

RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DA SOJA À ADUBAÇÃO POTÁSSICA
SOB DOIS REGIMES HÍDRICOS

TIAGO ARANDA CATUCHI

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DA SOJA À ADUBAÇÃO POTÁSSICA
SOB DOIS REGIMES HÍDRICOS**

TIAGO ARANDA CATUCHI

Dissertação apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de Concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Maia Souza

633.34
C369r

Catuchi, Tiago Aranda.

Respostas fisiológicas da soja à adubação potássica sob dois regimes hídricos / Tiago Aranda Catuchi. – Presidente Prudente, 2012.
51 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) -
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste,
Presidente Prudente, SP, 2012.

Bibliografia.

Orientador: Gustavo Maia Souza.

1. Fotossíntese. 2. Biomassa. 3. Deficiência hídrica. 4. Nutrição. 5. *Glycine max*. I. Título.

TIAGO ARANDA CATUCHI

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DA SOJA À ADUBAÇÃO POTÁSSICA
SOB DOIS REGIMES HÍDRICOS**

Dissertação apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Presidente Prudente, 06 de fevereiro de 2011

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo Maia Souza
Universidade do Oeste Paulista –UOESTE
Presidente Prudente – SP

Prof^a Dr^a. Ana Cláudia Pacheco Santos
Universidade do Oeste Paulista –UNOESTE
Presidente Prudente – SP

Dr. José Renato Bouças Farias
EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Soja
Londrina-PR

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, primeiramente pela vida, por nunca ter me deixado só nesta caminhada, pela saúde, paz e por ter me dado sabedoria nos momentos difíceis. A Ti eu dedico Senhor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Donisete minha mãe Isilda, pelo apoio nesta caminhada e pelos seus ensinamentos.

As minhas irmãs Flavia e Yara.

À minha namorada Larissa, pelo amor, carinho e apoio na realização deste trabalho, e pela compreensão nos momentos em fiquei ausente para realização deste.

A toda minha família.

Ao professor e orientador Dr. Gustavo Maia Souza, pela amizade e inestimável contribuição científica e intelectual, sempre dedicado para compartilhar seus conhecimentos.

A todos os professores e funcionários da UNOESTE, pelo apoio e ensino de qualidade.

Aos colegas do Laboratório de Ecofisiologia Vegetal (ECOLAB) pelo companheirismo e os muitos momentos de alegria compartilhados.

A FAPESP, pelo apoio financeiro, no qual possibilitou a total dedicação na execução do trabalho

“[...] nada é fixo para aquele que alternadamente pensa e têm objetivos [...]”

Modificado de *Gaston Bachelard*

LISTA DE ABREVIACOES

<i>A</i>	Assimilação luida de CO ₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
<i>AF</i>	rea Foliar por planta (cm^2)
<i>Amax</i>	Assimilação máxima de CO ₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
<i>Ci</i>	Concentração intercelular de CO ₂ (ppm),
<i>CRA</i>	Conteúdo Relativo de água
<i>E</i>	Transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
<i>EIUA</i>	Eficiência intrínseca do uso da gua A/gS ($\mu\text{mol mol}^{-1}$).
<i>EM</i>	Extravasamento de membrana (μS)
<i>ETR</i>	Taxa aparente de transporte de elétrons
<i>Fv/Fm</i>	Eficiência quântica potencial do fotossistema II
<i>Fv'/Fm'</i>	Eficiência quântica da antena
<i>gs</i>	Condutância estomática ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
<i>ICC</i>	ndice de conteúdo de clorofila
<i>J</i>	Taxa de transporte fotossintético de elétrons fotossintético ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
<i>M_G</i>	Massa de gros por planta (g)
<i>MS_{PA}</i>	Massa seca da parte aérea por planta (g)
<i>MS_{PA}/MS_R</i>	Relação MS _{PA} /MS _R (g).
<i>MS_R</i>	Massa seca da raiz por planta (g)
<i>MS_T</i>	Massa seca total por planta (g)
<i>qP</i>	Quenching fotoquímico
<i>RAF</i>	Razão da área foliar por planta AF/MS _T (cm^2)
<i>TPU</i>	Uso de triose fosfato ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
<i>Vcmax</i>	Taxa máxima de carboxilação da Rubisco ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
<i>ΦPSII</i>	Eficiência quântica do Fotossistema II (ΦPSII)

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- Resultados da análise química do solo original e após a calagem, adubação básica e aplicação das duas doses de potássio, antes e da semeadura e após a colheita das plantas	22
TABELA 2	- Resultados da análise granulométrica do solo	22
TABELA 3	- Teor médio de potássio no tecido foliar (g kg^{-1})	30
TABELA 4	- Valores médios de conteúdo relativo de água (CRA).	33
TABELA 5	- Valores médios de Extravasamento de Membrana (EM).	33
TABELA 6	- Índice de Conteúdo de Clorofila (ICC).	35
TABELA 7	- valores médios de assimilação máxima de CO_2 (A_{max} , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração intercelular de CO_2 (C_i , ppm), taxa máxima de carboxilação da Rubisco (V_{cmax} , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), taxa de transporte fotossintético de elétrons (J , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), uso de triose fosfato (TPU , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e eficiência intrínseca do uso da água A/g_s ($EIUA$, $\mu\text{mol mol}^{-1}$)	36
TABELA 8	- Valores médios de eficiência quântica potencial do FSII (F_v/F_m), eficiência quântica da antena (F_v/F_m'), eficiência quântica do Fotossistema II (ΦPSII), coeficiente de excitação fotoquímico (qP) e taxa aparente de transporte de elétrons (ETR)	36
TABELA 9	- Massa de grãos por planta (M_G , g), massa seca da parte aérea por planta (MS_{PA} , g), massa seca da raiz por planta (MS_R , g), massa seca total por planta (MS_T , g), área foliar por planta (AF , cm^2), razão da área foliar por planta AF/MS_T (RAF , cm^2) e relação MS_{PA}/MS_R (g).	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Importância da Água e do Potássio para a Cultura da Soja	14
2.2 Relação entre Deficiência Hídrica e Fotossíntese	15
2.3 Relação entre Deficiência Hídrica, Potássio e Resposta Fisiológicas	18
3 OBJETIVO E HIPÓTESES DO TRABALHO	20
4 MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 Local do Trabalho e Espécie Estudada	21
4.2 Instalação do Experimento	21
4.3 Tratamentos e Delineamento Experimental	23
4.4 Parâmetros Avaliados	25
4.4.1 Potencial de água foliar (Ψ_a)	25
4.4.2 Conteúdo relativo de água (CRA)	25
4.4.3 Índice de conteúdo de clorofila (ICC)	26
4.4.4 Extravasamento de membrana (EM)	26
4.4.5 Potencial fotossintético	26
4.4.6 Análise química foliar	28
4.4.7 Rendimento de biomassa	28
4.5 Análise dos Dados	29
5 RESULTADOS	30
5.1 Condição Nutricional do Solo	30
5.2 Condição Hídrica das Plantas	32
5.3 Atividade Fotossintética das Plantas	34
5.4 Rendimento de Biomassa	38
6 DISCUSSÃO	40
7 CONCLUSÕES	44
REFERENCIAS	45

RESUMO

Respostas fisiológicas da soja à adubação potássica sob dois regimes hídricos

A deficiência hídrica é um dos principais fatores limitantes da produção agrícola mundial, afetando diversos processos fisiológicos nas plantas. Com base neste contexto o trabalho o objetivo de avaliar a interferência da adubação potássica nas respostas fisiológicas de duas cultivares de soja desenvolvidas sob dois regimes hídricos. Foi testada a hipótese, de que a suplementação com K em plantas de soja cultivadas sob restrição hídrica poderia contribuir para minimizar os efeitos da falta de água sobre a fisiologia da planta. Para isso foram testadas as seguintes hipóteses: 1) a suplementação de K em plantas de soja cultivadas sob deficiência hídrica pode contribuir para minimizar os efeitos da falta de água sobre a fisiologia da planta; 2) a diferença no nível de tolerância à deficiência hídrica entre as cultivares avaliadas dependerá diretamente da aplicação de K. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em esquema fatorial 2x2x3, ou seja, duas cultivares de soja, deficiência hídrica com 100% e 40% da reposição diária de água em relação à capacidade de campo (CC), e três níveis de suplementação com K que foi realizada no plantio. Para testar as hipóteses consideradas anteriormente, foram avaliados os seguintes parâmetros: potencial de água foliar, índice de conteúdo de clorofila, extravasamento de membrana, potencial fotossintético e rendimento de biomassa. Com base nos resultados, é possível concluir que: Em condições de estresse hídrico, a adubação potássica não interferiu expressivamente nos parâmetros fisiológicos e de biomassa avaliados no trabalho. A suplementação com potássio promoveu uma melhor eficiência dos parâmetros fisiológicos em condição hídrica controle nas duas cultivares, onde as principais variáveis influenciadas pelo nutriente foram a condutância estomática (g_s), taxa máxima de carboxilação da Rubisco (V_{cmax}) e assimilação máxima de CO_2 (A_{max}). A suplementação com K melhorou a recuperação fotossintética das plantas após a reidratação, especialmente na cultivar Embrapa 48. Com relação aos parâmetros de biomassa, em condição hídrica controle, na cultivar BR-16, a adubação potássica aumentou a produção de massa seca total por planta e produção de grãos, já na cultivar Embrapa 48, só a massa se grãos foi influenciado pelo potássio.

Palavras-chave: Fotossíntese. Biomassa. Deficiência hídrica. Nutrição. *Glycine max*

ABSTRACT

Physiological responses of soybean to potassium fertilization under two water regimes

Water deficit is one of the main factors limiting agricultural production worldwide, affecting many physiological processes in plants. Based on this context, the study aimed to evaluate the interference of potassium fertilization on physiological responses of two soybean cultivars developed under water deficit, and assess the level of tolerance to water stress among cultivars. For this we tested the following hypotheses: 1) K supplementation in soybean plants grown under water deficiency can contribute to minimize the effects of water shortage on the physiology of the plant, 2) the difference in the level of tolerance to water stress between the cultivars depend directly from the application of K. The experiment was conducted in a greenhouse in 2x2x3 factorial design, ie, two soybean cultivars, water stress at 100% and 40% of the daily replacement of water compared to field capacity (CC), and three levels of supplementation with K which was held at planting. To test the assumptions above, we assessed the following parameters: leaf water potential index, chlorophyll content, membrane leakage, photosynthetic potential and biomass yield. Based on the results, we conclude that: Under conditions of water stress, the K fertilization did not interfere significantly in biomass and physiological parameters evaluated at work. Potassium supplementation promoted a better efficiency of physiological parameters in controlling water status in both cultivars, where the main variables were influenced by the nutrient to the stomatal conductance (g_s), maximum rate of carboxylation of Rubisco (V_{cmax}) and maximum CO_2 assimilation (A_{max}). K supplementation improved the recovery of photosynthetic plants after rehydration, especially the cultivar Embrapa 48. With respect to the parameters of biomass in water status of control, the BR-16, potassium fertilization increased the production of total dry mass per plant and yield, as the cultivar Embrapa 48, only the latter parameter was influenced by biomass potassium.

Keywords: Photosynthesis. Biomass. Water stress. Nutrition. Glycine max

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* L.) ocupa um grande espaço na agricultura Brasileira devido à sua importância econômica mundial. A produção nacional de soja na safra 2010/11 foi de 73,6 milhões de toneladas, cultivadas em 24,1 milhões de hectare. Esse volume supera em 7,2% a safra anterior (2009/10), e mantém a atual safra como a maior da história do País. Os estados do Sul, Sudeste e Centro-Oeste são os maiores produtores de soja, responsável por 90% da colheita no País (CONAB, 2012).

