

Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos

Tiago Aranda Catuchi⁽¹⁾, Fernando Vieira Costa Guidorizzi⁽¹⁾, Kezia Aparecida Guidorizzi⁽¹⁾, Alexandrius de Moraes Barbosa⁽¹⁾ e Gustavo Maia Souza⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade do Oeste Paulista, Laboratório de Ecofisiologia Vegetal, Rodovia Raposo Tavares, Km 572, CEP 19067-175 Presidente Prudente, SP. E-mail: tiagocatuchi@hotmail.com, fernando_guidorizzi@hotmail.com, kezia_guidorizzi@hotmail.com, alexandriusmb@yahoo.com.br, gustavo@unoeste.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a interferência da adubação potássica em parâmetros fisiológicos de duas cultivares de soja, sob diferentes regimes hídricos. O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação, em Presidente Prudente, SP. Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 2x2x3, com as cultivares BR-16 (tolerante ao estresse hídrico) e Embrapa 48 (suscetível), regimes hídricos com reposição diária de água de 100% (controle) e de 40% da capacidade de campo, e três níveis de suplementação com K (0, 90 e 180 mg dm⁻³). Duas semanas após a imposição da restrição hídrica, foram avaliados: conteúdo relativo de água, potencial fotossintético e rendimento de biomassa. As plantas que se desenvolveram sob restrição hídrica tiveram sua capacidade fotossintética reavaliada após 12 horas de reidratação. Em condições de restrição hídrica, a adubação potássica não interferiu significativamente nos parâmetros fisiológicos e de crescimento avaliados. A suplementação com potássio promoveu melhor eficiência dos parâmetros fisiológicos, no regime sem deficiência hídrica, nas duas cultivares, e as principais variáveis influenciadas pelo nutriente foram: condutância estomática, taxa máxima de carboxilação da Rubisco e assimilação máxima de CO₂. A suplementação com K melhora a recuperação fotossintética das plantas após a reidratação, especialmente na cultivar Embrapa 48.

Termos para indexação: *Glycine max*, biomassa, deficit hídrico, fotossíntese, nutrição.

Physiological responses of soybean cultivars to potassium fertilization under different water regimes

Abstract – The objective of this work was to evaluate the interference of potassium fertilization on the physiological parameters of soybean cultivars under different water regimes. The experiment was carried out in greenhouse at Presidente Prudente, SP, Brazil. The experimental design was a completely randomized block in a 2x2x3 factorial arrangement, with the soybean cultivars BR-16 (tolerant ...) and Embrapa 48 (susceptible...), water regimes with daily replacements of 100% (control) and 40% of the field capacity, and three levels of K supplementation (0, 90, and 180 mg dm⁻³). Relative water content, photosynthetic potential, and biomass yield were evaluated two weeks after the initiation of water restriction. Plants grown under water restriction had their photosynthetic potential reevaluated after 12 h of rehydration. Under water restriction conditions, potassium fertilization did not significantly affect the assessed growth and physiological parameters. Supplementation with potassium promoted a better efficiency of the physiological parameters, in water deficit control, in both cultivars, and the main variables influenced by the nutrient were: stomatal conductance, maximum rate of Rubisco carboxylation, and maximum CO₂ assimilation. Potassium supplementation improves photosynthetic recovery of plants after rehydration, especially in the Embrapa 48 cultivar.

Index terms: *Glycine max*, biomass, water deficit, photosynthesis, nutrition.

Introdução

As atividades agrícolas estão diretamente ligadas a altos riscos de insucesso ocasionado pelas variações climáticas regionais ao longo dos anos, com destaque para o estresse causado pela falta de água durante o ciclo das culturas, considerado uma das principais causas para a não maximização do potencial produtivo das lavouras (Göpfert et al., 1993). A necessidade hídrica para a cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] aumenta com o desenvolvimento da planta e atinge o

máximo durante os estádios de floração e enchimento de grãos (7,0 a 8,0 mm por dia), decrescendo após esse período. A quantidade de água requerida pela cultura, para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 e 800 mm por ciclo (Tecnologias de produção de soja, 2008).

Se o período de seca for prolongado, o deficit hídrico pode afetar a cultura, com redução na altura da planta, na taxa de crescimento relativo, no índice de área foliar e na taxa fotossintética. Dessa forma, um impacto negativo sobre a produção de grãos é esperado,

em virtude da diminuição do metabolismo da planta (Neumaier et al., 2000).

