds). **Silicon in agriculture**, Amsterdam, Elsevier, p. 17-39, 2001.

MACHADO, F. R. **Características morfofisiológicas do feijoeiro em resposta ao déficit hídrico**. Marechal Cândido Rondon, 2007, 57p. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon.

MAGALHÃES, A. A.; MILLAR, A. A. Efeito do déficit de água no período reprodutivo sobre a produção do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 13, n. 2, p. 55-60, 1978.

MALAVOTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. Ver. e atual. Piracicaba: Potafós, 1997. 319p.

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

MATYCHENKOV, V. V.; PINSKLY, D. L.; BOCHARNIKOVA, Y. A. Influence of soils on the state and form of available silicon. **Eurasian Soil Science**, v. 27, n. 12, p. 58-67, 1995.

MAUAD, M.; GRASSI FILHO, H.; CRUSCIOL, C. A. C.; CORRÊA, J. C. Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 867-873, 2003.

McCREE, K. J. FERNÁNDEZ, C. J. Simulation model for studying physiological water stress responses of whole plants. **Crop Science**, Madison, v. 29, p. 353-360, 1989.

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, E. A. **Principles of plant nutrition**. 4. ed. Bern: International Potash Institute, p. 557-582, 1987.

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

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

MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of soybean in a solution culture. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 31, p. 625-636, 1985.

MONEN, N. N.; CALRSON, R. E.; SHAW, R. H.; ARJMAND, O. Moisture-stress effects on the yield components of two soybean cultivars. **Agronomy Journal**, v. 71, p. 86-90, 1979.

MORREIRA, A. dos R.; FAGAN, E. R.; MARTINS, K. V.; SOUZA, C. H. E. Resposta da cultura da soja a aplicação de silício foliar. **Bioscience Journal**, v. 26, p. 413-423. 2010.

MUCHOW, R. C., ROBERTSON, M. J., PENGELLY, B. C. Radiation-use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. **Field Crops Research**, v. 32, n. 1, p. 1-6, 1993.

MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. **A soja no Brasil**. 1o ed. São Paulo: ITAL, p.1-174, 1981.

NAFZIGER, E.D.; KOLLER, H.R. Influence of leaf starch concentration on CO₂ assimilation in soybean. **Plant Physiology**, Rockville, v.57, p.560-563, 1976.

NAKANO, H.; MURAMATSU, S.; MAKINO, A.; MAE, T. relationship between the suppression of photosynthesis and starch accumulation in the pod-removed bean. **Australian Journal of Plant physiology**, Victoria, v. 27, p. 167-173, 2000.

NASCIMENTO, J. F.; ZAMBOLIM, L.; DUARTE, H. S. S.; RODRIGUES, F. A. Effect of potassium silicate combine or not with systemic or protector fungicide on the control of asian soybean rust. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. & KONDORFER, G. H. **Silicon in agriculture**, Amsterdam: Elsevier, p. 121, 2005.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Water management. In FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, ed, Tropical soybean: Improvement and production. **FAO - Plant Production and Protection Series**, Rome, Italy, v. 27 p 153-160, 1994.

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.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; MORAES, J. A. P. V.; BURITY, H. A.; BEZERRA NETO, E. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, n. 1, p. 75-87, 2001.

NOGUEIRA, S. dos S. S.; NAGAI, V. Deficiência hídrica simulada nos diferentes estádios de desenvolvimento de um cultivar precoce de soja. **Bragantia**, v. 47, n. 1, p. 9-14, 1988.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. T. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 1999. 399p.

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.

OLIVEIRA, F. A.; CASTRO, C.; SFREDO, G. J.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA JUNIOR, A. **Fertilidade do solo e nutrição mineral da soja**. Londrina: Embrapa Soja, (Circular Técnica Número 62), p. 8, 2008.

PAUL, M. J.; PELLNY, T. K. Carbon metabolite feedback regulation of lead photosynthesis and development. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, p. 553-547, 2003.

PEREIRA, H. S.; BARBOSA, N. C.; CARNEIRO, M. A. C.; KORNDÖRFER, G. H. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 239-247, 2007.

PIAU, W. C. **Viabilidade do uso das escórias como corretivo e fertilizante**. Piracicaba, 1991. 99p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

PILON, C.; MORENO, L. A. de A.; ALBERTIN, M. C.; SORATTO, R. P. **Aplicação de silício via solo e via foliar na cultura da batata (*Solanum tuberosum* L.) sob déficit hídrico**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DE SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 13; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 11; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 8., 2010, Guarapari. **Anais...** Guarapari: SBCS, 2010. 1 CD-ROOM.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Rio de Janeiro: Seropédica, 2004. 191p.

PIMENTEL, C.; SARR, B.; DIOUF, O.; ABOUD, 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.

PINTO, F. S. A. **Hibridação da soja**. 1999. Disponível em: <<http://www.ufv.br/dbg/bioano02/a2001a05.htm>>. Acesso em: 20 out. 2010.

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. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. **Scientia Agrícola**, v. 57, n. 4, p. 739-744, 2000.

PULZ, A. L.; CRUSCIOL, C. A. C.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1651-1659, 2008.

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

RAIJ, B. van; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, Campinas, v. 32, n. 11, p. 223-236, 1973.

RAIZER NETO, E.. **O estado da arte do uso da cinza de casca de arroz**. 2007. Disponível em: <www.sindarroz-sc.com.br/default.php?pg=binario&id=28>. Acesso em: 17 agos. 2009.