Segundo estimativas colocadas por Pinstrup-Andersen et al. (1999), até 2025 a população do planeta deve ficar na casa de 8 bilhões. Dyson (1999) destaca que para sustentar de forma satisfatória esses novos índices de acréscimo da população mundial, a produção de alimento deve ser aumentada em até 100% nos próximos 25 anos, onde os aumentos previstos da produção de alimentos devem ocorrer em área já cultiváveis, visto que as áreas para a expansão agrícola estão limitadas, ou seja, o desafio para os próximos anos será aumentar a produtividade por unidade de área cultivada.

Por outro lado, as atividades agrícolas estão diretamente ligadas a altos riscos de insucesso ocasionado pelas variações climáticas regionais ao longo dos anos, em função das alterações no clima resultante do aquecimento global. Dentre as variações climáticas, há um grande destaque para o estresse causado pela falta de água durante o ciclo das culturas, que é considerado um dos principais eventos que contribuem para a não maximização do potencial produtivo das lavouras (GOPEFERT et al., 1993).

A água é um dos fatores mais importantes para a produção vegetal, pois desempenha papéis importantes em qualquer fase de desenvolvimento da cultura, estando envolvida diretamente nos processos metabólicos vitais, como a fotossíntese e a respiração (TAIZ; ZEIGER, 2009). Entretanto, desenvolvimento de cultivares mais tolerantes a períodos prolongados de déficit hídrico e o desenvolvimento de tecnologias que auxiliem as plantas a tolerar períodos prolongados de estiagem é essencial na manutenção da produção agrícola (NEPOMUCENO et al., 2001).

Na cultura da soja a falta ou o excesso de água em algumas fases do seu desenvolvimento pode significar a morte da planta e a perda total da produção.

Nogueira e Nagai (1988), avaliando o efeito da deficiência hídrica nos diferentes estádios de desenvolvimento da soja, concluíram que o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem diminuiu significativamente com a deficiência hídrica em comparação com a testemunha, sendo a deficiência hídrica simulada no estádio de enchimento do grão mais danosa à produção do que no estádio vegetativo.

Outro importante entrave da produção agrícola em solos tropicais está na baixa concentração de potássio disponível. A principal função do potássio é como ativador enzimático. Além dessa função fundamental, o potássio exerce papel chave que é atuar na regulação de abertura e fechamento do estômato (PRADO, 2008). O controle da perda de água através da transpiração é realizado pelo fechamento estomático. Esse controle está diretamente ligado ao suprimento de CO_2 à folha, dessa forma, a condutância estomática deve variar ao longo do tempo de forma a haver um mínimo de perdas de água para uma máxima assimilação de CO_2 (BOYER, 1978).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância da Água e do Potássio para a Cultura da Soja

A necessidade de água na cultura da soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm dia⁻¹), decrescendo após esse período. A necessidade total de água para obtenção do máximo rendimento varia entre 450 a 800 mm por ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo do cultivar (EMBRAPA, 2008).

A água atua praticamente em todos os processos fisiológicos e bioquímicos da planta, constituindo aproximadamente 90% de sua massa, e também é responsável pela regulação térmica da mesma, atuando tanto no resfriamento como na manutenção e distribuição do calor. Tem ainda, função de solvente, por meio dos quais gases, minerais e outros solutos entram nas células e movem-se na planta (NEPOMUCENO; NORMAN, 1994).

As perdas e prejuízos econômicos causados pela deficiência hídrica em soja dependem diretamente do estágio do desenvolvimento da planta em que ocorreu o estresse e de sua intensidade. Câmara e Heiffig (2000) destacam dois períodos de desenvolvimento da planta de soja em que a disponibilidade de água é extremamente importante: entre a germinação e emergência das plântulas, e entre a floração e enchimento da vagem. Nesses períodos, tanto o déficit hídrico como inundações podem ser potencialmente prejudiciais para o rendimento agrícola e homogeneidade no campo, diminuindo a germinação de sementes. Por outro lado, a soja pode ser considerada uma cultura tolerante ao déficit hídrico, uma vez que o seu florescimento ocorre durante um período relativamente longo, permitindo evitar os efeitos de curto prazo de secas. Assim, o florescimento tardio poderia contrabalançar a perda precoce de algumas flores (MOTA, 1983). No entanto, se o período de seca é prolongado, o déficit hídrico pode afetar a cultura, frequentemente reduzindo a altura da planta, encurtando o inter-nodos, e diminuindo a taxa de crescimento relativo, índice de área foliar e a taxa fotossintética. Como consequência, um impacto negativo sobre a produção de grãos é esperado devido a

uma diminuição do metabolismo da planta inteira (CONFALONE et al., 1998; DESCLAUX et al., 2000; NEUMAIER et al., 2000).

Paralelamente, o potássio é considerado o segundo elemento essencial para as plantas e é encontrado em baixas concentrações nos solos tropicais brasileiros, considerado o segundo elemento mais extraído pela cultura da soja (PRADO, 2008; MALAVOLTA, 2006), sendo que a cada 1000 Kg de sementes produzidos pela cultura da soja é extraído 20 Kg de K_2O (MASCARENHAS, 2004). Neste contexto, em diversos sistemas de produção agrícola, principalmente os tropicais, são necessárias aplicações de K no solo para garantir a produtividade.

Segundo Prado (2008) e Malavolta (2006), mais de 60 enzimas dependem do K para sua atividade normal, visto que o nutriente é um importante ativador enzimático. Prado (2008) relata ainda que uma das razões pelo qual as plantas apresentam alta exigência em potássio é em função da necessidade que a mesma tem em manter seu teor elevado no citoplasma das células, para garantir uma ótima atividade enzimática. Ainda o autor enfatiza a importante função do K na expansão celular, a qual envolve a formação de um grande vacúolo central que ocupa 80% a 90% do volume celular.

Mascarenhas et al. (1988) destaca a importância do potássio para a cultura da soja, onde o nutriente tem papel importante nos seguintes eventos: auxílio da formação de nódulos, no aumento do teor de óleo nas sementes, beneficiando no aumento do vigor e qualidade da mesma, além de ajudar no controle de algumas doenças fúngicas como a seca de vagens e da haste, crestamento foliar e mancha púrpura das sementes. Blevins (1985) relata que o K transporta o N para síntese de proteínas para os grãos, aumentando assim o teor protéico no mesmo, consequentemente aumentando sua qualidade.

2.2 Relação entre Deficiência Hídrica e Fotossíntese

A otimização da fixação de CO_2 em ambientes com restrição hídrica é um dos principais problemas da biologia vegetal. O estresse causado por limitação hídrica ocorre com a baixa disponibilidade de água em um estado termodinâmico adequada. O termo estresse hídrico é definido como um período prolongado sem precipitações apreciáveis durante o qual os níveis de água no solo são reduzidos, de tal forma que as plantas sofram com a limitação da disponibilidade hídrica

(LARCHER, 2000), outra forma de haver uma restrição hídrica que possa ocasionar um estresse hídrico a planta é quando a demanda evapotranspiratória da atmosfera é mais elevada que a capacidade do solo em suprir água para planta.

Taiz e Zeiger (2009) e Peak et al., (2004) relatam que ambientes com restrições hídricas, seja por problemas de disponibilidade de água no solo em função de períodos de veranicos prolongados ou por altas demandas atmosféricas de água, a planta tende a fechar seus estômatos para economizar água (primeiro mecanismo de defesa da planta ao déficit de água) reduzindo as perdas por transpiração, o que pode limitar a entrada de CO₂ na folha para a fotossíntese.

Segundo Kaiser (1987), o estresse hídrico pode causar severa inibição da fotossíntese, em razão da maior resistência difusiva à entrada do CO₂, reduzindo a concentração intercelular de CO₂ e conseqüentemente diminuindo a assimilação líquida de CO₂, levando ao decréscimo da produtividade. Esses eventos são oriundos da redução da turgescência das células-guardas do estômato, seguidos pelo fechamento do poro estomático (BARUCH, 1994; SILVA et al., 2001).

Além disso, parte da inibição das taxas fotossintéticas podem ser atribuídas não somente a fatores estomáticos ao nível dos cloroplastos, mas também como problemas no transporte de elétrons e na fotofosforilação. Isto está embasado no fato de observações terem demonstrado reduções nas taxas fotossintéticas de plantas sob deficiência hídrica apesar das concentrações foliares internas de CO₂ não terem sido afetadas (KAISER, 1987; FLEXAS et al., 2006). Reduções do potencial da fotossíntese de plantas submetidas à deficiência hídrica podem estar relacionadas também à limitação da síntese de ribulose bi-fosfato (RuBP), e não a inibição das enzimas no ciclo de Calvin. A limitação da síntese de RuBP provavelmente está ligada a redução na síntese de ATP, devido a uma progressiva inativação de fatores de acoplamento resultante do aumento da concentração iônica (Mg⁺²), e não a redução da capacidade do transporte de elétrons ou de prótons (LAWLOR, 2002). Entretanto, segundo Parry et al. (2002) a atividade da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) pode ser reduzida sob deficiência hídrica não devido a mudanças causadas pelo CO₂ ou Mg⁺², mas devido à presença de fatores de inibição ligados a enzima.

Qualquer tipo de estresse ambiental que afete a fotossíntese via processos difusivos e/ou bioquímicos, poderá influenciar a atividade fotoquímica (BAKER et al., 2004; SCHREIBER; BILGER, 1987). Assim, mesmo baixos valores

de irradiância podem representar excesso de energia, uma vez que a relação entre irradiância e assimilação de CO_2 irá aumentar devido à inibição da fotossíntese em condições de estresse hídrico (DEMMING-ADAMS; ADAMS III, 1992). Desde que existe dependência da fixação de CO_2 em relação à eficiência fotoquímica (geração de *ATP* e *NADPH*) e vice-versa (SCHREIBER; BILGER, 1987), qualquer tipo de estresse ou situação que reduza o consumo dos produtos fotoquímicos pela diminuição da eficiência de carboxilação, poderá gerar excesso de energia de excitação (BAKER; ROSENQVIST, 2004). Quando a de-excitação não radiativa de energia (*NPQ*) é insuficiente para lidar com esse excesso de energia, os drenos alternativos de elétrons, como a reação de Mehler ou ciclo água-água e fotorrespiração, são determinantes na manutenção da atividade fotossintética (ASADA, 2000; BAKER; ROSENQVIST, 2004; OSMOND; GRACE, 1995).

Plantas submetidas à deficiência hídrica normalmente apresentam redução da transpiração e conseqüentemente uma redução da capacidade de dissipação de calor latente aumentando a temperatura da folha. A fixação de CO_2 é mediada pela atividade carboxilase da Rubisco, que através do aumento da temperatura tende a ser desfavorecida (BERRY; BJÖRKMAN, 1980; BJÖRKMAN et al., 1980; HÄLLGREN et al., 1991). Em altas temperaturas, a relação entre as solubilidades do dióxido de carbono e oxigênio (CO_2/O_2) diminui devido ao maior decréscimo na solubilidade do CO_2 (BERRY; BJÖRKMAN, 1980; JORDAN; OGREN, 1984). Logo, a alta temperatura afeta a fotossíntese pelo aumento na resistência do mesófilo foliar à passagem do CO_2 (KHAIRI; HALL, 1976), favorecendo a fotorrespiração.

Por outro lado, em algumas situações não ocorre redução na transpiração com o decréscimo da abertura estomática. A manutenção ou mesmo aumento da perda de água para a atmosfera é resultado do aumento da demanda evaporativa do ar. Ainda, existem indícios de que o potencial de água na planta não regule o mecanismo estomático em condições de boa disponibilidade hídrica. Dessa forma, o conhecimento das interações entre as variáveis fisiológicas, por exemplo, a relação entre fotossíntese e transpiração ou fotossíntese e condutância estomática, e variáveis ambientais é primordial para o estudo das relações hídricas, considerando a adaptação e respostas das plantas aos mais variados tipos de estresse (KHAIRI; HALL, 1976).