A otimização da fixação de CO₂ em ambientes com restrição hídrica é um dos principais problemas da biologia vegetal (Flexas et al., 2004). Segundo Peak et al. (2004), o estresse hídrico pode causar severa inibição da fotossíntese, em razão da maior resistência difusiva e da conseqüente redução na assimilação do CO₂, o que diminui o crescimento e a produtividade da planta. Esses eventos são decorrentes da redução da turgescência das células-guardas dos estômatos, seguidos pelo fechamento dos poros estomáticos (Pinheiro & Chaves, 2011). O decréscimo da difusão de CO₂ da atmosfera até o sítio de carboxilação é geralmente considerado a principal causa da redução da fotossíntese, em condições de deficiência hídrica leve e moderada (Chaves et al., 2009; Pinheiro & Chaves, 2011). Essa limitação inclui interferências estomáticas e do mesófilo (Flexas et al., 2009). Além disso, parte da inibição das taxas fotossintéticas pode ser atribuída a fatores não estomáticos, como problemas no transporte de elétrons e na fotofosforilação (Flexas et al., 2006). A redução na síntese de ATP – uma resposta inicial à deficiência hídrica – pode diminuir a capacidade de regeneração da ribulose bifosfato (RuBP), o que reduz a fotossíntese potencial (Lawlor & Tezara, 2009; Pinheiro & Chaves, 2011).

O potássio, considerado o segundo elemento mais extraído pela cultura da soja, é encontrado em baixas concentrações nos solos tropicais brasileiros (Malavolta, 2006). De acordo com Prado (2008), mais de 60 enzimas dependem do K para sua atividade normal. Esse elemento também exerce papel-chave na regulação osmótica e promove a manutenção do turgor nas células-guardas, por meio da elevação do seu potencial osmótico, o que resulta em absorção de água por essas células e por adjacentes, e, conseqüentemente, gera maior turgor e abertura dos estômatos (Langer et al., 2004).

Quando cultivadas sob baixa disponibilidade de potássio, a produção de radicais livres pelas plantas pode aumentar, pois a deficiência do nutriente causa distúrbio no mecanismo de abertura e fechamento dos estômatos, o que reduz a fotossíntese e causa sobra de elétrons, os quais são desviados para a produção de formas 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 (Cakmak, 2005). O potássio também é responsável pela translocação de fotoassimilados no floema e mantém a taxa fotossintética da planta, o que evita o desvio de elétrons para a geração de formas reativas de oxigênio (Cakmak, 2005).

Sangakkara et al. (2001), ao avaliar o efeito da umidade e da adubação potássica na fisiologia de duas cultivares de feijão, observaram que o potássio adicionado ao sistema via solução nutritiva promove o aumento da taxa fotossintética e o crescimento vegetativo em condições de estresse hídrico, em ambas cultivares. Rosolem et al. (2003), ao analisar a 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 sob condição de baixa umidade do solo, em função do aumento das doses do nutriente.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a interferência da adubação potássica em parâmetros fisiológicos de duas cultivares de soja, sob diferentes regimes hídricos.

Material e Métodos

O experimento foi realizado entre novembro de 2010 e março de 2011, em condições de casa de vegetação, no Campus II da Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, SP (22°07'3"S, 51°26'0"W). Foram avaliadas as cultivares Embrapa 48 e BR-16, consideradas tolerante e suscetível à restrição hídrica, respectivamente (Texeira et al., 2008).

A parcela experimental foi constituída por vasos de plástico contendo 12 kg de solo, classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (Santos et al., 2006), com as seguintes características granulométricas: 784, 55 e 161 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente. As características químicas do solo após a calagem e a incorporação das doses de potássio, antes da semeadura da soja e após a colheita das plantas, estão descritas na Tabela 1.

Com base na análise química do solo e nas recomendações de Rajj et al. (1997), foram aplicados 1.537 g dm⁻³ de calcário dolomítico (PRNT de 91%) por vaso, tendo-se elevado a saturação por bases para 80%. Em seguida, os vasos foram irrigados até a capacidade de campo e incubados com lona preta por 90 dias. Após esse processo, conforme a análise de solo e a recomendação de Novais et al. (1991), foi realizada adubação fosfatada, com a aplicação de 150 g dm⁻³ de P de solo, na forma de superfosfato simples (18% de

P₂O₅ e Ca), por vaso. A adubação fosfatada foi incorporada ao solo, simultaneamente à incorporação das doses de potássio, cinco dias antes da semeadura.

As plantas de soja foram obtidas a partir da germinação inicial de cinco sementes por vaso, com posterior manutenção de apenas uma planta por vaso, por meio do desbaste realizado no estágio V3 (três trifólios totalmente desenvolvidos). As sementes receberam tratamento com o fungicida comercial Vitavax-Thiram 200 SC. Para promover o aporte de nitrogênio às plantas, as sementes receberam inoculação de bactérias do gênero *Bradyrhizobium* (Rosolem et al., 2003), com uso do produto comercial Nitro Super F45 Premium. Para o fornecimento de micronutrientes, foi aplicada, via água de irrigação, 100 mL por dia de solução nutritiva de Hoagland, a partir do estágio V2 (dois trifólios totalmente desenvolvidos) até o estágio R1 (início do florescimento).

Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 2x2x3, com dez repetições por tratamento, tendo-se considerado cada vaso como uma repetição. As variáveis do experimento foram as duas cultivares de soja; três níveis de adubação potássica (0, 90 e 180 mg dm⁻³) (Rosolem et al., 2003); e dois regimes de irrigação, com reposição diária de água 100% (controle) e 40% da capacidade de campo. A fonte utilizada do fertilizante foi o citrato de potássio (42% de K₂O).

