

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE AGRONOMIA, MEDICINA VETERINÁRIA E
ZOOTECNIA
Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical

AVALIAÇÃO FISIOLÓGICA DA PRODUÇÃO DE SOJA ROUNDUP
READY COM APLICAÇÃO DO HERBICIDA GLYPHOSATE EM
CAMPO

MARIO ZORTÉA ANTUNES JUNIOR

CUIABÁ – MT
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE AGRONOMIA, MEDICINA VETERINÁRIA E
ZOOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical

AVALIAÇÃO FISIOLÓGICA DA PRODUÇÃO DE SOJA ROUNDUP
READY COM APLICAÇÃO DO HERBICIDA GLYPHOSATE EM
CAMPO

MARIO ZORTÉA ANTUNES JUNIOR

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. FRANCISCO DE ALMEIDA LOBO

Co-Orientadora: Prof. Dra. CARMEN EUGENIA RODRÍGUEZ ORTÍZ

Tese apresentada à Faculdade de
Agronomia, Medicina Veterinária e
Zootecnia da Universidade Federal de
Mato Grosso, para obtenção do título de
Doutor em Agricultura Tropical.

CUIABÁ – MT

2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)
Elaborada por Igor Yure Ramos Matos CRB1-2819**

A642a Antunes Junior, Mario Zortéa.

Avaliação fisiológica da produção de soja Roundup Ready com aplicação de herbicida Glyphosate em campo / Mario Zortéa Antunes Junior. - 2014.

148 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Almeida Lobo ; Coorientadora: Prof. Dra. Carmen Eugenia Rodríguez Ortíz.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia, Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, 2014.

Inclui Bibliografia.

Inclui lista de figuras, tabelas e símbolos.

1. Soja - Produção. 2. Soja Roundup Ready. 3. Herbicida. I. Título. II. Antunes Junior, Mario Zortea.

CDU: 633.34:632.954

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE AGRONOMIA, MEDICINA VETERINÁRIA E
ZOOTECNIA

Programa de Pós-graduação em Agricultura Tropical

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: AVALIAÇÃO FISIOLÓGICA DA PRODUÇÃO DE SOJA ROUNDUP READY
COM APLICAÇÃO DO HERBICIDA GLYPHOSATE EM CAMPO

Autor: MARIO ZORTÉA ANTUNES JUNIOR

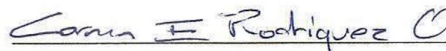
Orientador: Dr. FRANCISCO DE ALMEIDA LOBO

Aprovada em 14 de fevereiro de 2014.


Comissão Examinadora:



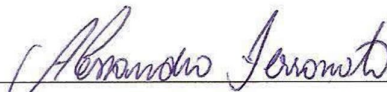
Prof. Francisco de Almeida Lobo
(FAMEV/UFMT) (Orientador)



Prof.^a Carmen E. Rodríguez Ortíz
(IB/UFMT) (Co-orientadora)



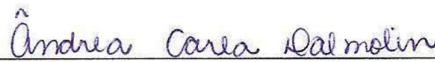
Prof. Alan Carlos Costa
(IFGoiano/CAMPUS RIO VERDE)



Prof. Alessandro Ferronato
(IFMT/CAMPUS JUÍNA)



Prof. Anderson L. Cavenaghi
(UNIVAG)



Prof.^a Ândrea Carla Dalmolin
(UNIVAG)

DEDICATÓRIA

A Deus, pelo dom da vida. A Lilian, pelo amor e dedicação. Aos meus pais Mario e Eliane, pelo exemplo de vida. Aos meus irmãos Fabrícia e André por todo apoio nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço primeiramente a Deus, Soberano Criador dos Céus e da Terra, pela obra redentora na minha vida e pela oportunidade de realização desse Doutorado;
- À minha esposa e companheira Lilian, pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos;
- Aos meus pais Mario e Eliane, pelo exemplo de vida e pelo amor que sempre me dedicaram;
- Aos meus irmãos Fabrícia e André, pelo apoio e companheirismo, e a meus familiares, pelo incentivo;
- Ao prof. Dr. Francisco de Almeida Lobo, pela amizade, orientação, dedicação, paciência, ensinamentos transmitidos e, acima de tudo, pelo exemplo como ser humano, cidadão, professor e pesquisador;
- À profa. Dra. Carmen H. Rodriguez Ortíz, pelo apoio nas pesquisas e incentivo em trabalhar com a cultura da soja;
- Aos professores membros da banca examinadora, pelas correções, sugestões e comentários pertinentes que muito contribuíram para melhorar a qualidade deste trabalho;
- Aos meus colegas de Pós-Graduação do Grupo de Ecofisiologia Vegetal, Ândrea, Higo e Renan, pela força, apoio e colaboração nas pesquisas. Sem vocês este trabalho teria sido impossível;
- A Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e ao Programa de Pós-graduação em Agricultura Tropical (PPGAT) pela oportunidade desse Doutorado;

- Ao UNIVAG – Centro Universitário de Várzea Grande, nas pessoas dos professores Dr. Alessandro Ferronato e Dr. Anderson L. Cavenaghi, que na época da realização do experimento, permitiram a utilização da infraestrutura disponível no campo experimental da instituição, além do apoio científico no trabalho;
- Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical pelos ensinamentos, aos demais colegas e funcionários pelo apoio e parceria;
- Aos alunos de graduação do curso de Agronomia do UNIVAG Rafael Marin e Bernabé Teixeira, por me ajudarem na execução dos trabalhos de campo e de laboratório;
- Aos funcionários do campo experimental do UNIVAG “seu” Amado, “seu” Luís e “seu” Miguel pelo apoio nos serviços no campo;
- À Capes, pela bolsa de pós-graduação;
- À Fapemat, pelos recursos disponibilizados para financiamento de projeto, pelo Edital de Governo/FAPEMAT – nº 007/2005, para a construção dos lisímetros e demais estruturas que também foram utilizados neste trabalho;
- E a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