2.3 Relação entre deficiência hídrica, potássio e respostas fisiológicas

Prado (2008) destaca a função do potássio na manutenção do turgor das células-guardas, elevando o potencial osmótico dessas células, resultando em absorção de água pelas mesmas e adjacentes, conseqüentemente, gerando maior turgor e a abertura dos estômatos. De forma geral, plantas bem nutridas com potássio têm maior eficiência no uso da água. A exemplo disso, Neiva (1977) observou que plantas de arroz supridas com potássio tiveram maior eficiência no uso da água em relação ao tratamento controle sem a suplementação de K, indicando que plantas bem nutridas com K mantêm mais água nos tecidos em relação às plantas com deficiência deste nutriente em condições de restrição hídrica. Segundo Malavolta (2006) em plantas de milho a máxima assimilação de CO₂ ocorre quando o teor de potássio está entre 1,7 e 2,0 %, isso em função do melhor ajuste osmótico que o nutriente promove, favorecendo a abertura estomática, e conseqüentemente a fotossíntese.

Segundo Cakmak (2005), quando as plantas são cultivadas sob baixa disponibilidade de potássio, a produção de radicais livres pode ser aumentada, devido à carência deste nutriente provocar distúrbio no mecanismo de abertura e fechamento do estômato, gerando uma redução da fotossíntese e conseqüente sobra de elétrons que são desviados para a produção de espécies reativas de oxigênio. Assim, em condições de estresse hídrico a planta tem sua demanda por potássio aumentada para manter a fotossíntese e proteger os cloroplastos de danos oxidativos.

Segundo Silva et al. (2007) a estabilidade da membrana celular tem correlações fortes como indicador de tolerância ao estresse causado pela limitação hídrica. Premachandra et al. (1991), avaliando a estabilidade de membrana celular em folhas de plantas de milho cultivadas sob estresse hídrico e suplementadas com K, observaram que este parâmetro aumentou em plantas nutridas com potássio em relação às plantas sem a suplementação do nutriente quando submetidas à deficiência hídrica.

A tolerância de plantas ao déficit hídrico está intimamente ligada à manutenção do turgor celular, que por sua vez, depende de mecanismos de ajustamento osmótico e do grau de elasticidade da parede celular (TYREE; JARVIS, 1982; LENEZ et al., 2006). Downton (1983) relata que a manutenção da pressão de

turgor associado com ajuste osmótico, evita danos ao fotossistema II. Vilela (1999), trabalhando com plantas de milho desenvolvidas sob estresse hídrico, observou ajuste osmótico das plantas sob restrição hídrica quando foram suplementadas com potássio. Shangquan et al. (1999), avaliando a interação entre ajuste osmótico em plantas de trigo sob estresse hídrico, observaram que o ajuste osmótico foi determinante para manutenção da taxa fotossintética das plantas sob limitação hídrica. Eakes et al. (1991) atribuíram maior ajustamento osmótico e potencial de turgor (Ψ_P) em células de *Salvia splendens* sob estresse hídrico com suplementação de potássio na nutrição da planta. Sangakkara et al. (2000), avaliando efeito da umidade e da adubação potássica na fisiologia de dois cultivares de feijão, observaram que o potássio adicionado ao sistema via solução nutritiva, promoveu o aumento da taxa fotossintética em condições de estresse hídrico em ambas cultivares.

3 OBJETIVO E HIPÓTESES DO TRABALHO

O objetivo desse estudo foi avaliar a interferência da adubação potássica nas respostas fisiológicas de duas cultivares de soja desenvolvidas sob dois regimes hídricos. Foi testada a hipótese, de que a suplementação com K em plantas de soja cultivadas sob restrição hídrica poderia contribuir para minimizar os efeitos da falta de água sobre a fisiologia da planta.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local do Trabalho e Espécie Estudada

O estudo foi realizado em condições de casa de vegetação no Campus II da UNOESTE, na cidade de Presidente Prudente, Oeste do estado de São Paulo, situada nas coordenadas geográficas 51° 26'00" de longitude Oeste de Greenwich e 22° 07'30" de latitude Sul, com altitude de 433 metros.

O interior da casa de vegetação foi monitorado diariamente por um sistema HOBO (modelo, HO8-004-02, EUA), que coleta automaticamente a temperatura (T°C) e umidade relativa (UR%). Durante os ensaios, a média da temperatura foi de 32 e 22 °C, no dia e noite, respectivamente, e a média da UR% foi de 50% no dia e 87% durante a noite.

O material estudado foi constituído por duas cultivares de soja (*Glycine max* L.), cultivares Embrapa 48 e BR 16 consideradas tolerante e suscetível ao restrição hídrica, respectivamente (TEXEIRA et al., 2008; NEPOMUCENO et al., 1998). Ambas as cultivares são de hábito de desenvolvimento determinado, com ciclo de maturação semelhante. As sementes dos materiais utilizadas no trabalho foram fornecidas pela Embrapa/soja de Londrina-PR, sementes estas produzidas na safra 2009/10.

4.2 Instalação do Experimento

Foram coletadas amostras de solo de varias áreas da região de Presidente Prudente com a finalidade de encontrar um solo que apresentasse na análise química teores de potássio em níveis baixos para o máximo desenvolvimento da cultura (EMBRAPA, 2008), destacando então a possível interferência da suplementação de potássio nos parâmetros avaliados. Assim, o solo utilizado no experimento foi um Latossolo Vermelho Eutrófico de textura média. As características químicas e granulométricas deste solo estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

TABELA 1 - Resultados da análise química do solo original e após a calagem, adubação básica e aplicação das duas doses de potássio, antes e da semeadura e após a colheita das plantas

Amostra	pH (CaCl ₂)	M. O. g dm ⁻³	P (resina) mg dm ⁻³	(H+Al)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	CTC	Mn	Fe	Cu	Zn	B	V%	
					mmol _c dm ⁻³				mg dm ⁻³							
Inicial*	T	6,3	5	96	12	0,85	26	12,0	38	50	5,85	7,45	1,0	0,5	0,26	76
	K ₂	6,6	5	84	10	3,05	26	11,5	40	50	4,87	6,6	1,0	0,6	0,26	80
	K ₃	7,1	5	89	9	4,90	26	11,2	43	52	5,45	6,1	1,7	0,8	0,30	82
Final**	K ₁	7,0	5	114	11	0,40	35	8,56	49	60	0,23	1,1	0,16	0,3	0,40	81
	K ₂	7,2	4	111	10	1,82	44	7,97	56	64	0,28	1,0	0,17	0,3	0,55	84
	K ₃	7,1	5	110	9,6	3,97	41	7,57	48	62	0,23	0,96	0,18	0,3	0,47	84

T= solo original; K₂= 90 mg dm⁻³ de K; K₃= 180 mg dm⁻³ de K;

* Análise realizada antes da semeadura da soja;

** Análise realizada após a coleta das plantas de soja.

TABELA 2 - Resultados da análise granulométrica do solo

AREIA (g Kg ⁻¹)	SILTE (g Kg ⁻¹)	ARGILA (g Kg ⁻¹)	Classe textural
784	55	161	MD-AR*

*Solo: Médio Arenoso.

Após este processo, conforme também calculado com base na análise de solo e recomendação descrita por Novais et. al. (1991), foi necessário fazer adubação fosfatada, aplicando-se 150 g de P dm⁻³ de solo na forma de Super Fosfato Simples que contem 18% de P₂O₅ e Ca. A adubação fosfatada foi incorporada ao solo 5 dias antes da semeadura, simultâneo a incorporação das doses de potássio. Com finalidade promover o aporte de nitrogênio às plantas, foi realizada a inoculação das sementes com bactérias do gênero *Bradyrhizobium* na semeadura (SERAFIM et. al., 2007), utilizando o produto comercial Nitro Super F45 Premium®.

Para o fornecimento de micronutrientes foi aplicado, via água de irrigação, 100 mL por dia de solução nutritiva de Hoagland (HOAGLAND; ARNON, 1950), a partir do estágio V2 (dois trifólios totalmente desenvolvidos) até o estágio R1 (início do florescimento).

A obtenção das plantas de soja foi realizada a partir da germinação inicial de cinco sementes por vaso, com posterior manutenção de apenas uma planta por vaso, através do desbaste realizado no estágio V3 (três trifólios totalmente desenvolvidos). As sementes receberam tratamento com o fungicida comercial Vitavax Thiran 200 SC a fim de manter a sanidade das plantas no estágio inicial do desenvolvimento.

Para o controle das doenças como oídio e antracnose, foram realizadas duas aplicações com 0,37g L⁻¹ de calda do ingrediente ativo (i.a.) Difenconazole. Com finalidade de controlar a infestação da lagarta falsa medideira (*Pseudoplusia includens*), foram realizadas duas aplicações do ingrediente ativo Deltametrina na dosagem 0,05 g de i.a. L⁻¹ de calda. Para o controle de percevejo marrom (*Euschistus heros*) procedeu-se a aplicação de Lambda-cialotrina e Thiamethoxam nas dosagens de 0,10 e 0,14 g de i.a. L⁻¹ de calda, respectivamente. Já para o controle de Ácaro branco (*Polyphagotarsonemus latus*) foi aplicado Cipermetrina e Profenofós nas dosagens de 0,2 e 2,0 g de i.a. L⁻¹ de calda, respectivamente.

4.3 Tratamentos e Delineamento Experimental

O experimento foi realizado em delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 2 x 3, considerando dez

repetições por tratamento. O experimento envolveu três fatores de teste, sendo duas cultivares de soja, três níveis de potássio (K) e dois regimes de irrigação com 100% (condição hídrica controle) e 40% (condição de restrição hídrica) da reposição diária de água em relação à capacidade de campo (CC). As dosagens de potássio foram de 0; 90 e 180 mg dm⁻³, dose essa determinada por Serafim et al. (2007), que trabalhando com adubação potássica em relação ao nível de umidade do solo na cultura da soja em casa de vegetação, observaram maior incremento na produção de grãos, em função do aumento da dose do nutriente. A fonte do fertilizante utilizado foi o Citrato de potássio que contém 42% de K₂O. Apesar da fonte de potássio mais utilizado na agricultura brasileira ser o cloreto de potássio (KCl) (ALCARDE et al, 1998) a mesma não foi utilizada, pois esta fonte contém 45 a 48% de cloro, que é um nutriente que também participa de alguns processos na regulação osmótica (TAIZ; ZEIGER, 2009), assim caso utilizado KCl, o cloro poderia interferir na identificação dos possíveis efeitos do potássio na fisiologia da planta.

A adubação potássica foi incorporada simultaneamente a adubação fosfatada, onde solo de cada vaso foi espalhado separadamente sobre plástico em uma camada de 1 cm de espessura, e ambos os nutrientes foram espalhados sobre o solo e a homogeneização foi realizada com as mãos permitindo o máximo de uniformidade entre as unidade experimentais.