A deficiência hídrica foi estabelecida durante um período de 25 dias, entre os estádios de desenvolvimento R1 (início do florescimento) e R5 (início do enchimento das sementes), com controle da irrigação realizado pelo método gravimétrico (Catuchi et al., 2011). Além do controle da reposição da irrigação, os níveis de umidade do solo foram monitorados por sensor de umidade e temperatura do solo, modelo EC-5 (Decagon Devices,

Inc., Pullman, WA, EUA), acoplado a um leitor digital, modelo ECH₂O Check.

Os tratamentos foram avaliados por intermédio do potencial de água foliar, do conteúdo relativo de água e do potencial fotossintético. Quando as plantas atingiram o estágio fenológico R3 (início da formação de vagens), foram coletadas amostras de trifólios para análise química. No final do ciclo da cultura, quantificou-se o rendimento de acúmulo de biomassa.

As medições do potencial de água foliar foram realizadas com câmara de pressão, modelo 1000 (PMS Instruments, Albany, OR, EUA), entre as 10 e 15 h, para estimar os diferentes estados hídricos nas plantas com 100 e 40% de reposição de água.

Em cada tratamento, foi avaliado o conteúdo relativo de água (CRA) com base no modelo $CRA = (Mf - Ms) / (Msat - Ms) \times 100$ (%), em que: Mf corresponde à massa fresca da amostra pesada imediatamente após a coleta; Msat, à massa da folha sob saturação de água após imersão durante 12 horas; e Ms, à massa seca obtida após a secagem das amostras, em estufa a 60°C até obtenção de massa constante (Larcher, 2000).

O potencial fotossintético foi avaliado por meio de curvas de resposta ao CO₂ (curvas A/Ci). Essas curvas foram determinadas no período entre às 10 e 15 h, em folhas totalmente expandidas, tendo-se variado de 0 a 1.800 μmol mol⁻¹ de CO₂ (Long & Bernacchi, 2003) a concentração de CO₂ dentro da câmara de amostragem do analisador de gases por infravermelho Irga, Ciras-2 (PPSystem, Hitchin, Reino Unido). As medidas foram realizadas sob irradiância saturante de 1.200 μmol m⁻² s⁻¹ de fótons. Após as avaliações, as curvas foram ajustadas conforme modelo proposto por Sharkey et al. (2007), tendo-se calculado a taxa máxima de carboxilação da Rubisco (V_{c,max}), a taxa de transporte fotossintético de elétrons (J) e o uso de triose fosfato (TPU).

Tabela 1. Resultados da análise química do solo após calagem, adubação básica e aplicação das duas doses de potássio, antes da semeadura (inicial) e após a colheita (final) das plantas⁽¹⁾.

Amostra		pH em	MO	P (resina)	H+Al	K+	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	CTC	V
		CaCl ₂	(g dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	-----	(mmol _c dm ⁻³)	-----	-----	-----	-----	(%)
Inicial	T	6,3	5	96	12	0,85	26	12,0	38	50	76
	K ₁	6,6	5	84	10	3,05	26	11,5	40	50	80
	K ₂	7,1	5	89	9	4,90	26	11,2	43	52	82
Final	T	7,0	5	114	11	0,40	35	8,56	49	60	81
	K ₂	7,2	4	111	10	1,82	44	7,97	56	64	84
	K ₃	7,1	5	110	9,6	3,97	41	7,57	48	62	84

⁽¹⁾T, solo original; K₁, 90 mg dm⁻³ de K; K₂, 180 mg dm⁻³ de K.

Por meio de ajustes da curva A/C_i , com uso do programa Origin 6.0, foi extraído o valor de assimilação máxima de CO_2 ($A_{\text{máx}}$, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de CO_2).

No ponto da curva em que a concentração de CO_2 na câmara de amostragem foi similar à 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 (gs, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de H_2O), concentração intercelular de CO_2 (C_i , mg L^{-1}) e transpiração (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de H_2O). A partir dessas variáveis, foi calculada a eficiência intrínseca do uso da água, A/g_s (EIUA, $\mu\text{mol mol}^{-1}$).

Após 12 horas de reidratação, as plantas que se desenvolveram sob restrição hídrica tiveram sua capacidade fotossintética reavaliada, tendo-se considerado somente a assimilação líquida de CO_2 (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de CO_2), no ponto de concentração atmosférica de CO_2 ($370 \pm 10 \mu\text{mol mol}^{-1}$) e sob luz saturante de $1.200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fótons.

O teor de K no tecido foliar foi quantificado por análise química, tendo-se coletado trifólios totalmente expandidos, em quatro repetições de cada tratamento, no estágio de desenvolvimento R3. Após a coleta, o material vegetal foi seco em estufa a 65°C até obtenção de massa constante. Em seguida, procedeu-se à análise química, conforme Malavolta et al. (1997).