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

REDDY, A. R.; CHAITANYA, K. V.; VIVEKANANDAN, M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 161, n. 11, p. 1189-1202, 2004.

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.

ROSSI, C.; LIMA G. P. P.; HAKVOORT, D. M. R. Atividade de peroxidases (EC 1.11.1.7) e teor de prolina em feijoeiro *Phaseolus vulgaris* L. cultivado em condições de salinidade. **Scientia Agrícola**, v. 54, n. 3, p. 123-127, 1997.

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, 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, p. 105 – 122, 2001.

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**, London, v. 58, p. 151-199, 1997.

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.

SANTOS, M. G.; RIBEIRO, R. V.; OLIVEIRA, R. F. de; MACHADO, E. C.; PIMENTEL, C. The role of inorganic phosphate on photosynthesis recovery of common bean after a mild water deficit. **Plant Science**, v. 170, p. 659-664, 2006. Disponível em: <<http://www.lcb.esalq.usp.br/publications/articles/2006/2006psv170n3p659-664.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2010.

SIEGEL, B.Z. Plant peroxidases – an organismic perspective. **Plant Growth Regulation**, v. 12, p. 303-312, 1993.

SILVA L. S.; BOHNEN H. Rendimento e acúmulo de nutrientes pelo arroz em solução nutritiva com e sem a adição de silício. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 25, p. 771-777, 2001.

SILVA, M. A. JIFON, J. L.; SILVA, J. A. G.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 3, p. 193-201, 2007.

SIONIT, N.; KRAMER, P. J. Water potential and stomatal resistance of sunflower and soybean subjected to water stress during various growth stages. **Plant Physiology**, v. 58, p. 537-40, 1976.

SNYDER, G. H.. Development of silicon soil test for Histosol-grow Rice. **Belle Glade: Univ. Florida, (EREC Res. Report)**, 1991.

SHAH, K.; KUMAR, R. G.; VERMA, S.; DUBEY, R. S. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidation enzymes in growing rice seedlings, **Plant Science**, v. 161, p. 1135-1144, 2001.

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, 2005a.

SOUZA, R. F.; POZZA, A. A. A.; CARVALHO, J. G.; FAQUIM, V. **Effect of the application of silicate in substitution to the carbonate, in soils with textures and mineralogies in the production of *Brachiaria brizanta***. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. KORNDORFER, G. H.; COELHO, L.; NOLLA, A. & RODRIGUES, F.A. (Eds.). Universidade Federal de Uberlândia – UFU, p. 140, 2005b.

STONE, L. F.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Produtividade do arroz e absorção de nitrogênio afetadas pelo veranico e pela adição de vermiculita ao solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 2, p. 117-125, 1986.

SUBBARAO, G. V., JOHANSEN, A. C., SLINKARD, R. C., RAO, N., SAXENA, N. P., CHAUHAN, Y.S. Strategies for improving drought resistance in grain legumes. **Critical Review in Plant Science**, v. 14, p. 469-523, 1995.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4 ed. Porto Alegre: ARTMED, 2009. 819p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 3.ed. Sunderland: Sinauer Associates, p. 423-460, 2002.

TAIZ, L. ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 2 ed. Sunderland Massachusetts. Sinauer Associates, 1998, 792p.

TAIZ L. ZEIGER, E. **Plant Physiology**. California: The Benjamin/ Cummings Publishing company, Inc., Redwood City, 1991.

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, p. 2-122. 1990.

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.

TARDIEU, F. Drought perception by plants. Do cells of droughted plants experience water stress. In: BELHASSEN, E. (Ed). **Drought tolerance in higher plants: genetical, physiological and molecular biological analysis**. Dordrecht: Kluwer, p. 15-26, 1997.

TEDESCO, K. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLLWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2ª ed. rev. e ampl.. Porto Alegre: Departamento de Solo. Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1995.

TURNER, N. C. Crop water deficits: a decade of progress. **Advances in Agronomy** v. 39. p. 1-51, 1986.

VALENTINUZ, O. R.; TOLLENAAR, M. Vertical profile of leaf senescence during the grain filling period in older and newer maize hybrids. **Crop Science**, Madison, v. 44, p. 827-834, 2004.

VASQUEZ-TELLO, A.; ZUILY-FODIL, Y.; PHAM THI, A. T.; VIEIRA DA SILVA. J. Electrolyte and Pi leakages and soluble sugar content as physiological tests for screening resistance to water stress in *Phaseolus* and *Vigna species*. **Journal of Experimental Botany**, v. 41, n. 7, p. 827 - 832. 1990.

VERMAS, S.; DUBEY, R. S. Lead toxicity lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. **Plant Science**, v. 164, p. 645-655, 2003.

VIDAL, A. **Efeito do pH na solubilidade de silício em solos da região do Triângulo Mineiro**. Uberlândia, 2005. 69f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia.

XIONG, L.; SCHUMAKER, K. S.; ZHU, J. K. Cell signaling during cold, drought and salt stress. **The Plant Cell**, v. 14, p. 165-183, 2002.

ZAGO, A. S.; SILVA, C. A. T da; SILVA, T. R. B. da; VIECELLI, C. A.; VERONA, E.; NOLLA, A. Efeito de doses de silício no desenvolvimento da soja. **Cultivando o Saber**, v. 3, n. 2, p. 16-22, 2010.

ZOZ, T. **Utilização da atividade da enzima peroxidase como indicativo de tolerância à seca de genótipos de soja submetidos ao déficit hídrico**. Marechal Cândido Rondon, 2009. 67p. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

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