A deficiência hídrica foi estabelecida durante um período de 25 dias, compreendido entre o estágio de desenvolvimento R1 (início do florescimento) até o estágio R5 (início do enchimento das sementes), onde controle de irrigação foi realizado através do método gravimétrico (CATUCHI et al, 2011), que consiste na reposição da lâmina de irrigação diária baseada na pesagem do vaso, de acordo com o seguinte modelo:

$$\text{Reposição dos Vasos 40\%} = \frac{\text{peso do vaso controle na CC} - \text{peso do vaso controle no dia seguinte}}{\text{peso do vaso controle na CC}} \times 0,4 (40\%)$$

$$\text{Reposição dos Vasos 100\%} = \frac{\text{peso do vaso controle na CC} - \text{peso do vaso controle no dia seguinte}}{\text{peso do vaso controle na CC}} \times 1,0 (100\%)$$

Além do controle da reposição da irrigação por pesagem dos vasos, os mesmo tiveram seus níveis de umidade monitorados por um sensor de umidade e

temperatura (modelo, EC/5, DEGAGON, USA), acoplado a um leitor digital (modelo, EC H₂O CHECK, DEGAGON, USA).

4.4 Parâmetros Avaliados

Duas semanas após o início da indução da deficiência hídrica os tratamentos foram avaliados considerando: potencial de água foliar, conteúdo relativo de água, índice de conteúdo de clorofila, extravasamento de membrana, potencial fotossintético. Quando as plantas atingiram o estágio fenológico R1, foram coletadas amostras de trifólios para ser realizada análise química foliar.

No final do ciclo da cultura foi quantificado o rendimento de acúmulo de biomassa.

4.4.1. Potencial de água foliar (Ψ_a)

Medidas de potencial de água foliar foram realizadas com uma câmara de pressão (modelo 1000, PMS Instruments, USA) ao meio dia, com o propósito de estimar os diferentes estados hídricos entre as plantas com 100% da reposição de água e 40% reposição de água, no horário das medidas de fotossíntese.

4.4.2. Conteúdo relativo de água (CRA)

Em cada tratamento foi avaliado o conteúdo relativo de água (LARCHER, 2000). O conteúdo relativo de água (CRA) foi calculado como:

$$CRA = (M_f - M_s) / (M_{sat} - M_s) \times 100 (\%)$$

onde M_f corresponde à massa fresca da amostra pesada imediatamente após a coleta, e M_{sat} corresponde a massa da folha sob saturação de água, após imersão durante 12h, M_s corresponde a massa seca obtida após secagem das amostras em estufa a 60°C até obtenção de massa constante.

4.4.3. Índice de Conteúdo Clorofila (*ICC*)

O Índice de Conteúdo de Clorofilas (*ICC*) foi determinado com um medidor portátil de clorofila (modelo CCM 200, OptSciences, UK). Foi avaliado um folíolo de quatro folhas totalmente expandidas em cada planta de todos os tratamentos.

4.4.4 Extravasamento de membrana (*EM*)

O extravasamento da membrana foi avaliado por condutividade elétrica de uma solução aquosa. Foram coletados 10 discos de folhas extraídos de cada repetição em todos os tratamentos, em seguida foram colocados em um recipiente plástico com 10 mL de água deionizada, os recipientes com a solução foram tampados e mantidos à temperatura de 25° C por 24 horas. Após a encubação, a condutividade do meio foi determinada (X_i) com o auxílio de um medidor portátil de condutividade elétrica (LTLutron, modelo CD-4301). Após a avaliação da condutividade elétrica em condições naturais, a solução foi submetida a banho Maria a 60°C por 3 horas, em seguida a condutividade elétrica do meio foi avaliada novamente (X_f). O Extravasamento de eletrólitos foi expresso como a porcentagem de condutividade inicial em relação à condutividade total após o aquecimento por 3 horas a 60°C $[(X_i/X_f) \times 100]$ (SCOTTI CAMPOS; THU PHAM THI, 1997).

Essa técnica permite avaliar a integridade das membranas celulares visto que quanto menor a condutividade elétrica da solução, menor é a quantidade de eletrólitos que extravasam das membranas, indicando seu grau de integridade.

4.4.5 Potencial fotossintético

O potencial fotossintético foi avaliado por meio de curvas de resposta ao CO₂ (curvas A/Ci). As curvas A/Ci foram realizadas variando-se a concentração de CO₂ ambiente dentro da câmara de amostragem de um analisador de gases por infra-vermelho (IRGA, modelo CIRAS-2, PPSsystem, UK) entre 0 e 1800 ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ S}^{-1}$) (LONG; BERNACCHI, 2003). As medidas foram realizadas sob irradiância saturante de 1200 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Após avaliações, as curvas foram ajustadas conforme modelo proposto por Sharkey et al. (2007), calculando-se

a taxa máxima de carboxilação da Rubisco (V_{cmax}), taxa de transporte fotossintético de elétrons (J) e uso de triose fosfato (TPU).

Através de ajustes da curva A/C_i pelo programa estatístico Origin 6.0 foi extraído o valor de assimilação máxima de CO_2 (A_{max} , $\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

No ponto da curva em que a concentração de CO_2 na câmara de amostragem foi similar a concentração atmosférica ($370 \pm 10 \mu\text{mol mol}^{-1}$) foram avaliados os seguintes parâmetros: assimilação líquida de CO_2 (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração intercelular de CO_2 (C_i , ppm) e transpiração (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). A partir dessas variáveis foram calculadas a eficiência intrínseca do uso da água A/g_s ($EIUA$, $\mu\text{mol mol}^{-1}$).

As medidas das curvas A/C_i foram realizadas entre às 10:00 e 14:00 h em folhas fisiologicamente maduras, sem sinais aparentes de danos ou sintomas de deficiência nutricional.

Após a reidratação das plantas que se desenvolveram sob restrição hídrica, as mesmas tiveram sua capacidade fotossintética reavaliada, considerando somente a assimilação líquida de CO_2 (A , $\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), no ponto de concentração atmosférica de CO_2 ($370 \pm 10 \mu\text{mol mol}^{-1}$) sob luz saturante de $1200 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

A atividade fotoquímica foi quantificada pelo monitoramento de fluorescência da clorofila-*a* com um fluorômetro portátil de luz modulada (modelo FMS-2, Hansatech, UK), considerando-se os seguintes parâmetros: fluorescência basal (F_o) e máxima (F_m) determinadas após 30 minutos de adaptação ao escuro; F_m' e F_s , respectivamente, a fluorescência máxima e o estado de equilíbrio dinâmico na presença de luz, e F_o' que representa a fluorescência basal após a excitação do fotossistema I (FSI). A fluorescência variável (F_v) foi determinada na adaptação no escuro ($F_v = F_m - F_o$) e na presença de luz ($\Delta F = F_m' - F_s$). A partir desses parâmetros foram calculados: eficiência quântica potencial (F_v/F_m) do fotossistema II (FSII), eficiência quântica da antena (F_v/F_m'), eficiência quântica do FSII [$\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$], coeficiente de extinção fotoquímico [$qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o)$] da fluorescência, e a taxa aparente de transporte de elétrons ($ETR = DFFF * \Delta F/F_m' * 0,5 * 0,84$), onde DFFF é a densidade de fluxo de fótons fotossintéticos). Para o cálculo do ETR , 0,5 foi usado para fracionar a distribuição de excitação de energia

para o PSII, e o 0,84 foi usado para fracionar a absorvância de luz (BILGER et al., 1995).

4.4.6 Análise química foliar

Para determinar o teor de K no tecido foliar entre os tratamentos foi realizada análise química foliar, coletando-se trifólios totalmente expandidos em quatro repetições de cada tratamento no estágio de desenvolvimento R1. Após a coleta, o material vegetal foi seco em estufa a 65°C até obtenção da massa constante. As amostras foram particionadas e maceradas para realização da análise química foliar no Laboratório de Tecidos Vegetais da UNOESTE, que utiliza os métodos de análise descritos por Malavolta et al. (1997).

4.4.7 Rendimento de biomassa

No final do experimento o rendimento agrícola foi avaliado considerando:

- Área foliar planta⁻¹ (AF) que foi analisada com um medidor portátil de área foliar (modelo LI-3000A, Li-Cor, USA)

- Avaliação biométrica: após a secagem das plantas em estufa a 65° C até a obtenção do peso constante, foram quantificados os seguintes parâmetros biométricos: Massa de grãos por planta (M_G), Massa seca da parte aérea (MS_{PA}), Massa seca da raiz (MS_R), Massa seca total por planta (MS_T) e a relação entre massa seca da parte aérea e massa seca da raiz (MS_{PA}/MS_R) (BENINCASA, 2003).

- Razão de Área Foliar (RAF): que é caracterizado pela área foliar que está sendo usada pela planta para produzir 1 grama de matéria seca, ou seja, é a relação entre área foliar e a massa seca total da planta, que é calculada pela seguinte equação:

$$\frac{AF}{M_{Stotal}} = \frac{AF}{MS_{folhas}} \cdot \frac{MS_{folhas}}{M_{Stotal}}$$

(RAF) (AFE) (RPF),

onde AFE é a área foliar específica que é o componente morfológico e anatômico da RAF, porque relaciona a superfície com o peso da matéria seca da própria folha. A superfície é componente morfológico e o peso é o componente anatômico, pois está relacionado à composição interna (número e\ou tamanho das células do mesófilo foliar). Já RPF é a razão do peso da folha, este também é um componente da RAF, basicamente fisiológico, já que é a razão entre o peso de matéria seca retida nas folhas e o peso da matéria seca acumulada na planta toda (BENINCASA, 2003).

4.5 Análise dos Dados

Os dados foram submetidos à Análise de Variância e os valores médios comparados através do teste Tukey ($p < 0,05$), utilizando-se o programa estatístico SISVAR.

5 RESULTADOS

5.1 Condições Nutricional do Solo e Planta

Com base nos resultados da análise química do solo (Tabela 1), é possível observar que os teores de potássio (K^+) estão coerentes com as doses de Citrato de potássio aplicadas, estando dentro da faixa suficiente para o máximo desenvolvimento da cultura, segundo a tabela de interpretação de resultados de análise química do solo para a cultura da soja (EMBRAPA, 2008). Ainda na Tabela 1, observa-se que os teores de potássio no solo avaliados no final do experimento reduziram 53, 41 e 19% para as doses de 0; 90 e 180 mg de $K\ dm^{-3}$ de solo respectivamente, em relação ao teor K^+ avaliado no início do trabalho.

Na Tabela 3 que expressa os resultados de teor de potássio no tecido foliar, é possível observar que ambas as cultivares, nas duas condições hídricas testadas responderam à adubação potássica aplicada no plantio, porém esse teor ficou abaixo do teor suficiente para o máximo desenvolvimento da cultura da soja, que é de 17 a 25 $g\ kg^{-1}$ (EMBRAPA, 2008). Na cultivar BR-16 o teor de K na dose máxima (180 $mg\ dm^{-3}\ K$) foi inferior ao teor de K na dose de 90 $mg\ dm^{-3}\ K$ nas duas condições hídricas. Na cultivar Embrapa 48 o teor de K no tecido foliar aumentou linearmente em resposta às doses de K aplicada. Comparando o teor de potássio entre as duas cultivares é possível observar que a cultivar Embrapa 48 apresentou o teor de potássio no tecido foliar maior em relação a BR-16.

Houve sintomas visuais de deficiência de potássio (Figuras 1 e 2) nas folhas de ambas cultivares quando não foi adicionado potássio ao plantio, em condições hídricas controle, sintomas estes comparados aos descritos por Borkert et al. (1994).