No final do experimento, quantificou-se a área foliar por planta (AF), analisada por medidor portátil de área foliar modelo LI-3000A (Li-Cor, Lincoln, NE, EUA). Após a secagem das partes das plantas em estufa a 65°C até a obtenção de massa constante, avaliou-se o rendimento agrícola, tendo-se considerado: 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), relação entre massa seca da parte aérea e massa seca da raiz (MS_{PA}/MS_R), e razão da área foliar (RAF) (Benincasa, 2003).

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, com uso do programa Sisvar (Ferreira, 2008).

Resultados e Discussão

Com base na análise química do solo (Tabela 1), os teores de potássio estão coerentes com as doses de citrato de potássio aplicadas, ou seja, estão 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 (Tecnologias de produção de soja, 2008). Verificou-se que, no final do experimento, os teores de potássio no solo diminuíram em 53, 41 e 19%, para as doses de 0, 90 e 180 mg dm^{-3} de solo, respectivamente, em relação ao teor obtido no início do experimento.

Ambas as cultivares avaliadas, nas diferentes condições hídricas, responderam à adubação potássica com aumento dos teores foliares de K (Tabela 2). Porém, esse teor ficou abaixo do considerado suficiente para o máximo desenvolvimento da cultura da soja, que é de 17 a 25 g kg^{-1} (Tecnologias de produção de soja, 2008).

O potencial de água das plantas sob a condição hídrica controle foi de $-0,78 \text{ MPa}$, enquanto o das plantas em condição de deficiência hídrica foi de aproximadamente $-1,7 \text{ MPa}$. A umidade do solo, monitorada diariamente após o início da restrição hídrica, ficou em torno de 25 e 10%, para os tratamentos controle e de restrição hídrica, respectivamente.

O CRA foi significativamente maior nas plantas sob condição hídrica controle, em comparação às plantas sob restrição hídrica, em ambas as cultivares, sem suplementação potássica (Tabela 2). Na cultivar BR-16, houve aumento do CRA com aplicação de potássio (180 mg dm^{-3}), na condição hídrica controle. Entretanto, esse efeito não foi observado nas plantas desenvolvidas sob restrição hídrica. Já na cultivar Embrapa 48, os valores de CRA nas plantas sob restrição

Tabela 2. Teor médio de potássio no tecido foliar e valores médios de conteúdo relativo de água, com três doses de K, em duas cultivares de soja e com 100 e 40% de reposição de água⁽¹⁾.

K (mg dm^{-3})	BR-16		Embrapa 48	
	100%	40%	100%	40%
	Potássio (g kg^{-1})			
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
	Conteúdo relativo de água (%)			
0	80,6Ab	75,6Ba	83,5Aa	76,5Ba
90	83,9Aab	75,4Ba	81,7Aa	80,5Aa
180	84,9Aa	77,9Ba	83,2Aa	78,0Aa

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas entre os níveis de reposição hídrica dentro de cada cultivar e minúsculas entre as doses de potássio dentro de cada nível de reposição hídrica, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

foram similares aos das plantas com 100% de reposição hídrica.

Os resultados de $A_{\text{máx}}$, gs, Ci, $V_{\text{c máx}}$, J, E e TPU foram reduzidos nas duas cultivares, quando em condição hídrica limitante; no entanto, foi observado aumento na EIUA (Tabela 3). As variáveis $A_{\text{máx}}$, gs, $V_{\text{c máx}}$, E e J aumentaram em razão da suplementação potássica, nas duas cultivares, em condição hídrica controle. Com exceção da TPU, que diminuiu com a dose de 180 mg dm⁻³ de K na cultivar BR-16, nenhum parâmetro relacionado à fotossíntese foi influenciado pela adubação potássica em condição de restrição hídrica. O Ci e a EIUA não foram influenciados pela adubação potássica em nenhuma cultivar, em ambas as condições hídricas.

As respostas observadas da deficiência hídrica sobre os parâmetros fotossintéticos correspondem aos efeitos frequentemente reportados na literatura, em virtude da limitação hídrica verificada pelos valores de potencial de água na folha (Chaves et al., 2009; Pinheiro & Chaves, 2011). Ao se considerar que os valores de Ci não foram reduzidos de maneira significativa (Tabela 3), o decréscimo da fotossíntese potencial em ambas as cultivares pode ter sido causado por fatores

bioquímicos, como a redução da taxa máxima de carboxilação da Rubisco e o uso das trioses fosfato. Segundo Parry et al. (2002), a redução na fotossíntese, em condição de restrição hídrica, pode estar condicionada pela limitação na atividade da Rubisco, em razão de fatores de inibição ligados às enzimas. Lawlor (2002) relatou que reduções na fotossíntese também podem estar relacionadas à limitação da síntese de RuBP, por meio da redução da taxa de transporte de elétrons fotossintéticos, a qual influencia a capacidade de regeneração da RuBP, dependente do ATP.

Adicionalmente, a redução da transpiração sob restrição hídrica (Tabela 3) pode ter contribuído para a redução da $A_{\text{máx}}$ nas plantas, uma vez que, quando a transpiração foliar é reduzida, a capacidade de dissipação de calor latente diminui, o que aumenta a temperatura da folha e reduz a atividade da $V_{\text{c máx}}$, com consequente diminuição da assimilação de CO₂ pelas plantas (Hällgren et al., 1991).