AValiação fisiológica da produção de soja Roundup Ready com aplicação do herbicida glyphosate em campo

RESUMO – Na safra de 2013/14, a área de soja transgênica resistente ao glyphosate (soja RR) chegou a mais de 85% do total de soja produzida no Brasil. Porém, pouco se sabe a respeito do desempenho fisiológico desse material em condições de campo, passível de estresse hídrico provocado por veranicos, o que é bem comum durante o ciclo de desenvolvimento da cultura. Dessa forma, o conhecimento das relações entre deficiência hídrica e efeito do glyphosate na fisiologia de plantas de soja RR assume particular importância. Portanto, esse trabalho teve como objetivo avaliar a fisiologia da produção de soja transgênica resistente ao glyphosate, sob restrição hídrica, em condições de campo. Para isso, a cultivar de soja TMG 115 RR foi semeada no Campo Experimental do UNIVAG – Centro Universitário, em Várzea Grande-MT, em blocos casualizados, com três repetições e em esquema fatorial (2x2), sendo o método de controle de plantas daninhas (C), com aplicação de glyphosate ou realização da capina manual, e o regime hídrico (W), com ou sem a interrupção da irrigação, totalizando quatro tratamentos. Foram avaliados a matéria seca total, o índice de área foliar, o rendimento final de grãos, o potencial hídrico foliar, o intercâmbio gasoso, o número e peso de nódulos, a área foliar específica, o teor de pigmentos fotossintéticos, a concentração foliar de macro e micronutrientes e a capacidade fotossintética. Foram observados incrementos nas variáveis do intercâmbio gasoso e nos parâmetros fotossintéticos das curvas A/C_c e $A/DFFA$, em condições de não restrição de água no solo e aplicação de glyphosate, sem, no entanto, alterar o índice de área foliar e a área foliar específica da cultura. Porém, esses incrementos não foram suficientes para aumentar a produtividade final de grãos e provocar alterações significativas no potencial hídrico foliar. Houve efeito estomático provocado pelo glyphosate, observado pelo aumento na condutância estomática, na relação entre a concentração interna e ambiente de CO_2 , nos parâmetros fotossintéticos das curvas A/C_c e $A/DFFA$ e redução na eficiência instantânea no uso da água que, por conta disso, teve seu consumo final aumentado significativamente. Também houve redução significativa no número de nódulos para os tratamentos que receberam

aplicação de glyphosate, assim como tendência para redução na matéria seca de nódulos. Tanto a restrição hídrica quanto a aplicação de glyphosate não foram suficientes para alterar a concentração de pigmentos fotossintéticos na folha da soja TMG 115 RR, embora decréscimos no teor de carotenoides em condições de restrição hídrica e aplicação de glyphosatenham sido observados. Da mesma forma, não houve reduções relevantes nos teores foliares dos macro e micronutrientes estudados no presente trabalho, ainda que alguns elementos, tais como nitrogênio N, Ca, Fe e Mn, tenham exibido tendência a menores concentrações no tecido foliar, principalmente quando sob efeito do herbicida e na ausência de irrigação. Nas condições de restrição hídrica e com a aplicação do glyphosate foram observados decréscimos na capacidade fotossintética da planta, tornando o aparato fotossintético da soja RR mais sensível ao processo de desidratação.

Palavras-chave: intercâmbio gasoso, *Glycine max* L., rendimento de grãos, restrição hídrica.

PHYSIOLOGICAL ASSESSMENT OF THE PRODUCTION OF THE ROUNDUP READY SOYBEAN SPRAYED WITH GLYPHOSATE ON FIELD

ABSTRACT – Currently, the glyphosate resistant soybean (GRS) area reaches 85% of soybeans produced in Brazil. However, little is known about the physiological performance of GRS under field conditions, liable to water stress caused by dry conditions, which is quite common during the crop cycle. Thus, to knowledge the relationship between water stress and the effect of glyphosate on plant physiology of GRS is very important. Therefore, this study aimed to investigate the physiology of the GRS production under water stress in field conditions. For this, the TMG 115 RR soybean cultivar was planted in the experimental field of the UNIVAG – Centro Universitário de Várzea Grande, in Várzea Grande-MT, in a randomized blocks with three replications and factorial design (2x2), and the method of weed control (*C*) was made with glyphosate application or manual capping, and the hydrological regime (*W*), with or without interruption of irrigation, totaling four treatments. We evaluated the total dry matter, leaf area index, grain yield, leaf water potential, gas exchange, number and weight of nodules, specific leaf area, photosynthetic pigments content, leaf concentration of macro and micronutrients and photosynthetic capacity by A/C_c and $A/PPFD$ curves. Increases were observed in the variables of gas exchange and photosynthetic parameters of A/C_c and $A/PPFD$ curves under no restriction on soil water availability and glyphosate application, without, changing the leaf area index and specific leaf area. However, they were not sufficient to produce an increase in the grains yield and significant changes in leaf water potential. There was stomatal effects caused by glyphosate, observed by an increase in stomatal conductance, relationship between internal concentration and environment CO_2 , in the photosynthetic parameters of A/C_c and $A/PPFD$ curves and reduction in the water use instatenous efficiency, that caused an increased in the water consumption by the culture. There was also a significant reduction in the number of nodules for treatments with glyphosate application as well as a trend towards the reduction in dry matter of nodules. Both water restriction as glyphosate application were not sufficient to alter the photosynthetic pigments concentration in the TMG 115 RR soybean leaf, although decreases in carotenoid pigment content in water stress conditions and

glyphosate application were observed. Likewise, there were no significant reductions in foliar concentrations of macro and micronutrients studied in this work, although some elements, such as N, Ca, Fe and Mn exhibited a willingness to lower concentrations in the leaf tissue especially when under the influence of herbicide and in the absence of irrigation. Under water stress conditions and glyphosate application, decreases in photosynthetic capacity of the plant were observed, making the photosynthetic apparatus of GRS more sensitive to dehydration process.