TABELA 3 - Teor médio de potássio no tecido foliar ($g\ kg^{-1}$)

Cultivar Rep. Hídrica	BR-16		Embrapa 48	
	100%	40%	100%	40%
Dose de K ($mg\ dm^{-3}$)				
0	4,9	5,5	8,4	10,4
90	12,8	12,7	12,9	13,7
180	10,4	10,5	15,1	15,9

FIGURA 1 - Comparação dos sintomas visuais de deficiência de K

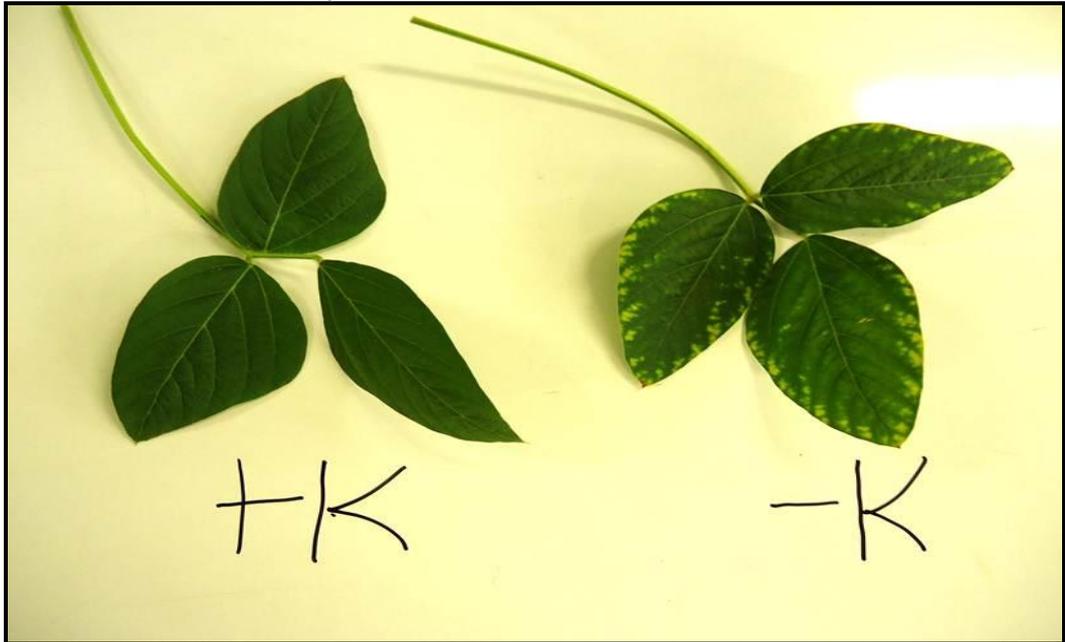


FIGURA 2 - Sintomas visuais de deficiência de K



5.2 Condição Hídrica das Plantas

Antes de iniciar as análises fisiológicas, duas semanas após o início do déficit hídrico, as plantas tiveram seus potenciais hídricos aferidos por uma câmara de pressão. Assim, foi calculada uma média para os dois níveis de irrigação, onde o potencial de água das plantas sob condição hídrica controle foi de -0,78 MPa e das plantas em condição de restrição hídrica ficou em torno de -1,7 MPa.

A umidade do solo, que foi monitorada diariamente após o início do déficit hídrico, ficou em torno de 25% e 10% para os tratamentos em condição hídrica controle e de restrição hídrica, respectivamente.

O *CRA* (Tabela 4) foi estatisticamente ($p < 0,05$) maior nas plantas sob condição hídrica controle em relação às plantas sob déficit hídrico, em ambas cultivares. Na cultivar BR-16 houve o aumento do *CRA* com aplicação de potássio (180 mg dm^{-3} de K) em condição hídrica controle. Entretanto, esse efeito não foi observado nas plantas desenvolvidas em condição de restrição hídrica. Por outro lado, na cultivar Embrapa 48, houve diferenças do *CRA* entre os níveis de irrigação apenas quando as plantas não foram suplementadas com potássio.

Os resultados de análise de estabilidade de membranas celulares, determinado pelo extravasamento de eletrólitos celulares por condutividade elétrica (Tabela 5), em geral não indicaram em nenhum tratamento danos severos na membrana celular causada pela deficiência hídrica imposta.

TABELA 4: Valores médios de conteúdo relativo de água (*CRA*)

Cultivar Rep. Hídrica	BR-16		Embrapa 48	
	100%	40%	100%	40%
Dose de K (mg dm ⁻³)				
0	80,6 ^{Ab(1)}	75,6 ^{Ba}	83,5 ^{Aa}	76,5 ^{Ba}
90	83,9 ^{Aab}	75,4 ^{Ba}	81,7 ^{Aa}	80,5 ^{Aa}
180	84,9 ^{Aa}	77,9 ^{Ba}	83,2 ^{Aa}	78,0 ^{Aa}

⁽¹⁾ As letras maiúsculas seguida das médias indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre os níveis de reposição hídrica dentro de cada cultivar e letra minúsculas indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre as doses de potássio dentro de cada nível de reposição hídrica.

TABELA 5: Valores médios de Extravasamento de Membrana (*EM*) (μS)

Cultivar Rep. Hídrica	BR-16		Embrapa 48	
	100%	40%	100%	40%
Dose de K (mg dm ⁻³)				
0	28 ^{Aa(1)}	21 ^{Ba}	26 ^{Aa}	23 ^{Aa}
90	23 ^{Ab}	21 ^{Aa}	28 ^{Aa}	23 ^{Ba}
180	27 ^{Aa}	23 ^{Ba}	28 ^{Aa}	21 ^{Ba}

⁽¹⁾ As letras maiúsculas seguida das médias indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre os níveis de reposição hídrica dentro de cada cultivar e letra minúsculas indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre as doses de potássio dentro de cada nível de reposição hídrica.

5.3 Atividade Fotossintética das Plantas

Nos resultados do *ICC* da Tabela 6, é possível observar nas duas cultivares, diferença ($p < 0,05$) entre os níveis de reposição hídrica, onde as plantas em condição hídrica controle apresentaram valores de *ICC* mais elevados. Não houve resposta do *ICC* em relação às doses de K, em nenhuma cultivar avaliada.

Os resultados de A_{max} , g_s , C_i , V_{cmax} , J , E e TPU foram reduzidos nas duas cultivares em condição hídrica limitante, já a *EIUA* aumentou nesta mesma condição (Tabela 7).

O A_{max} , g_s , V_{cmax} , E e J aumentaram em razão da suplementação potássica nas duas cultivares, em condição hídrica controle. Com exceção da *TPU* que reduziu com a dose de 180 mg dm^{-3} na cultivar BR-16, nenhum parâmetro da tabela 7, foi influenciado pela adubação potássica em condições de restrição hídrica.

O C_i e *EIUA* não foram influenciadas pela adubação potássica em nenhuma cultivar e nas duas condições hídricas.

Na Tabela 8 é possível observar que não houve influência significativa ($p < 0,05$) da adubação potássica sobre os parâmetros fotoquímicos avaliados nas plantas das duas cultivares sob restrição hídrica. Já em condição hídrica controle, o potássio promoveu o aumento da eficiência quântica efetiva do FSII ($\Phi PSII$) e da taxa aparente de transporte de elétrons (*ETR*) na cultivar BR-16, suplementada com a dose de 180 mg dm^{-3} K.

Entre os níveis de reposição hídrica, houve diferenças significativas ($p < 0,05$) na $\Phi PSII$ e *ETR* para cultivar BR-16, onde estes em condição hídrica controle, sem e com suplementação de potássio na dose de 90 mg dm^{-3} , foram inferiores em relação à essas mesmas doses em condição de déficit hídrico.

A Figura 3 expressa os valores de assimilação líquida de CO_2 (*A*) das plantas re-avaliadas 12 horas após a reidratação, em relação às plantas em condições de deficiência hídrica. De forma geral, os valores de *A* de ambas cultivares reduziram 50% sob deficiência hídrica, independentemente das doses de K. Na cultivar BR 16, após a reidratação, os valores de *A* foram 27% maiores nas plantas sem adição de K, e 42 % maiores nas plantas suplementadas com 90 mg dm^{-3} K. Entretanto, a maior dose de K não permitiu uma recuperação dos valores de *A* após a reidratação. Por outro lado, a cultivar Embrapa 48 respondeu positivamente às duas suplementações de K na recuperação dos valores de *A*.

Enquanto que nas plantas sem adição de K não houve recuperação da A, as plantas que receberam as doses de 90 e 180 mg dm⁻³ K mostraram valores de A 57 e 38%, respectivamente, superiores aos das plantas sob deficiência hídrica.

TABELA 6 - Índice de Conteúdo de Clorofila (ICC)

Cultivar Rep. Hídrica	BR-16		Embrapa 48	
	100%	40%	100%	40%
Dose de K (mg dm ⁻³)				
0	31 ^{Aa(1)}	25 ^{Ba}	34 ^{Aa}	26 ^{Ba}
90	31 ^{Aa}	27 ^{Ba}	31 ^{Aa}	26 ^{Ba}
180	33 ^{Aa}	24 ^{Ba}	32 ^{Aa}	26 ^{Ba}

⁽¹⁾ As letras maiúsculas seguida das médias indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre os níveis de reposição hídrica dentro de cada cultivar e letra minúsculas indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre as doses de potássio dentro de cada nível de reposição hídrica.

TABELA 7 - Valores médios de assimilação máxima de CO₂ (*A*_{max}, μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), condutância estomática (*g*_s, mmol H₂O m⁻² s⁻¹), concentração intercelular de CO₂ (*C*_i, ppm), taxa máxima de carboxilação da Rubisco (*V*_{cmax}, μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), taxa de transporte fotossintético de elétrons (*J*, μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), uso de triose fosfato (*TPU*, μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), transpiração (*E*, mmol H₂O m⁻² s⁻¹) e eficiência intrínseca do uso da água *A/g*_s (*EIUA*, μmol mol⁻¹)

Cultivar	Rep. Hídrica	BR-16						Embrapa 48					
		100%			40%			100%			40%		
		0	90	180	0	90	180	0	90	180	0	90	180
<i>A</i> _{max}		31,9 ^{Ab(1)}	38,7 ^{Aa}	40,4 ^{Aa}	18,5 ^{Ba}	20,4 ^{Ba}	17,9 ^{Ba}	32,5 ^{Ab}	37,9 ^{Aa}	38,1 ^{Aa}	17,3 ^{Ba}	17,1 ^{Ba}	18,2 ^{Ba}
<i>g</i> _s		233 ^{Ab}	424 ^{Aa}	344 ^{Ab}	80 ^{Ba}	102 ^{Ba}	98 ^{Ba}	280 ^{Ab}	393 ^{Aa}	348 ^{Ab}	92 ^{Ba}	89 ^{Ba}	89 ^{Ba}
<i>C</i> _i		234 ^{Aa}	246 ^{Aa}	239 ^{Aa}	209 ^{Ba}	210 ^{Ba}	204 ^{Ba}	234 ^{Aa}	247 ^{Aa}	250 ^{Aa}	206 ^{Ba}	196 ^{Ba}	184 ^{Ba}
<i>V</i> _{cmax}		174 ^{Ab}	196 ^{Aab}	224 ^{Aa}	110 ^{Ba}	124 ^{Ba}	93 ^{Ba}	166 ^{Ab}	218 ^{Aa}	212 ^{Aa}	117 ^{Ba}	105 ^{Ba}	124 ^{Ba}
<i>J</i>		168 ^{Ab}	187 ^{Aab}	197 ^{Aa}	105 ^{Ba}	120 ^{Ba}	92 ^{Ba}	157 ^{Ab}	194 ^{Aa}	173 ^{Aab}	94 ^{Ba}	96 ^{Ba}	111 ^{Ba}
<i>TPU</i>		13,1 ^{Aa}	13,4 ^{Aa}	14,6 ^{Aa}	8,3 ^{Bab}	8,9 ^{Ba}	6,9 ^{Bb}	12,0 ^{Aa}	14,0 ^{Aa}	13,7 ^{Aa}	7,7 ^{Ba}	7,4 ^{Ba}	8,0 ^{Ba}
<i>E</i>		3,97 ^{Ab}	5,43 ^{Aa}	5,10 ^{Aa}	1,66 ^{Ba}	2,00 ^{Ba}	1,99 ^{Ba}	4,24 ^{Ab}	5,56 ^{Aa}	5,06 ^{Aa}	1,90 ^{Ba}	1,70 ^{Ba}	1,79 ^{Ba}
<i>EIUA</i>		0,06 ^{Ba}	0,05 ^{Ba}	0,05 ^{Ba}	0,08 ^{Aa}	0,08 ^{Aa}	0,08 ^{Aa}	0,06 ^{Ba}	0,05 ^{Ba}	0,05 ^{Ba}	0,08 ^{Aa}	0,09 ^{Aa}	0,10 ^{Aa}