De modo geral, não houve efeito direto da suplementação potássica na manutenção das trocas gasosas e no potencial fotossintético das plantas cultivadas sob deficiência hídrica. No entanto, na condição hídrica controle, a resposta positiva da $A_{\text{máx}}$ à

Tabela 3. Valores médios de atributos fisiológicos e físicos, com três doses de K (0, 90 e 180 mg dm⁻³) e com 100 e 40% de reposição de água, nas cultivares de soja BR-16 e Embrapa 48⁽¹⁾.

Atributo	BR-16						Embrapa 48					
	100%			40%			100%			40%		
	0	90	180	0	90	180	0	90	180	0	90	180
Atributos fisiológicos												
$A_{\text{máx}}$ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de CO ₂)	31,9Ab	38,7Aa	40,4Aa	18,5Ba	20,4Ba	17,9Ba	32,5Ab	37,9Aa	38,1Aa	17,3Ba	17,1Ba	18,2Ba
gs ($\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de H ₂ O)	23,3Ab	424,5Aa	34,8Aab	80,3Ba	102,7Ba	98,1Ba	280,2Ab	393,4Aa	348,7Aab	92,2Ba	89,1Ba	89,1Ba
Ci (mg L ⁻¹)	234,1Aa	246,3Aa	239,0Aa	209,1Ba	210,1Ba	204,2Ba	234,5Aa	247,2Aa	250,0Aa	206,1Ba	196,8Ba	184,4Ba
$V_{\text{c máx}}$ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de CO ₂)	174,2Ab	196,2Aab	224,0Aa	110,4Ba	124,7Ba	93,3Ba	166,2Ab	218,1Aa	212,1Aa	117,0Ba	105,1Ba	124,2Ba
J ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de CO ₂)	168,1Ab	187,1Aab	197,0Aa	105,2Ba	120,4Ba	92,3Ba	157,5Ab	194,5Aa	173,3Aab	94,4Ba	96,3Ba	111,7Ba
TPU ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de CO ₂)	13,1Aa	13,4Aa	14,6Aa	8,3Bab	8,9Ba	6,9Bb	12,0Aa	14,0Aa	13,7Aa	7,7Ba	7,4Ba	8,0Ba
E ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de H ₂ O)	3,9Ab	5,4Aa	5,10Aa	1,6Ba	2,0Ba	1,9Ba	4,2Ab	5,5Aa	5,0Aa	1,9Ba	1,7Ba	1,7Ba
EIUA ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	0,06Ba	0,05Ba	0,05Ba	0,08Aa	0,08Aa	0,08Aa	0,06Ba	0,05Ba	0,05Ba	0,08Aa	0,09Aa	0,10Aa
Atributos físicos												
MG (g)	21,4Ab	26,3Aa	26,9Aa	13,0Ba	13,9Ba	13,1Ba	21,0Ab	23,9Aa	22,1Aab	11,5Ba	11,4Ba	10,5Ba
MSPA (g)	47,7Ab	57,1Aa	59,2Aa	27,4Ba	29,1Ba	27,0Ba	48,7Aa	51,8Aa	47,6Aa	24,4Ba	25,2Ba	23,2Ba
MSR (g)	6,3Ab	8,3Aa	8,6Aa	5,0Aa	5,1Ba	5,5Ba	4,9Aa	5,6Aa	5,6Aa	3,9Aa	4,6Aa	4,1Ba
MST (g)	54,1Ab	65,4Aa	67,9Aa	32,4Ba	34,3Ba	32,5Ba	53,6Aa	57,4Aa	53,2Aa	28,4Ba	29,8Ba	27,3Ba
AF (cm ²)	1.468,2Aa	1.637,7Aa	1.542,6Aa	897,8Ba	756,7Ba	735,3Ba	1.564,8Aa	1.356,1Aab	1.258,1Ab	649,3Ba	724,3Ba	781,5Ba
RAF (cm ²)	27,1Aa	25,5Aab	22,9Ab	25,5Aa	23,5Aa	22,9Aa	28,9Aa	23,5Aab	24,0Ab	23,6Aa	24,2Aa	29,7Aa
MSPA/MSR (g)	8,7Aa	8,4Aa	7,9Aa	5,9Ba	5,5Ba	5,5Ba	11,1Aa	9,9Aa	9,4Aa	6,6Ba	5,8Ba	5,9Ba

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas entre os níveis de reposição hídrica dentro de cada cultivar e minúsculas entre as doses de potássio dentro de cada nível de reposição hídrica, para cada cultivar, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. $A_{\text{máx}}$, assimilação máxima de CO₂; gs, condutância estomática; Ci, concentração intercelular de CO₂; $V_{\text{c máx}}$, taxa máxima de carboxilação da Rubisco; J, taxa de transporte fotossintético de elétrons; TPU, uso de triose fosfato; E, transpiração; EIUA, eficiência intrínseca do uso da água, A/g; MG, massa de grãos por planta; MSPA, massa seca da parte aérea por planta; MSR, massa seca da raiz por planta; MST, massa seca total por planta; AF, área foliar por planta; RAF, razão da área foliar por planta, AF/MST; e MSPA/MSR, relação entre massa seca da parte aérea e massa seca da raiz.