Key-words: gas exchange, *Glycine max* L., grains yield, water restriction.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Ajuste da função de crescimento beta aos dados observados do <i>IAF</i> da soja TMG 115 RR para os tratamentos Gly (____), Cap (.....), Gly+RH (_ _) e Cap+RH (_ .. _ ..)	47
FIGURA 2. Ajuste da função de crescimento beta aos dados observados da <i>MST</i> da soja TMG 115 RR para os tratamentos Gly (____), Cap (.....), Gly+RH (_ _) e Cap+RH (_ .. _ ..)	49
FIGURA 3. Média diária (\pm EP) da temperatura (A), déficit de pressão de vapor do ar (B) e umidade do solo (C) e o acumulado diário da precipitação (D) durante as avaliações do intercâmbio gasoso e do potencial hídrico.....	53
FIGURA 4. Média (\pm EP; n = 3 plantas por tratamento) do potencial hídrico foliar na antemã (Ψ_{am}) (A) e do potencial hídrico foliar ao meio-dia (Ψ_{md}) (B) da soja TMG 115 RR.	56
FIGURA 5. Média (\pm EP; n = 3 plantas por tratamento) da taxa fotossintética (A), relação entre a concentração interna e a concentração ambiente de CO ₂ (B), condutância estomática (C) e eficiência instantânea no uso da água (D) da soja TMG 115 RR.	60
FIGURA 6. Média do período de avaliação do intercâmbio gasoso para a taxa fotossintética (A) e relação entre a concentração interna e a concentração ambiente de CO ₂ (B) (\pm EP; n = 3 plantas por tratamento), e da condutância estomática (C) e eficiência instantânea no uso da água (D) (\pm EP; n = 6 plantas por tratamento) da soja TMG 115 RR. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	65
FIGURA 7. Média (\pm EP; n = 6 plantas por tratamento) do rendimento de grãos (A) e da evapotranspiração (B) da soja TMG 115 RR.....	70
FIGURA 8. Ajuste da função de crescimento beta aos dados observados do número de nódulos (<i>NN</i>) da soja TMG 115 RR para os tratamentos Gly (——), Cap (.....), Gly+RH (— —) e Cap+RH (— · — ·)	100
FIGURA 9. Ajuste da função de crescimento beta aos dados observados da matéria seca de nódulos (<i>MSN</i>) da soja TMG 115 RR para os tratamentos Gly (——), Cap (.....), Gly+RH (— —) e Cap+RH (— · — ·).....	102

- FIGURA 10.** Médias (\pm EP; n = 3 plantas por tratamento) da resposta da fotossíntese da folha (A) em função da pressão parcial de CO₂ no cloroplasto (C_c) da soja TMG 115 RR para os diferentes tratamentos, em três períodos de avaliação (32, 40 e 50 DAE). São mostradas as funções dos modelos de Farquhar et al. (1980) para limitações de A pela Rubisco (linhas contínuas), e pela regeneração da RuBP (linhas pontilhadas), bem como a soma dos quadrados dos erros (SQE) do modelo.117
- FIGURA 11.** Média dos três períodos de avaliação das curvas A/C_c para a taxa máxima de fotossíntese (A_{max}) (A) e taxa de transporte elétrons em luz saturada (J_{max}) (B) (\pm EP; n = 9 plantas por tratamento), e da velocidade máxima de carboxilação da Rubisco (V_{cmax}) (C) (\pm EP; n = 18 plantas por tratamento) da soja TMG 115 RR. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.120
- FIGURA 12.** Resposta da taxa de fotossíntese líquida (A) à densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos ($DFFA$) da soja TMG 115 RR para os diferentes tratamentos, em três períodos de avaliação (32, 40 e 50 DAE). São apresentados os valores médios (\pm EP; n = 3 plantas por tratamento) bem como os valores de r^2 . ..126
- FIGURA 13.** Média dos três períodos de avaliação das curvas $A/DFFA$ para a taxa máxima de fotossíntese em luz saturante (A_{sat}) (\pm EP; n = 18 plantas por tratamento), da soja TMG 115 RR.128

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Análise de solo do Campo Experimental do UNIVAG – Centro Universitário de Várzea Grande, Várzea Grande - MT, no perfil de 0-20 cm de profundidade.	39
TABELA 2. Valores estimados dos parâmetros da função de crescimento beta (intervalo de confiança entre parênteses a 95%) para o <i>IAF</i> da soja TMG 115 RR nos diferentes tratamentos, Várzea Grande-MT, 2011.....	48
TABELA 3. Valores estimados dos parâmetros da função de crescimento beta (intervalo de confiança entre parênteses a 95%) para a <i>MST</i> da soja TMG 115 RR nos diferentes tratamentos, Várzea Grande-MT, 2011.....	50
TABELA 4. Resultado da ANOVA com medidas repetidas no tempo do potencial hídrico foliar na antemanhã (Ψ_{am}) e ao meio-dia (Ψ_{md}), para os fatores método de controle de plantas daninhas (<i>C</i>), regime hídrico (<i>W</i>), tempo (<i>t</i>) e interações. Também são apresentadas as médias ($\pm EP$) para cada tratamento.	55
TABELA 5. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo das variáveis do intercâmbio gasoso para os fatores método de controle de plantas daninhas (<i>C</i>), regime hídrico (<i>W</i>), tempo (<i>t</i>) e interações. Também são apresentadas as médias ($\pm EP$) para cada tratamento.	59
TABELA 6. Resultados da ANOVA de dois fatores dos componentes rendimento de grãos (kg ha^{-1}) e evapotranspiração (mm), para os fatores método de controle de plantas daninhas (<i>C</i>), regime hídrico (<i>W</i>) e a interação <i>CxW</i> . Também são apresentadas as médias ($\pm EP$) para cada tratamento.	69
TABELA 7. Valores estimados dos parâmetros da função de crescimento beta (intervalo de confiança entre parênteses a 95%) para o número de nódulos (<i>NN</i>) da soja TMG 115 RR nos diferentes tratamentos, Várzea Grande-MT, 2011.....	101
TABELA 8. Valores estimados dos parâmetros da função de crescimento beta (intervalo de confiança entre parênteses a 95%) para a matéria seca de nódulos (<i>MSN</i>) da soja TMG 115 RR nos diferentes tratamentos, Várzea Grande-MT, 2011.	103
TABELA 9. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo da área foliar específica (<i>AFE</i>) para os fatores método de controle de plantas daninhas (<i>C</i>), regime	