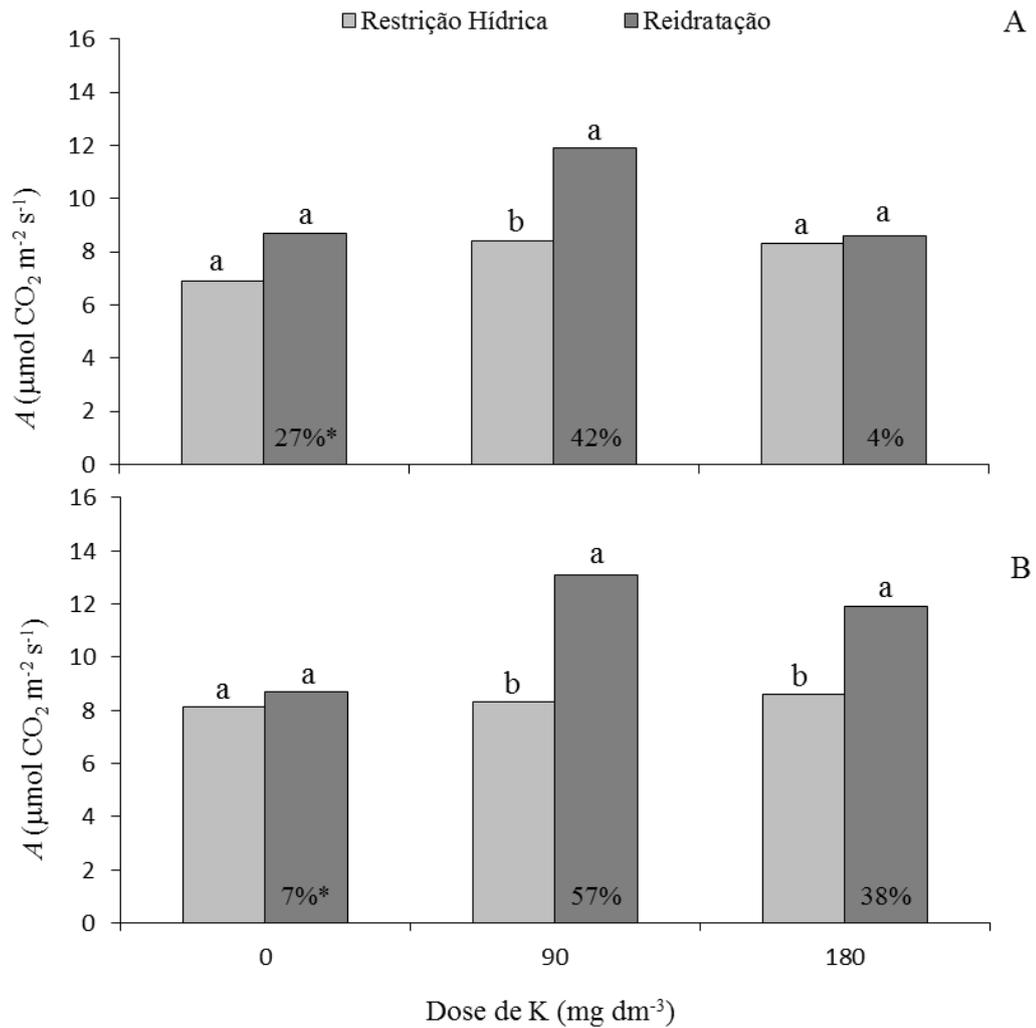
⁽¹⁾ As letras maiúsculas seguidas das médias indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre os níveis de reposição hídrica dentro de cada cultivar e letras minúsculas indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre as doses de potássio dentro de cada nível de reposição hídrica, para cada cultivar.

TABELA 8 - Valores médios de eficiência quântica potencial do FSII (F_v/F_m), eficiência quântica da antena (F_v'/F_m'), eficiência quântica do Fotossistema II ($\Phi PSII$), coeficiente de excitação fotoquímico (qP) e taxa aparente de transporte de elétrons (ETR)

Cultivar	Rep. Hídrica	BR-16						Embrapa 48					
		100%			40%			100%			40%		
		0	90	180	0	90	180	0	90	180	0	90	180
F_v/F_m		0,825 ^{Aa}	0,818 ^{Aa}	0,842 ^{Aa}	0,828 ^{Aa}	0,833 ^{Aa}	0,819 ^{Aa}	0,829 ^{Aa}	0,838 ^{Aa}	0,833 ^{Aa}	0,832 ^{Aa}	0,823 ^{Aa}	0,830 ^{Aa}
F_v'/F_m'		0,627 ^{Aa}	0,653 ^{Aa}	0,631 ^{Aa}	0,672 ^{Aa}	0,704 ^{Aa}	0,611 ^{Aa}	0,627 ^{Aa}	0,688 ^{Aa}	0,645 ^{Aa}	0,613 ^{Aa}	0,684 ^{Aa}	0,630 ^{Aa}
$\Phi PSII$		0,668 ^{Bb}	0,674 ^{Bab}	0,730 ^{Aa}	0,732 ^{Aa}	0,746 ^{Aa}	0,701 ^{Aa}	0,714 ^{Aa}	0,730 ^{Aa}	0,724 ^{Aa}	0,700 ^{Aa}	0,747 ^{Aa}	0,724 ^{Aa}
qP		0,874 ^{Aa}	0,848 ^{Aa}	0,873 ^{Aa}	0,901 ^{Aa}	0,917 ^{Aa}	0,901 ^{Aa}	0,901 ^{Aa}	0,922 ^{Aa}	0,901 ^{Aa}	0,874 ^{Aa}	0,911 ^{Aa}	0,883 ^{Aa}
ETR		416 ^{Bb}	420 ^{Bab}	454 ^{Aa}	456 ^{Aa}	464 ^{Aa}	437 ^{Aa}	444 ^{Aa}	454 ^{Aa}	450 ^{Aa}	435 ^{Aa}	464 ^{Aa}	450 ^{Aa}

⁽¹⁾ As letras maiúsculas seguidas das médias indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre os níveis de reposição hídrica dentro de cada cultivar e letras minúsculas indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre as doses de potássio dentro de cada nível de reposição hídrica, para cada cultivar.

Figura 3 - Valores médios de assimilação líquida de CO₂ (A, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), avaliadas nas plantas que se desenvolveram sob restrição hídrica (40%) e 12 horas após sua reidratação. As letras indicam a diferença estatística ($p < 0,05$) entre os níveis hídricos dentro de cada dose de potássio, na cultivar BR-16 (A) e Embrapa 48 (B). * porcentagem de recuperação em relação ao déficit hídrico, na mesma dose de K



5.4 Rendimento de Biomassa

Nos resultados de biomassa (Tabela 9), é possível observar que na cultivar BR-16 a M_G , MS_{PA} , MS_R e MS_T aumentaram em função da adubação potássica em condição hídrica controle. Nesta mesma condição a RAF foi reduzida com a dose de 180 mg dm^{-3} de K, a área foliar e a relação MS_{PA}/MS_R não foram influenciadas pela adubação potássica.

Na cultivar Embrapa 48 em condição hídrica controle a M_G aumentou com a suplementação de potássio na dose de 90 mg dm^{-3} de K, já a área foliar e a RAF reduziram com a dose de 180 mg dm^{-3} de K (Tabela 9).

Em condições de restrição hídrica nas duas cultivares, nenhum parâmetro de biomassa foi influenciado pela adubação potássica. Com exceção da MS_R na cultivar BR-16 sem suplementação de K e na cultivar Embrapa 48 com 180 mg dm^{-3} de K, todos os parâmetros de biomassa foram reduzidos sob déficit hídrico em relação à condição hídrica controle.

TABELA 9 - Massa de grãos por planta (M_G , g), massa seca da parte aérea por planta (MS_{PA} , g), massa seca da raiz por planta (MS_R , g), massa seca total por planta (MS_T , g), área foliar por planta (AF , cm^2), razão da área foliar por planta AF/MS_T (RAF , cm^2) e relação MS_{PA}/MS_R (g)

Cultivar	BR-16						Embrapa 48					
	100%			40%			100%			40%		
	0	90	180	0	90	180	0	90	180	0	90	180
Rep. Hídrica												
Dose de K ($mg\ dm^{-3}$)												
M_G	21,41 ^{Ab(1)}	26,31 ^{Aa}	26,94 ^{Aa}	13,00 ^{Ba}	13,98 ^{Ba}	13,16 ^{Ba}	21,00 ^{Ab}	23,91 ^{Aa}	22,16 ^{Aab}	11,54 ^{Ba}	11,45 ^{Ba}	10,57 ^{Ba}
MS_{PA}	47,77 ^{Ab}	57,14 ^{Aa}	59,28 ^{Aa}	27,44 ^{Ba}	29,15 ^{Ba}	27,03 ^{Ba}	48,76 ^{Aa}	51,82 ^{Aa}	47,65 ^{Aa}	24,49 ^{Ba}	25,26 ^{Ba}	23,22 ^{Ba}
MS_R	6,37 ^{Ab}	8,32 ^{Aa}	8,65 ^{Aa}	5,00 ^{Aa}	5,14 ^{Ba}	5,50 ^{Ba}	4,92 ^{Aa}	5,67 ^{Aa}	5,60 ^{Aa}	3,93 ^{Aa}	4,60 ^{Aa}	4,15 ^{Ba}
MS_T	54,14 ^{Ab}	65,46 ^{Aa}	67,94 ^{Aa}	32,44 ^{Ba}	34,30 ^{Ba}	32,54 ^{Ba}	53,68 ^{Aa}	57,49 ^{Aa}	53,24 ^{Aa}	28,42 ^{Ba}	29,86 ^{Ba}	27,37 ^{Ba}
AF	1468,2 ^{Aa}	1637,7 ^{Aa}	1542,6 ^{Aa}	897,8 ^{Ba}	756,7 ^{Ba}	735,3 ^{Ba}	1564,8 ^{Aa}	1356,1 ^{Aab}	1258,1 ^{Ab}	649,3 ^{Ba}	724,3 ^{Ba}	781,5 ^{Ba}
RAF	27,1 ^{Aa}	25,5 ^{Aab}	22,9 ^{Ab}	25,5 ^{Aa}	23,5 ^{Aa}	22,9 ^{Aa}	28,9 ^{Aa}	23,5 ^{Aab}	24,0 ^{Ab}	23,6 ^{Aa}	24,2 ^{Aa}	29,7 ^{Aa}
MS_{PA}/MS_R	8,77 ^{Aa}	8,45 ^{Aa}	7,97 ^{Aa}	5,98 ^{Ba}	5,50 ^{Ba}	5,56 ^{Ba}	11,12 ^{Aa}	9,92 ^{Aa}	9,42 ^{Aa}	6,61 ^{Ba}	5,89 ^{Ba}	5,96 ^{Ba}

⁽¹⁾ As letras maiúsculas seguidas das médias indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre os níveis de reposição hídrica dentro de cada cultivar e letras minúsculas indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre as doses de potássio dentro de cada nível de reposição hídrica, para cada cultivar.