adubação potássica, em ambas as cultivares (Tabela 3), pode estar condicionada pela somatória de fatores como condutância estomática, taxa de transporte fotossintético de elétrons e taxa máxima de carboxilação da Rubisco, que aumentaram com a adubação potássica. De acordo com Cakmak (2005), o K pode conferir uma dinâmica adequada da condutância estomática às plantas, além de ser um elemento extremamente importante na ativação da função carboxilase da Rubisco, o que contribui para uma maior atividade fotossintética (Prado, 2008). Esses resultados corroboram os de Jia et al. (2008), que observaram que a taxa fotossintética de plantas de arroz aumentou com o fornecimento adequado de K, em comparação às plantas sob deficiência do nutriente, o que foi atribuído ao aumento da atividade de carboxilação da Rubisco.

O aumento da EIUA, em condição hídrica limitante, nas duas cultivares (Tabela 3), independentemente da suplementação com K, indica a capacidade da planta em regular trocas gasosas, ao reduzir proporcionalmente mais a condutância estomática e, conseqüentemente, a transpiração do que a assimilação de CO_2 , o que gera economia de água por cada molécula de CO_2 assimilada, uma vez que a redução parcial da condutância estomática limita proporcionalmente mais a transpiração do que a entrada de CO_2 na folha (Chaves & Oliveira, 2004).

Os valores de assimilação líquida de CO_2 (A) das plantas reavaliadas 12 horas após a reidratação foram comparados aos das plantas em condições de deficiência hídrica (Figura 1). Em geral, os valores de A de ambas as cultivares diminuíram 50% sob deficiência hídrica, independentemente das doses de K aplicadas. Após a reidratação, a cultivar BR-16 apresentou valores de A 27% maiores nas plantas sem adição de K e 42% maiores nas plantas suplementadas com 90 mg dm^{-3} de K, em comparação aos valores das plantas sob deficiência hídrica. Entretanto, a maior dose de K não permitiu a recuperação de A após a reidratação. Já a cultivar Embrapa 48, respondeu positivamente às duas suplementações de K, na recuperação de A. Contudo, nas plantas sem adição de K, não houve recuperação de A, enquanto as plantas que receberam as doses de 90 e 180 mg dm^{-3} de K apresentaram valores de A de 57 e 38%, respectivamente, superiores aos das plantas sob deficiência hídrica. Essas respostas são indicativas de que a adubação potássica pode promover aumento da fotossíntese das plantas após sua reidratação. Segundo Flexas et al. (2004), a intensidade e a duração da

restrição hídrica são fatores determinantes que definem a velocidade e a proporção de recuperação da planta após a reidratação. Geralmente, plantas submetidas ao estresse hídrico severo apresentam recuperação de apenas 40–60% da taxa fotossintética máxima no dia seguinte. No presente trabalho, 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 à influência deste nutriente na reparação de danos oxidativos das células, em condições de estresse hídrico (Soleimanzadeh et al., 2010). Essa maior retomada das taxas fotossintéticas das plantas suplementadas com K, após a reidratação, poderia oferecer uma maior recuperação do crescimento das plantas, o que minimizaria as perdas de produtividade.

Quanto à biomassa (Tabela 3), foi possível observar que, na cultivar BR-16, as variáveis M_G , MS_{PA} , MS_R e MS_T aumentaram em função da adubação potássica, em condição hídrica controle. Nestas mesmas condições, a RAF foi reduzida com a dose de 180 mg dm^{-3} de K; porém, a área foliar e a relação MS_{PA}/MS_R não foram

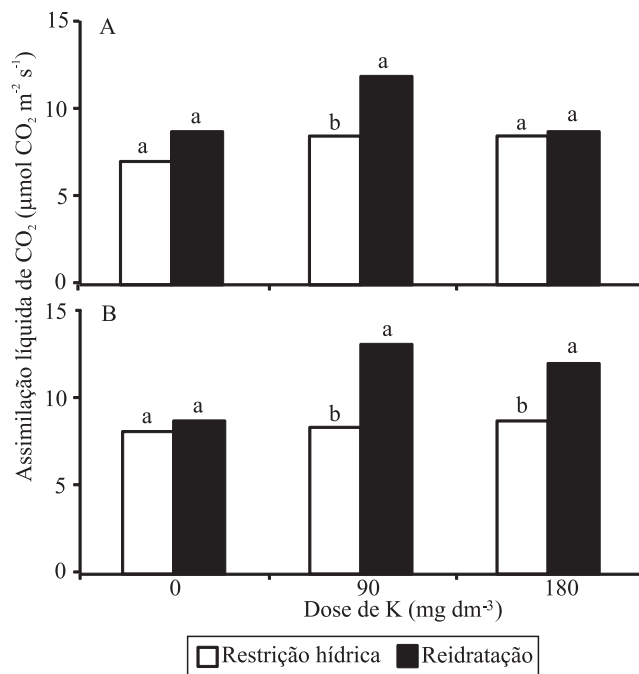


Figura 1. Valores médios de assimilação líquida de CO_2 em plantas que se desenvolveram sob restrição hídrica (40%), e 12 horas após sua reidratação. Médias seguidas de letras iguais, acima da barra, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, entre os níveis hídricos dentro de cada dose de potássio, nas cultivares BR-16 (A) e Embrapa 48 (B).