hídrico (<i>W</i>), tempo (<i>t</i>) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.	106
TABELA 10. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo da concentração de pigmentos fotossintéticos para os fatores método de controle de plantas daninhas (<i>C</i>), regime hídrico (<i>W</i>), tempo (<i>t</i>) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.	108
TABELA 11. Médias (\pm EP) dos tratamentos para a variável pigmento carotenoide (C_{x+c}), dadas em $\mu\text{g cm}^{-2}$, para os três períodos avaliados (32, 40 e 50 DAE).....	109
TABELA 12. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo da concentração de macronutrientes para os fatores método de controle de plantas daninhas (<i>C</i>), regime hídrico (<i>W</i>), tempo (<i>t</i>) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.	112
TABELA 13. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo da concentração de enxofre e de micronutrientes para os fatores método de controle de plantas daninhas (<i>C</i>), regime hídrico (<i>W</i>), tempo (<i>t</i>) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.	113
TABELA 14. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo dos parâmetros derivados das curvas A/C_c para os fatores método de controle de plantas daninhas (<i>C</i>), regime hídrico (<i>W</i>), tempo (<i>t</i>) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.	118
TABELA 15. Resultado da ANOVA com medidas repetidas no tempo da taxa de respiração no claro (R_d), do ponto de compensação de CO_2 na ausência de respiração mitocondrial (Γ^*) e da condutância mesofílica (g_m), derivados das curvas A/C_c , para os fatores método de controle de plantas daninhas (<i>C</i>), regime hídrico (<i>W</i>), tempo (<i>t</i>) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.	124
TABELA 16. Resultado da ANOVA com medidas repetidas no tempo da taxa máxima de fotossíntese em luz saturante (A_{sat}), da eficiência quântica aparente (Φ) e da convexidade da curva (θ), derivados das curvas $A/DFFA$, para os fatores método de controle de plantas daninhas (<i>C</i>), regime hídrico (<i>W</i>), tempo (<i>t</i>) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.	127
TABELA 17. Resultado da ANOVA com medidas repetidas no tempo da taxa de respiração no escuro (R_e), da luz de saturação ($DFFA_{sat}$) e do ponto de compensação de luz (PCL), derivados das curvas $A/DFFA$, para os fatores método	

de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações.
Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.130

LISTA DE SÍMBOLOS

A	taxa fotossintética líquida potencial
A_c	assimilação líquida de CO_2 limitada pela atividade da ribulose bífosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco)
A/C_c	curva de resposta da fotossíntese a diferentes concentrações de CO_2 no cloroplasto
$A/DFFA$	curva de resposta da fotossíntese a diferentes densidades de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos
A/E	eficiência instantânea no uso da água
AFE	área foliar específica
A_j	assimilação líquida de CO_2 limitada pela taxa de regeneração de ribulose-1,5-bifosfato (RuBP)
A_{max}	taxa máxima de fotossíntese
A_{maxB}	taxa fotossintética bruta em condições de saturação de luz
A_p	assimilação líquida de CO_2 limitada pela utilização das trioses fosfato
A_{sat}	taxa máxima de fotossíntese em luz saturante
C	método de controle de plantas daninhas
C_a	concentração de CO_2 na atmosfera
Cap	tratamento com controle de plantas daninhas por capina manual e sem restrição hídrica
$Cap+RH$	tratamento com controle de plantas daninhas por capina manual e com restrição hídrica
C_c	pressão parcial de CO_2 no cloroplasto
$Chl a$	clorofila a
$Chl b$	clorofila b
C_i	concentração intercelular de CO_2
C_i/C_a	relação entre a concentração interna e ambiente de CO_2
Cm_{-MST}	máxima taxa de crescimento para <i>MST</i>
Cm_{-IAF}	máxima taxa de crescimento para <i>IAF</i>
Cm_{-NN}	máxima taxa de crescimento para <i>NN</i>
Cm_{-MSN}	máxima taxa de crescimento para <i>MSN</i>

C_{x+c}	carotenoides totais
DAE	dias após a emergência
$DFFA$	densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos
$DFFA_{sat}$	luz de saturação
dpv	déficit de pressão de vapor d'água do ar
e	pressão de vapor d'água do ar atual
E	taxa transpiratória
e_s	pressão de vapor d'água do ar saturado
Gly	tratamento com controle de plantas daninhas por glyphosate e sem restrição hídrica
$Gly+RH$	tratamento com controle de plantas daninhas por glyphosate e com restrição hídrica
g_m	condutância mesofilica
g_s	condutância estomática
IAF	índice de área foliar
IAF_{max}	índice de área foliar máximo
J	taxa potencial de transporte de elétrons
J_{max}	taxa de transporte elétrons em luz saturada
J_{max}/V_{cmax}	razão entre o máximo transporte de elétrons e máxima carboxilação
K_c	coeficiente de Michaelis-Menten da atividade da Rubisco para o CO_2
K_o	coeficiente de Michaelis-Menten da atividade da Rubisco para o O_2
MSN	matéria seca de nódulos
MSN_{max}	valor máximo de matéria seca de nódulos
MST	matéria seca total
MST_{max}	valor máximo de matéria seca
NN	número de nódulos
NN_{max}	valor máximo de número de nódulos
O	pressão parcial de O_2 no cloroplasto
θ	convexidade da curva $A/DFFA$
p	probabilidade de erro
PCL	ponto de compensação de luz
ppt	precipitação
R_d	taxa de respiração no claro
R_e	taxa de respiração no escuro