6 DISCUSSÃO

De acordo com os dados de potencial de água da folha (Ψ_a) é possível observar que o nível de deficiência hídrica imposta por um teor de água no solo 40% menor do que a condição hídrica controle foi sentido pelas plantas, pois, segundo Taiz e Zeiger (2009), um Ψ_a em torno de -1,7MPa é considerado como estresse hídrico moderado. Outro parâmetro que também pode confirmar a condição de estresse hídrico moderado é o CRA (Tabela 4), o qual foi reduzido nas plantas sob restrição hídrica em relação ao controle em ambas cultivares. Porém, na cultivar Embrapa 48 suplementada com potássio não houve tal redução, sugerindo que pode ter ocorrido um maior ajustamento osmótico ou redução das perdas por transpiração (LARCHER, 2000). O ajustamento osmótico é o processo pelo qual plantas, em condições de estresse hídrico, acumulam ativamente açúcares, ácidos orgânicos e íons no citosol da célula para diminuir o potencial osmótico e conseqüentemente manter o potencial hídrico e o turgor de suas células próximo do nível ótimo (NEPOMUCENO et al., 2001).

O decréscimo do A_{max} (Tabela 7) em ambas cultivares em função da condição hídrica limitante pode ser oriundo da redução da turgescência das células-guarda do estômato seguido pelo fechamento do poro estomático (BARUCH, 1994; SILVA et al., 2001), ocasionando maior resistência difusiva à entrada do CO_2 , reduzindo a concentração intercelular de CO_2 e conseqüentemente diminuindo a assimilação de carbono (KAISER, 1987). Entretanto, a redução potencial da fotossíntese em condição hídrica limitante pode estar ligada também à atuação sinérgica de alguns fatores, como a redução do uso de triose fosfato (TPU) e da taxa máxima de carboxilação da Rubisco (V_{cmax}) (Tabela 7). Segundo Parry et al. (2002) a redução na fotossíntese em condições de restrição hídrica pode estar condicionada também à limitação na atividade da Rubisco, devido a fatores de inibição ligados a enzimas. Já Lawlor (2002) relata que reduções na fotossíntese de plantas submetidas à deficiência hídrica podem estar relacionadas também à limitação da síntese de ribulose bi-fosfato (RuBP), o que pode ser observado neste trabalho (Tabela 7), através da redução da taxa de transporte de elétrons fotossintéticos (J) a qual influencia a capacidade de regeneração da RuBP dependente de ATP.

Em condição hídrica controle a resposta positiva do A_{max} em ambas cultivares (Tabela 7) à adubação potássica, pode ser conseqüência do aumento da

condutância estomática (g_s), taxa de transporte fotossintético de elétrons (J) e a taxa máxima de carboxilação da Rubisco, em resposta à adubação potássica. Segundo Cakmak (2005), o K pode conferir às plantas uma dinâmica adequada da condutância estomática, sendo também um elemento extremamente importante na ativação da função carboxilase da Rubisco, contribuindo para uma maior atividade fotossintética das plantas (PRADO, 2008). Estes resultados corroboram com as respostas obtidos por Jia et al. (2008), onde observou-se que a taxa fotossintética de plantas de arroz aumentou com o fornecimento adequado de K em relação as plantas sob deficiência de K, atribuindo-se estes resultados ao aumento da atividade de carboxilação da Rubisco.

Como já descrito anteriormente nos resultados, a concentração intercelular de CO_2 (C_i) não aumentou em função da elevação da condutância estomática (g_s) com a adição da dose intermediária de K, em condições controle para ambas as cultivares, porém, estes resultados conflitam com o aumento da assimilação máxima de CO_2 (A_{max}). Assim, sugere-se que esta resposta ocorreu em função da suplementação potássica ter aumentado a taxa de carboxilação da Rubisco (V_{cmax}) (Figura 7), conseqüentemente promovendo maior consumo do CO_2 intercelular extra que entrou pelo poro estomático em função da maior condutância estomática.

A redução da transpiração (E) (Tabela 7) sob condição hídrica limitante, em relação ao nível hídrico controle, em ambas as cultivares, contribuiu para a redução da A_{max} das plantas. Quando a transpiração foliar é reduzida a capacidade de dissipação de calor latente pode ser negativamente afetada, aumentando a temperatura da folha, reduzindo a atividade carboxilase da Rubisco (V_{cmax}), fazendo com que ocorra diminuição da assimilação de CO_2 pelas plantas (BERRY; BJÖRKMAN, 1980; BJÖRKMAN et al., 1980; HÄLLGREN et al., 1991).

O aumento da eficiência intrínseca do uso da água (E/UA) (Tabela 7) em condição hídrica limitante nas duas cultivares, independentemente da suplementação com K, indica a capacidade da planta na regulação das trocas gasosas, reduzindo proporcionalmente mais a condutância estomática e conseqüentemente a transpiração do que a assimilação de CO_2 , gerando economia de água por cada molécula de CO_2 assimilada, uma vez que uma redução parcial da condutância estomática limita proporcionalmente mais a transpiração do que a entrada de CO_2 na folha (CHAVES; OLIVEIRA, 2004).

Os parâmetros de atividade fotoquímica da fotossíntese (Tabela 8) estão de acordo com os dados de extravasamento de membrana (Tabela 5), que indicam que não houve danos severos às membranas em função da deficiência hídrica e, conseqüentemente houve a manutenção da atividade fotoquímica das plantas. As respostas de $\Phi PSII$ e ETR na cultivar BR-16, suplementada com a dose de 180 mg dm^{-3} K em condição hídrica controle, estão de acordo com Jia et al. (2008), que observaram influência positiva do potássio sobre estes parâmetros.

Os resultados de assimilação líquida de CO_2 após o período de recuperação (Figura 3) indicam que a adubação potássica pode promover um aumento da fotossíntese das plantas após sua reidratação. Segundo Flexas et al. (2004) a intensidade e duração da restrição hídrica são fatores determinantes que definem a velocidade e proporção de recuperação da planta após a reidratação. Em geral plantas submetidas a estresse hídrico severo apresentam uma recuperação de apenas 40-60% da taxa fotossintética máxima no dia seguinte. Nos resultados obtidos esses valores só foram alcançados nas plantas que foram suplementadas com K. A resposta da recuperação das plantas em razão da adubação potássica, pode estar relacionada com a influência deste nutriente na reparação de danos oxidativos das células em condições de estresse hídrico (Soleimanzadeh et al., 2010). Essa retomada maior das taxas fotossintéticas das plantas suplementadas com K após a recuperação poderia proporcionar uma retomada mais rápida do crescimento das plantas, minimizando as perdas de produtividade.

De forma similar aos dados de atividade fotossintética das plantas (Tabela 7), os resultados de biomassa, em geral (Figura 9), foram reduzidos pela deficiência hídrica em ambas as cultivares de forma independente da suplementação potássica. Este evento ocorre em função da queda na atividade fotossintética das plantas causada pelo déficit hídrico, resultando em um decréscimo no acúmulo de carboidratos (NEUMAIER et al., 2000).

Em condição hídrica controle a MS_T aumentou na cultivar BR-16 em razão da adubação potássica. Esta resposta pode ter ocorrido em função do K ter promovido uma melhor taxa fotossintética destas plantas (Tabela 7), aliado a uma maior expansão celular, através do aumento do turgor celular pelo ajuste osmótico (PRADO, 2008), o que conseqüentemente aumentou o crescimento e acúmulo de biomassa total. As respostas de maior produção de grãos (Tabela 9) nas duas cultivares em condições hídricas controle e maior taxa fotossintética (Tabela 7),

pode ser explicado pelo fato do K poder promover uma maior translocação dos fotoassimilados produzidos para o enchimento dos grãos (CAKMAK, 2005; MALAVOLTA, 2006).

A redução da razão da área foliar (*RAF*) (Tabela 9) em função da adubação potássica sob condição hídrica controle nas duas cultivares indica que, apesar da ausência de resposta positiva da área foliar de ambas as cultivares à dose de 180 mg dm^{-3} de K, estas foram mais eficientes nesta dose pois necessitaram de menor área foliar para produzir uma grama de massa seca total por planta.

Em condições de déficit hídrico, ambas cultivares, independente da adubação potássica, tiveram a relação MS_{PA}/MS_R reduzida em comparação às plantas em condição hídrica controle. Este evento ocorre em função do déficit hídrico promover a expansão do sistema radicular para zonas mais profundas e úmidas do perfil do solo. Este processo se inicia gradativamente após a secagem da superfície do solo (SANTOS; CARLESSO, 1998).

Em geral a ausência de resposta das plantas à adubação potássica em condições de restrição hídrica, pode ser explicada pelo evento de aclimação em razão da duração da restrição hídrica imposta no trabalho (25 dias). Segundo Flexas, et al. (2006) e Lizana et al. (2006), quando o estresse hídrico é imposto gradualmente compreendendo semanas, a planta pode aclimatar-se a este fator limitante, envolvendo genes de expressão e modificações fisiológicas e morfológicas as quais levam a uma compensação homeostática para os primeiros efeitos negativos do estresse hídrico. Em acordo com a colocação a cima, Pinheiro et al. (2011) relatam que alterações metabólicas na planta, ocorrem antes da alterações do estado hídrico da mesma sob imposição da condição limitante. Em estudo realizado por Sean Gupta et al. (1988) em trigo, os resultados demonstram que a pesar de ter havido resposta positiva da adubação potássica em condição de estresse hídrico, nas plantas expostas a dois ciclos de restrição hídrica (aclimatadas), a interferência deste nutriente na fotossíntese foi muito menos pronunciada na fotossíntese em relação às plantas sujeitas a um único ciclo de restrição hídrica curto (não aclimatadas).

7 CONCLUSÕES

1- Em condições de restrição hídrica, a adubação potássica não interferiu expressivamente na manutenção dos parâmetros fisiológicos avaliados neste trabalho.

2- A suplementação com potássio promoveu uma melhor eficiência dos parâmetros fisiológicos em condição hídrica controle nas duas cultivares, onde as principais variáveis influenciadas pelo nutriente foram a condutância estomática (g_s), taxa máxima de carboxilação da Rubisco (V_{cmax}) e assimilação máxima de CO_2 (A_{max}).

3- A suplementação com K melhorou a recuperação fotossintética das plantas após a reidratação especialmente na cultivar Embrapa 48.

4- A suplementação com potássio em condição hídrica controle, na cultivar BR-16 aumentou a produção de massa seca total por planta e produção de grãos, já na cultivar Embrapa 48, só a produção de grãos é influenciada pelo potássio.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. **Os adubos e eficiência das adubações**. 3.ed. São Paulo: ANDA, 1998. 35 p. (Boletim técnico).
- ANDERSEN, M. N.; JENSEN C. R.; LOSCH, R. Derivation of Pressure-Volume Curves by a Non-Linear Regression Procedure and Determination of Apoplastic Water. **Journal of Experimental Botany**, v. 42, p. 159-165, 1991.
- ASADA, K. The water-water cycle as alternative photon and electron sinks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*. **Biological Sciences**, London, v. 355, p. 1419-1431, 2000.
- BAKER, N. R.; ROSENQVIST, E. Application of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, p. 1607-1621, 2004.
- BARUCH, Z. Responses to drought and flooding in tropical forage grasses. II: Leaf water potential, photosynthesis rate and alcohol dehydrogenase activity. **Plant and Soil**, v. 164, p. 97-105, 1994.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas**. 1.ed. Jaboticabal: Funep, UNESP, 2003. 42 p.
- BERRY, J.; BJÖRKMAN, O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 31, p. 491-543, 1980.
- BILGER, W.; SCHREIBER, U.; BOCK, M. Determination of the quantum efficiency of photosystem II and non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence in the field. **Oecologia**, v. 102, p. 425-432, 1995.
- BJÖRKMAN, O.; BADGER, M. R.; ARMOND, P. A. Response and adaptation of photosynthesis to high temperatures. In: Turner, N.C.; Kramer, P.J. (ed.). **Adaptation of plants to water and high temperature stress**. New York: John Wiley, 1980. cap. 15, p. 233-249.
- BLEVINS, D. G. Role of potassium in protein metabolism in plants. In: MUNDSON, R. D. (ed.). **Potassium in Agriculture**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1985. p. 413-24.
- BORKERT, C. M. et al. Seja Doutor da sua soja. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 66, 16 p, 1994. (Arquivo do Agrônomo – n. 5)
- BOYER, J. S. Water deficit and photosynthesis. In: KOZLOWSKI, T. T. (ed.). **Water deficits and plant growth**. London: Academic Press, 1978. v. 4, p.154-191.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, Turquia, v. 168, p. 521-530, 2005.