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} , enquanto a área foliar e a RAF diminuíram com a dose de 180 mg dm^{-3} . 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 restrição hídrica. Semelhantemente aos dados de atividade fotossintética das plantas, os resultados de biomassa, no geral, foram reduzidos pela deficiência hídrica, em ambas as cultivares, independentemente da suplementação potássica (Tabela 3). Isso ocorreu em função da queda na atividade fotossintética das plantas causada pelo déficit hídrico, o que resultou em decréscimo no acúmulo de carboidratos (Neumaier et al., 2000).

No entanto, os efeitos do K suplementar sobre o crescimento das plantas mantidas sem restrição hídrica foram significativos e proporcionais aos aumentos dos teores de K observados (Tabela 2). Por exemplo, a MS_T aumentou na cultivar BR-16 em razão da adubação potássica. Essa resposta pode ser atribuída ao fato de o K ter promovido, por meio do ajuste osmótico, maior taxa fotossintética e expansão celular nas plantas, com o aumento do turgor celular (Prado, 2008), o que, conseqüentemente, aumentou o crescimento e o acúmulo de biomassa total. Com relação à maior produção de grãos em função da adubação com K, nas duas cultivares, em condições hídricas controle, além da maior taxa fotossintética, o nutriente pode ter promovido a maior translocação de fotoassimilados para o enchimento dos grãos (Cakmak, 2005; Malavolta, 2006).

Houve redução da RAF em função da adubação potássica, sob condição hídrica controle, nas duas cultivares (Tabela 3). Isso 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, pois necessitaram de menor área foliar para produzir um grama de massa seca total por planta.

Em condições de restrição hídrica, independentemente da adubação potássica, ambas as cultivares tiveram a relação MS_{PA}/MS_R reduzida em comparação às plantas em condição hídrica controle. Isso ocorre porque o déficit hídrico promove a expansão do sistema radicular para zonas mais profundas e úmidas do perfil do solo.

Esse processo inicia-se gradativamente, após a secagem da superfície do solo (Santos & Carlesso, 1998).

A ausência de resposta das plantas à adubação potássica em condições de restrição hídrica pode ser explicada, em geral, pela possibilidade de aclimatação das plantas à condição adversa, em razão da duração da restrição hídrica. Segundo Flexas et al. (2006) e Lizana et al. (2006), quando o estresse hídrico é imposto gradualmente, durante semanas, a planta pode aclimatar-se a este fator limitante, ao envolver genes de expressão e modificações fisiológicas e morfológicas, o que leva à compensação homeostática para os primeiros efeitos negativos do estresse hídrico. Pinheiro et al. (2011) relataram que alterações metabólicas na planta ocorrem antes das alterações do estado hídrico. Em estudo realizado em trigo, Sen Gupta et al. (1989) demonstraram que, apesar de ter ocorrido resposta positiva da adubação potássica em condição de estresse hídrico em plantas expostas a dois ciclos de restrição hídrica, a interferência deste nutriente na fotossíntese foi muito menos pronunciada neste caso do que quando as plantas foram sujeitas a um único e curto ciclo de restrição hídrica.

Conclusões

1. Em condições de restrição hídrica, a adubação potássica não interfere significativamente nos parâmetros fisiológicos e de crescimento da soja.
2. A suplementação com potássio promove maior eficiência dos parâmetros fisiológicos, em condição de ausência de restrição hídrica.
3. A suplementação com K melhora a recuperação fotossintética das plantas após a reidratação, especialmente na cultivar Embrapa 48, suscetível ao estresse hídrico.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão de bolsa; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro.

Referências

BENINCASA, M.M.P. *Análise de crescimento de plantas*. Jaboticabal: Funep, 2003. 41p.

- CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.168, p.521-530, 2005.
- CATUCHI, T.A.; VÍTOLO, H.F.; BERTOLLI, S.C.; SOUZA, G.M. Tolerance to water deficiency between two soybean cultivars: transgenic versus conventional. **Ciência Rural**, v.31, p.373-378, 2011.
- CHAVES, M.M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v.103, p.551-560, 2009.
- CHAVES, M.M.; OLIVEIRA, M.M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. **Journal of Experimental Botany**, v.55, p.2365-2384, 2004.
- FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, v.6, p.36-41, 2008.
- FLEXAS, J.; BARÓN, M.; BOTA, J.; DUCRUET, J.-M.; GALLÉ, A.; GALMÉS, J.; JIMÉNEZ, M.; POU, A.; RIBAS-CARBÓ, M.; SAJNANI, C.; TOMÁS, M.; MEDRANO, H. Photosynthesis limitations during water stress acclimation and recovery in the drought-adapted *Vitis* hybrid Richter-110 (*V. berlandieri* x *V. rupestris*). **Journal of Plant Physiology**, v.177, p.343-352, 2006.
- FLEXAS, J.; BOTA, J.; LORETO, F.; CORNIC, G.; SHARKEY, T.D. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. **Plant Biology**, v.6, p.269-279, 2004.
- GÖPFERT, H.; ROSSETTI, L.A.; SOUZA, J. **Eventos generalizados e segurança agrícola**. Brasília: IPEA, 1993. 78p.
- HÄLLGREN, J.E.; STRAND, M.; LUNDMARK, T. Temperature stress. In: RAGHAVENDRA, A.S. (Ed.). **Physiology of trees**. New York: John Wiley, 1991. p.301-335.
- JIA, Y.; YANG, X.; ISLAM, E.; FENG, Y. 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.
- LANGER, K.; LEVCHENKO, V.; FROMM, J.; GEIGER, D.; STEINMEYER, R.; LAUTNER, S.; ACHE, P.; HEDRICH, R. The poplar K⁺ channel KPT1 is associated with K⁺ uptake during stomatal opening and bud development. **The Plant Journal**, v.37, p.828-838, 2004.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. 531p.
- 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.
- LAWLOR, D.W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. **Annals of Botany**, v.103, p.561-579, 2009.
- LIZANA, C.; WENTWORTH, M.; MARTINEZ, J.P.; VILLEGAS, D.; MENESES, R.; MURCHIE, E.H.; PASTENES, C.; LERCARI, B.; VERNIERI, P.; HORTON, P.; PINTO, M. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. **Journal of Experimental Botany**, v.57, 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. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 631p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J.R.B.; OYA, T. Estresses de ordem ecofisiológica. In: BONATO, E.R. (Ed.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 254p.
- NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A.J.; GARRIDO, W.E.; ARAÚJO, J.D.; LOURENÇO, S. (Ed.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: Embrapa-SEA, 1991. P.189-253. (Embrapa-SEA. Documentos, 3).
- PARRY, M.A.J.; ANDRALOJC, P.J.; KHAN, S.; LEA, P.J.; KEYS, A.J. Rubisco activity: effects of drought stress. **Annals of Botany**, v.89, p.833-839, 2002.
- PEAK, D.; WEST, J.D.; MESSINGER, S.M.; MOTT, K.A. Evidence for complex, collective dynamics and emergent, distributed computation in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.101, p.918-922, 2004.
- PINHEIRO, C.; ANTÓNIO, C.; ORTUÑO, M.F.; DOBREV, P.I.; HARTUNG, W.; THOMAS-OATES, J.; RICARDO, C.P.; VANKOVÁ, R.; CHAVES, M.M.; WILSON, J.C. 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, p.4965-4974, 2011.
- PINHEIRO, C.; CHAVES, M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? **Journal of Experimental Botany**, v.62, p.869-882, 2011.
- PRADO, R. de M. Potássio. In: PRADO, R. de M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: UNESP, 2008. p.161-181.
- RAIJ, B. van; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC, 1997. 285p.
- ROSOLEM, C.A.; MATEUS, G.P.; GODOY, L.J.G.; FELTRAN, J.C.; BRANCALÃO S.R. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.875-884, 2003.
- SANGAKKARA, U.R.; FREHNER, M.; NÖSBERGER, J. Influence of soil moisture and fertilizer potassium on the vegetative growth of mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) and cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.186, p.73-81, 2001.

- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, p.287-294, 1998.
- SEN GUPTA, A.; BERKOWITZ, G.A.; PIER, P.A. Maintenance of photosynthesis at low leaf water potential in wheat: role of potassium status and irrigation history. **Plant Physiology**, v.89, p.1358-1365, 1989.
- SHARKEY, T.D.; BERNACCHI, C.J.; FARQUHAR, G.D.; SINGSAAS, E. Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C₃ leaves. **Plant, Cell and Environment**, v.30, p.1035-1040, 2007.
- SOLEIMANZADEH, H.; HABIBI, D.; ARDAKANI, M.R.; PAKNEJAD, F.; REJALI, F. 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, p.56-61, 2010.
- TECNOLOGIAS de produção de soja - região central do Brasil 2009 e 2010. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 262p. (Embrapa Soja. Sistemas de produção, 13).
- TEXEIRA, L.R.; BRACCINI, A. de L. e; SPERANDIO, D.; SCAPIM, C.A.; SCHUSTER, I.; VIGANÓ, J.; JAREMTCHUK, C.C. Avaliação de cultivares de soja quanto à tolerância ao estresse hídrico. **Revista Ceres**, v.55, p.194-202, 2008.

Recebido em 5 de dezembro de 2011 e aprovado em 27 de fevereiro de 2012