RH	restrição hídrica
T	temperatura do ar
t	tempo
t_{e-IAF}	tempo para alcançar IAF_{max}
t_{e-MST}	tempo para alcançar MST_{max}
t_{e-NN}	tempo para alcançar NN_{max}
t_{e-MSN}	tempo para alcançar MSN_{max}
T_{m-IAF}	ponto de inflexão em que ocorre C_m para IAF
T_{m-MST}	ponto de inflexão em que ocorre C_m para MST
T_{m-NN}	ponto de inflexão em que ocorre C_m para NN
T_{m-MSN}	ponto de inflexão em que ocorre C_m para MSN
TPU	taxa de utilização da triose fosfato
U	umidade do solo
UR	umidade relativa do ar
V_{cmax}	velocidade máxima de carboxilação da Rubisco
α	rendimento quântico de transporte de elétrons
Γ^*	ponto de compensação de CO_2 na ausência de respiração mitocondrial
\emptyset	rendimento quântico aparente
ψ	potencial hídrico
ψ_{am}	potencial hídrico de antemanhã
ψ_{md}	potencial hídrico ao meio-dia
W	regime hídrico adotado

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26
2 EFEITO DO GLYPHOSATE E DA RESTRIÇÃO HÍDRICA NOS ÍNDICES DE CRESCIMENTO E NO INTERCÂMBIO GASOSO DE SOJA ROUNDUP READY EM CAMPO	32
2.1 INTRODUÇÃO.....	36
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	38
2.2.1 Localização e características gerais do experimento	38
2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos	40
2.2.3 Medidas das plantas e rendimento de grãos.....	41
2.2.4 Funções de crescimento	42
2.2.5 Medidas do intercâmbio gasoso.....	43
2.2.6 Potencial hídrico.....	44
2.2.7 Instrumentação, coleta de dados e cálculos micrometeorológicos.....	45
2.2.8 Análise estatística.....	46
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
2.3.1 Funções de crescimento	47
2.3.2 Variáveis microclimáticas	52
2.3.3 Potencial hídrico.....	54
2.3.4 Intercâmbio gasoso	58
2.3.5 Rendimento de grãos e evapotranspiração.....	68
2.4 CONCLUSÕES.....	71
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
3 PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS, NODULAÇÃO, NUTRIENTES E PARÂMETROS FOTOSSINTÉTICOS DE SOJA ROUNDUP READY EM RESPOSTA AO GLYPHOSATE E RESTRIÇÃO HÍDRICA EM CAMPO.....	84
3.1 INTRODUÇÃO.....	88
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS	90
3.2.1 Localização e características gerais do experimento	90
3.2.2 Número e peso total de nódulos.....	91

3.2.3	Curvas de resposta da fotossíntese a diferentes concentrações de CO ₂ (Curva A/C _c).....	92
3.2.4	Curvas de resposta da fotossíntese a diferentes densidades de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (Curva A/DFFA).....	96
3.2.5	Área foliar específica.....	96
3.2.6	Extração de pigmentos fotossintéticos.....	97
3.2.7	Determinação da concentração de nutrientes.....	98
3.2.8	Análise estatística.....	98
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	100
3.3.1	Número e peso total de nódulos.....	100
3.3.2	Área foliar específica.....	105
3.3.3	Pigmentos fotossintéticos.....	107
3.3.4	Teor de nutrientes.....	111
3.3.5	Curvas de resposta da fotossíntese a diferentes concentrações de CO ₂ (Curva A/C _c).....	116
3.3.6	Curvas de resposta da fotossíntese a diferentes densidades de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (Curva A/DFFA).....	125
3.4	CONCLUSÕES.....	132
3.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
4	CONCLUSÕES.....	147

1 INTRODUÇÃO

A soja é considerada uma das mais importantes culturas para a vida humana na terra (Fante et al., 2010), especialmente pela sua capacidade de produzir grandes quantidades de proteínas de excelente qualidade para a alimentação animal e de óleo para consumo humano, sendo, por isso, chamada de planta protaginosa por excelência (Lopes et al., 2002; Rodrigues et al., 2009). Além disso, da soja é produzida uma gama variada e rica de produtos, e o aumento contínuo de sua produção é de grande importância para a estabilização do suprimento de alimento para a humanidade (Federizzi, 2005; Paiva et al., 2006).

A produção mundial de soja está estimada em 281,5 milhões de toneladas, com uma área plantada de 108,7 milhões de hectares, ficando atrás apenas das culturas do milho, trigo e arroz em volume de produção. Os Estados Unidos são o maior produtor mundial de soja, com 85,7 milhões de toneladas em 31,5 milhões de hectares. Em seguida, aparece o Brasil como segundo maior produtor e, em terceiro lugar, a Argentina (USDA, 2013; CONAB, 2013).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2013), a produção brasileira de grãos de soja apresentou um incremento de mais de 300% nos últimos 16 anos, subindo de 26,4 milhões de toneladas em 1997 para 81,5 milhões de toneladas na safra 2012/13. Nesta última safra, as participações da região Centro-Oeste e do Estado de Mato Grosso na produção de soja foram da ordem de 46,7% e 28,9%, respectivamente, sendo cultivado em torno de 27,7 milhões de hectares de soja, participando a região Centro-Oeste e o Estado de Mato Grosso com 46,1% e 28,2% da área plantada do país, respectivamente.

Em âmbito mundial, o Brasil vem sendo considerado a grande promessa no fornecimento de soja, cujo crescimento médio, nos últimos 40 anos, tem sido da ordem de cinco milhões de toneladas por ano (Guimarães et al., 2008). Os elevados níveis de produção têm garantido a competitividade da soja brasileira no mercado internacional, com valores

acima de 3.300 kg ha⁻¹, obtidos nas principais regiões produtoras do Centro-Oeste do país (Hamawaki et al., 2007).