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

CATUCHI, T. A. et al. Tolerance to water deficiency between two soybean cultivars: transgenic *versus* conventional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 373-378, 2011.

CHAVES, M. M.; OLIVEIRA, M. M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. **Journal of Experimental Botany**, Lisboa, v. 55, n. 407, 2004.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safra da soja 2010/11**. Brasília, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso: 03 de janeiro de 2012.

CONFALONE, A. E.; COSTA, L. C.; PEREIRA, C. R. Crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 165-169, 1998.

DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS III, W. W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 43, p. 599-626, 1992.

DESCLAUX, D.; HUYNH, T.; ROUMET, P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. **Crop Science**, Madison, v. 40, p. 716-722, 2000.

DOWNTON, W. J. S. Osmotic adjustment during water stress protects the photosynthetic apparatus against photoinhibition. **Plant Science Letters**, Austrália, v. 30, p. 137-143, 1983.

DYSON, T. World food trends and prospects to 2025. **Proc. Natl. Acad. Sci., USA**, v. 96, p. 5929–5936, 1999.

EAKES, D. J.; WRIGHT R. D.; SEILER, J. R. Moisture stress conditioning effects on *Salvia splendens* 'Bonfire'. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 116, p. 716-719. 1991.

EMBRAPA. Sistema de Produção 13. **Tecnologia de produção de soja - Região central do Brasil – 2009 e 2010**. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. cap. 1: Exigências Climáticas, p. 11-12.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1999. 412 p.

EGILLA, J. N. et al. Drought stress influences leaf water content, photosynthesis, and water-use efficiency of *Hibiscus rosa-sinensis* at three potassium concentrations. **Photosynthetica**, v. 40, p. 135-140, 2005.

FARQUHAR, G. D.; SHARKEY, T. D. Stomatal conductance and photosynthesis. **Anual Review of Plant Physiology**, v. 33, p. 317-345, 1982.

FLEXAS J. et al. Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. **Physiol Plant**, v. 127, p. 343-352, 2006.

FLEXAS J. et al. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. **Plant Biology**, v. 6, p. 269-279, 2004.

GOPEFERT, H.; ROSSETTI, L. A.; SOUZA, J. **Eventos generalizados e seguridade agrícola**. Brasília: IPEA, Ministério do Planejamento, 1993. 78 p.

HÄLLGREN, J. E.; STRAND, M.; LUNDMARK, T. Temperature stress. In: RAGHAVENDRA, A. S. (ed.). **Physiology of trees**, New York: John Wiley. 1991. v. 13, p.301-335.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water culture method of growing plants without soil**. Berkeley: University. Of California, 1950. 32 p.

JIA, Y. et al. Effects of Potassium Deficiency on Chloroplast Ultrastructure and Chlorophyll Fluorescence in Inefficient and Efficient Genotypes of Rice. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, p. 2105–2118, 2008.

JORDAN, D. B.; OGREN, W. L. The CO₂/O₂ specificity of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase: Dependence on ribulose-bisphosphate concentration, pH and temperature. **Planta**, New York, v. 161, p. 308-313, 1984.

KAISER, W. M. Effects of water deficit on photosynthetic capacity. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 71, p. 142-149, 1987.

KHAIRI, M. M.; HALL, A. E. Temperature and humidity effects on net photosynthesis and transpiration of citrus. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 36, p. 29-34, 1976 .

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima Editora, 2000. 531 p.

LANGER, K. et al. The poplar K⁺ channel KPT1 is associated with K⁺ uptake during stomatal opening and bud development. **The Plant Journal**, v. 37, p. 828-833, 2004.

LAWLOR, D. W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: mechanisms are the key to understanding production systems. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, p. 773-787, 2002.

LENZ, T. L.; WRIGHT, L. J.; WESTOBY M. Interrelations among pressure-volume curve traits across species and water availability gradients. **Physiologia Plantarum**, v. 127, p. 423-233, 2006.

LIZANA, C. et al. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 3, p. 685–697, 2006.

LONG, S. P.; BERNACCHI, C. J. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? Procedures and sources of error. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, p. 2393-2401, 2003.

MALAVOLTA, E. Função dos Macros e Micronutrientes. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e Aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MASCARENHAS, H. A. A. et al. **Potássio para a soja**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2004. (Informações Agrônomicas, n. 105)

MASCARENHAS, H. A. A. Deficiência de potássio em soja no Estado de São Paulo: melhor entendimento do problema e possíveis soluções. **O Agrônomo**, Campinas, v. 40, p 34-43, 1988.

MOTA, F. S. Condições climáticas e produção de soja no sul do Brasil. In: VERNETTI, F. J. (ed.). **Soja**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. p. 93-126.

NEIVA, L. C. S. **Influência do potássio sobre a economia de água de quatro cultivares de arroz submetidos a déficit hídrico**. 1997. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N. Efeitos da disponibilidade hídrica no solo sobre a cultura da soja. In: EMBRAPA-CNPSO. **Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil**. Londrina, PR: Embrapa, 1994. v. 15, p. 42-43. (Ata - Documentos 72).

NEPOMUCENO, A. L. et al. Tolerância à seca em plantas. **Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento**, v. 23, p. 12-18, 2001.

NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N. Efeitos da disponibilidade hídrica no solo sobre a cultura da soja. In EMBRAPA-CNPSO. **Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil**. Londrina: Embrapa, 1998. p. 42-43. (Ata - Documentos 72).

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Estresses de ordem ecofisiológica. In: BONATO, E. R. (ed.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2000. 254 p.

NOGUEIRA, S. S. S.; NAGAI, V. Deficiência hídrica simulada nos diferentes nos diferentes estádios de desenvolvimento de uma cultura precoce de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 47, p. 9-14, 1988.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J. et al. (ed.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo, Brasília**. DF: EMBRAPA - SEA, 1991.

OSMOND, C. B.; GRACE, S. C. Perspectives on photoinhibition and photorespiration in the field: quintessential inefficiencies of the light and dark reactions of photosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 46, p. 1351-1362, 1995.

PARRY, M. A. J. et al. Rubisco Activity: Effects of Drought Stress. **Annals of Botany**, v. 89, p. 833-839, 2002.

PEAK, D. et al. Evidence for complex, collective dynamics and emergent, distributed computation in plants. **PNAS**, v. 101, p. 918-922, 2004.

PINHEIRO, C. et al. Initial water deficit effects on *Lupinus albus* photosynthetic performance, carbon metabolism, and hormonal balance: metabolic reorganization prior to early stress responses. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 14, p. 4965–4974, 2011.

PINSTRUP-ANDERSEN, P.; PANDYA-LORCH, R.; ROSEGRANT, M. W. World food prospects: Critical issues for the early twenty-first century. **2020 Vision Food Policy Report**. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C., 1999. 30 p.

PRADO, R. M. Potássio. In: **Nutrição de Plantas**. 1.ed. São Paulo: UNESP, 2008. p. 161-181.

PREMACHANDRA, G.; SANEOKA, H.; OGATA, S. Cell membrane stability and leaf water relations as affected by potassium nutrition of water-stressed maize. **Journal Experimental Botany**, v. 42, p. 739-745, 1991.

RAIJ, B. V. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, Fundação IAC, 1997. 285 p.

SAITO, T.; TERASHIMA, I. Reversible decreases in the bulk elastic modulus of mature leaves of deciduous *Quercus* species subjected to two drought treatments. **Plant, Cell and Environment**, v. 27, p. 863-875, 2004.

SAITO, T. et al. The Bulk Elastic Modulus and the Reversible Properties of Cell Walls in Developing *Quercus* Leaves. **Plant and Cell Physiology**, v. 47, p. 715-725, 2006.

SANGAKKARA, U. R.; FREHNER, M.; NÖSBERGER, J. Effect of Soil Moisture and Potassium Fertilizer on Shoot Water Potential, Photosynthesis and Partitioning of Carbon in Mungbean and Cowpea. **J. Agronomy e Crop Science**, v. 185, p. 201-207, 2000.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SCHREIBER, U.; BILGER, W. Rapid assessment of stress effects on plant leaves by chlorophyll fluorescence measurements. In: TENHUNEN, J.D. et al. **Plant response to stress**. Berlin: Springer Verlag, 1987. v. 15, p. 27-53.

SCHULTE, P. J.; HINCKLEY, T. M. A comparison of pressure-volume curve data analysis techniques. **Journal of Experimental Botany**, v. 36, p. 1590-602, 1985.

SCOTTI CAMPOS, P.; THU PHAM THI, A. Effect of abscisic acid pretreatment on membrane leakage and lipid composition of *Vigna unguiculata* leaf discs subjected to osmotic stress. **Plant Science**, v. 130, p. 11-18, 1997.

SEN GUPTA, A., BERKOWITZ, G. A., PIER, P. A. Maintenance of photosynthesis at low leaf water potential in wheat. **Plant Physiol.**, v. 89, p. 1358–1365, 1989.

SERAFIM, M. E. et al. Influencia da adubação potássica e umidade do solo na produção da soja. In: EMBRAPA-CNPSo. **XXIX Reunião de pesquisa de soja da região central do Brasil**. Londrina: Empraba, 2007. p. 165-167. (Ata – Documento 287).

SHANGGUAN, Z.; MINGAN, S.; DYCKMANS, J. Interaction of osmotic adjustment and photosynthesis in winter wheat under soil drought. **Journal of plant physiology**, v. 154, p. 753-758, 1999.

SHARKEY, T. D. et al. Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C₃ leaves. **Plant, Cell and Environment**, v. 30, p. 1035-1040, 2007.

SILVA, M. A. et al. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 3, p. 193-201, 2007.

SILVA, S.; SOARES, A. M.; OLIVEIRA, L. E. M. Respostas fisiológicas de gramíneas promissoras para revegetação ciliar para reservatórios hidrelétricos, submetidos à deficiência hídrica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 25, n. 1, p. 124-133, 2001.

SOLEIMANZADEH, H. et al. Effect of Potassium Levels on Antioxidant Enzymes and Malondialdehyde Content under Drought Stress in Sunflower (*Helianthus annuus* L.). **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v. 5, n. 1, p. 56-61, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2009. 848 p.

TEXEIRA, L. R. et al. Avaliação de cultivares de soja quanto à tolerância ao estresse hídrico. **Revista Ceres**, v. 55, n. 3, p. 194-202, 2008.

TYREE, M. T.; JARVIS, P. G. Water in tissues and cells. In: LANGE, O. L. et al. **Encyclopedia of plant physiology**, Berlin and New York, v.12, p. 35-77, 1982.

VILELA, E. F.; BÜLL, L. T. Avaliação do crescimento de plantas de milho em função de doses de potássio e estresse hídrico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 281-289, 1999.