Essa grande expansão em termos de produção e rendimento da soja brasileira é fruto dos avanços na pesquisa e nas modificações que ocorreram na cadeia produtiva dessa importante oleaginosa. Dentro do sistema de produção de soja, houve uma modificação ao longo dos últimos anos, passando de um sistema tradicional em que o controle de plantas daninhas era feito inicialmente com capinas mecânicas, sendo substituído, posteriormente, pelo emprego de um vasto grupo de herbicidas (Brandt et al., 2006; Pereira et al., 2006).

Hoje, na condução das lavouras de soja no Brasil e, principalmente nos cerrados, o controle químico das plantas daninhas é o principal método empregado (Petter et al., 2007). Porém, visando a simplificar o manejo de plantas daninhas e a minimizar o impacto ambiental da aplicação de agrotóxicos (Reis et al., 2010), desenvolveu-se a soja transgênica resistente ao herbicida glyphosate, também conhecida como soja Roundup Ready ou, simplesmente, soja RR (Zonetti et al., 2011).

A alta eficiência do glyphosate no controle de plantas daninhas, sua baixa toxicidade e custo possibilitaram maior adoção dos produtores pela soja RR (Velini et al., 2009; Cerdeira e Duke, 2010). Para se ter uma ideia do avanço da tecnologia dos transgênicos em áreas de produção de alimentos no mundo inteiro, em 2012 foram cultivados 170,3 milhões de hectares, e mais de 70 milhões de hectares dessa área foram ocupados pela soja RR (James, 2012). No Brasil, o plantio de soja resistente ao glyphosate foi legalmente autorizado em setembro de 2003, pela Medida Provisória nº 131, que no mesmo ano foi convertida na Lei nº 10.184, de 15 de dezembro de 2003.

Com a liberação do plantio de cultivares de soja RR no Brasil, a intensidade de uso do glyphosate na cultura, que já era grande, devido às aplicações de dessecação de manejo, passou a ser ainda maior, com a possibilidade de realizar aplicações em pós-emergência, ou seja, sobre as plantas de soja geneticamente modificadas. Já na segunda safra após a

liberação no país, aproximadamente 35% de toda a soja cultivada na região Centro-Oeste era composta por cultivares de soja RR (Petter et al., 2007).

Atualmente, a área de soja RR no Brasil ultrapassa 85% do total de soja semeada, contando com mais de 90 cultivares de soja RR de várias empresas de sementes, disponíveis para a semeadura. Entretanto, poucos estudos sobre os efeitos do glyphosate nas cultivares RR semeadas no Brasil foram desenvolvidos (Figueiredo et al., 2009). Há, dessa forma, uma lacuna de conhecimento a respeito do comportamento desses materiais em relação ao glyphosate (Santos et al., 2007).

Originalmente, produzido em 1964 como potencial quelante industrial e usado como herbicida a partir de 1971 (Perez e Kogan, 2002), o glyphosate é sintetizado pela substituição de um hidrogênio amínico do aminoácido glicina por um radical de éster fosfônico (N-fosfometil glicina). Sua fórmula molecular é $C_3H_8NO_5P$ e sua massa molecular é de $169,1 \text{ g mol}^{-1}$. Apresenta diferentes formulações, sendo fabricado como sal isopropilamina, formulação concentrado solúvel, com 360 gramas de equivalente ácido (e.a.); como sal de amônio, formulado em grânulos dispersíveis em água, com $720 \text{ g e.a. kg}^{-1}$; e sal potássico, formulação concentrado solúvel, com $500 \text{ g e.a. kg}^{-1}$, entre outras formulações (Gazziero et al., 2009).

A recomendação técnica prescrita no registro do produto comercial que contém glyphosate para aplicação pós-emergente na soja RR, junto ao Ministério da Agricultura, é de $1,0 \text{ a } 5,0 \text{ L p.c. ha}^{-1}$, dependendo da marca comercial, formulação e concentração do produto, podendo ser aplicado entre os estádios fenológicos logo após a emergência (V3) e antes do florescimento (R1) (Cakmak et al., 2009; Fundação MT, 2010). O glyphosate pode ser utilizado ainda em aplicações únicas ou sequenciais, em doses e épocas que irão variar conforme as espécies e populações de plantas daninhas presentes na lavoura e também da tecnologia de aplicação do produtor (Agostinetto et al., 2009).

O glyphosate controla as plantas pela inibição da enzima 5-enolpiruvilchiquimato 3-fosfato sintase (EPSPs) que é uma enzima chave na

rota do ácido chiquímico, catalisando a condensação desse ácido e do fosfoenolpiruvato (Andréa et al., 2003; Santos et al., 2004; Coutinho e Mazo, 2005; Velini et al., 2008; Luchini, 2009). O principal produto da rota são os compostos fenólicos que podem representar até 35% da biomassa vegetal (Velini et al., 2012). Além disso, cerca de 20% de todo o fluxo de carbono nas plantas é processado pela rota do ácido chiquímico (Orcaray et al., 2010).

O elevado nível de conservação da enzima EPSPs é responsável por uma das mais notáveis características do glyphosate, a capacidade de controlar praticamente todos os tipos de plantas. A dose necessária para o controle varia de espécie para espécie, mas todas as plantas exibem sintomas de intoxicação, mais ou menos intensos, quando tratadas com o herbicida (Velini et al., 2012). Esta característica faz do glyphosate um herbicida de amplo espectro de controle, bastante útil quando se pretende o controle de uma comunidade diversificada de plantas daninhas (Constantin et al., 2008).

Essa aparente vantagem competitiva da soja transgênica acabou motivando seu cultivo em larga escala em substituição às demais cultivares. No entanto, existe um receio relacionado com o uso de transgênicos em áreas de produção, porque não se pode prever a magnitude do seu impacto no ambiente (Hernandez et al., 1999; Reddy e Zablotowicz, 2003). Muitos agricultores, em particular, ainda não estão inteiramente convencidos de que o potencial produtivo desse material vegetal é superior ao dos demais materiais não transgênicos do mercado, sobretudo porque há relatos de que, em campo, a soja transgênica pode até mesmo produzir menos do que as outras cultivares (Gordon, 2007; Zobiole et al., 2010a, b, c).

Esse problema tem sido objeto de algumas pesquisas, porém o contraste entre a produtividade de plantas transgênicas e não transgênicas ou de plantas transgênicas com controle de plantas daninhas utilizando-se o glyphosate ou a capina manual não tem sido consistente e, principalmente, por serem poucos os estudos em que realmente se avaliam as variáveis explicativas da razão pela qual eventualmente a produção da soja

transgênica é afetada negativamente (Bohn et al., 2008), e alguns desses estudos apresentaram resultados contraditórios que precisam ser elucidados.

Efeitos diretos negativos do glyphosate sobre a produção de matéria seca da parte aérea de soja RR foram observados por King et al. (2001) ao testarem o efeito do glyphosate sobre plantas dependentes da nodulação para obtenção de nitrogênio e plantas supridas com nitrogênio mineral. Da mesma forma, Reddy et al. (2000) e Oliveira Junior et al. (2008) também encontraram redução da matéria seca tanto da parte aérea quanto do sistema radicular de plantas de soja RR tratadas com glyphosate em comparação com a testemunha sem herbicida.

Também há evidências de que a soja RR pode apresentar injúrias como redução nos teores de clorofila, redução na biomassa dos nódulos, no teor de leghemoglobina, no teor e na fixação do nitrogênio (Zablotowicz e Reddy, 2007), na condutância estomática, na taxa transpiratória e na taxa fotossintética quando exposta ao glyphosate (Zobiolo et al., 2010a; Zobiolo et al., 2011). Além disso, a concentração de vários nutrientes na soja transgênica pode ser afetada pela aplicação do glyphosate em decorrência de distúrbios fisiológicos na planta (Figueiredo et al., 2009).

O trabalho desenvolvido por Ferronato (2010) com a cultivar de soja TMG 115 RR revelou incremento significativo na matéria seca total, na produção final de grãos e na quantidade de água consumida pelas plantas tratadas com glyphosate em relação às capinadas sem, contudo, haver diferença significativa na área foliar. Ressalta-se que, neste caso, as plantas sob os diferentes tipos de controle de plantas daninhas estiveram sempre irrigadas, sem qualquer restrição de água no solo.

O resultado obtido por Ferronato (2010) suscita um efeito estomático causado pelo glyphosate, que, aparentemente, afeta o intercâmbio gasoso da planta pelo aumento da condutância estomática que, em condições ideais, sem restrição de água no solo, com boa fertilização e sem competição com plantas daninhas, resulta em um aumento nas taxas fotossintéticas líquidas e nas taxas transpiratórias. Além disso, esse

resultado indica que pode haver algum efeito do glyphosate no balanço do ácido abscísico (ABA) nas plantas de soja RR, com conseqüente alteração na abertura estomática.

Por outro lado, Zobiolo et al. (2010a) realizaram um trabalho semelhante e verificaram uma relação direta entre o aumento dos níveis de glyphosate e a redução na biomassa e na quantidade de água absorvida pela soja BRS 242 GR.

Os resultados inteiramente contraditórios observados entre os trabalhos realizados por Ferronato (2010) e por Zobiolo et al. (2010a) revelam a necessidade de se intensificarem os estudos com o tema em questão, sobretudo porque é possível que haja efeito de outros fatores que ainda não foram levados em consideração como, por exemplo, o grupo de maturação do material vegetal empregado, o sistema de condução do experimento, a localização geográfica, condições ambientais, tipos de solo, populações de rizóbios, entre outros (Zablotowicz e Reddy, 2004).

Enquanto Ferronato (2010) utilizou soja TMG 115 RR, de maturação semi-tardia/média (Fundação MT, 2010), com cultivo em campo, Zobiolo et al. (2010a) utilizaram soja BRS 242 RR, de maturação precoce, com cultivo em vasos.

Como a condição de cultivo em campo não está imune aos efeitos de estresses bióticos e abióticos, em cultivos não irrigados da soja, que são a maioria, é possível levantar a hipótese de que o efeito do veranico possa se constituir em um estresse por déficit hídrico na soja transgênica tratada com glyphosate, cujo controle estomático está comprometido pelo uso do herbicida, o que pode determinar um colapso no intercâmbio gasoso com repercussão na redução da produtividade final (Ku et al., 2013).

Sabe-se que a cultura da soja se encontra geralmente, durante algum período de seu ciclo, sujeita à restrição hídrica, o que pode afetar seus mecanismos de captura e utilização dos recursos nos diferentes estádios de desenvolvimento. Caso esse período de restrição hídrica seja prolongado, o déficit 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

(Catuchi et al., 2012). No entanto, pouco se sabe a respeito do desempenho das sojas RR sob condições de deficiência hídrica (EMBRAPA, 2009).

Dessa forma, o conhecimento das relações entre deficiência hídrica e efeito do glyphosate na fisiologia de plantas de soja RR assume particular importância, uma vez que, com o aumento da demanda por maiores produtividades, mais informações são necessárias para maior eficiência no processo produtivo dessa oleaginosa. Portanto, esse trabalho teve como objetivo avaliar a fisiologia da produção de soja transgênica resistente ao glyphosate, sob restrição hídrica, em condições de campo.

A hipótese deste trabalho é de que as variáveis do intercâmbio gasoso e dos parâmetros fotossintéticos derivadas das curvas A/C_c e $A/DFFA$ da soja cv. TMG 115 RR sofram um incremento quando a planta é cultivada com glyphosate em condições de não restrição de água no solo, traduzindo-se em um aumento na matéria seca total, produtividade final de grãos e na evapotranspiração, porém, sem alterações no índice de área foliar e na área foliar específica da cultura.

No entanto, o déficit hídrico causado pela limitação da disponibilidade de água no solo concorre para reduzir o potencial hídrico foliar, o intercâmbio gasoso e os parâmetros fotossintéticos das curvas A/C_c e $A/DFFA$ na soja cv. TMG 115 RR cultivada com glyphosate. A redução do intercâmbio gasoso e dos parâmetros fotossintéticos das curvas A/C_c e $A/DFFA$ na soja cultivada com glyphosate e, sob condições de déficit hídrico, se traduz em redução na produtividade final de grãos.

São esperadas, também, reduções no número e no peso de nódulos, na concentração de pigmentos fotossintéticos e nos teores foliares de macro e micronutrientes nos tratamentos sob efeito da aplicação de glyphosate, sendo esses processos intensificados na condição de restrição hídrica do solo.

1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINETTO, D.; TIRONI, S.P.; GALON, L.; DAL MAGRO, T. Desempenho de formulações e doses de glyphosate em soja transgênica. **Revista Trópica**, v.3, n.2, p.35-41, 2009.

ANDRÉA, M.M.; PERES, T.B.; LUCHINI, L.C.; BAZARIN, S.; PAPINI, S.; MATALLO, M.B.; SAVOY, V.L.T. Influence of repeated applications of glyphosate on its persistence and soil bioactivity. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.11, p.1329-1335, 2003.

BOHN, G.M.B.; GENOVESE, M.I.; PIGOSSO, G.; TRICHEZ, D.; ROMBALDI, C.V. Resíduos de glifosato e ácido aminometilfosfônico e teores de isoflavonas em soja BRS 244 RR e BRS 154. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, p.192-197, 2008.

BRANDT, E.A.; SOUZA, L.C.F.; VITORINO, A.C.T.; MAARCHETTI, M.E. Desempenho agrônômico de soja em função da sucessão de culturas em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v.30, n.5, p.869-874, 2006.

CAKMAK, I.; YAZICI, A.; TUTUS, Y.; OZTURK, L. Glyphosate reduced seed and leaf concentrations of calcium, manganese, magnesium, and iron in non-glyphosate resistant soybean. **European Journal of Agronomy**, v.31, p.114-119, 2009.

CATUCHI, T.A.; GUIDORIZZI, F.V.C.; GUIDORIZI, K.A.; BARBOSA, A.M.; SOUZA, G.M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.4, p.519-527, 2012.

CERDEIRA, A.L.; DUKE, S.O. Effects of glyphosate-resistant crop cultivation on soil and water quality. **GM Crops**, v.1, n.1, p.16-24, 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: grãos safra 2012/2013: oitavo levantamento: setembro de 2013.** Disponível em <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 13 de outubro de 2013.

CONSTANTIN, J.; MACHADO, M.H.; CAVALIERI, S.D.; OLIVEIRA JR, R.S.; RIOS, F.A.; ROSO, A.C. Influência do glyphosate na dessecação de capim-braquiária e sobre o desenvolvimento inicial da cultura do milho. **Planta Daninha**, v.26, n.3, p.627-636, 2008.

COUTINHO, C.F.B., MAZO, L.H. Complexos metálicos com o herbicida glifosato: revisão. **Química Nova**, v.28, n.6, p.1038-1045, 2005.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Atividade da redutase do nitrato e acúmulo de prolina livre em genótipos de soja transgênica (BRS-RR) sob deficiência hídrica.** Passo Fundo-RS: **Embrapa Trigo**, 2009, 9p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento 71).

FANTE, C.A.; ALVES, J.D.; GOULART, P.F.P.; DEUNER, S.; SILVEIRA, N.M. Respostas fisiológicas em cultivares de soja submetidas ao alagamento em diferentes estádios. **Bragantia**, v.69, n.2, p.253-261, 2010.

FEDERIZZI, L.C. A soja como fator de competitividade no Mercosul: histórico, produção e perspectivas futuras. In. III Encontro CEPAN: Vantagens Competitivas dos Agronegócios no Mercosul, Porto Alegre. **Anais...**, Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios – CEPAN/UFRGS, 2005.

FERRONATO, A. **Caracterização do crescimento, da eficiência no uso da água e da radiação da cultivar de soja TMG 115 RR sob tratamento com glifosato**. 125 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, UFMT, Mato Grosso, 2010.

FIGUEIREDO, L.A.; BOARETTO, A.E.; RIBEIRINHO, V.S.; SILVA, D.H. Estado nutricional de soja transgênica e convencional tratadas com glifosato em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v.13, n.1, p.19-27, 2009.

FUNDAÇÃO MT. **Boletim de pesquisa da soja 2010**. XIV Edição. Rondonópolis, 418p. 2010.

GAZZIERO, D.L.P.; ADEGAS, F.; VOLL, E. Plantio direto no Brasil e o glyphosate. In: VELINI, E. D. et al. **Glyphosate**. Fepaf: Botucatu, 2009, p. 191-210.

GORDON, B. Adubação com manganês em soja convencional e soja resistente ao glyphosate. **Informe Agrônomo**, n.117, p.6-7, 2007.

GUIMARÃES, F.S.; REZENDE, P.M.; CASTRO, E.M.; CARVALHO, E.A.; ANDRADE, M.J.B.; CARVALHO, E.R. Cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] para cultivo de verão na região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.04, p.1099-1106, 2008.

HAMAWAKI, O.T.; POLIZEL, E.C.; JULIATTI, F.C.; HAMAWAKI, R.L.; BRUNETTA, P. UFUS-Imperial: nova cultivar de soja para o Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.01, 2007.

HERNANDEZ, A.; GARCIA, J.I.P.; BACERRIL, J.M. Glyphosate effects on phenolic metabolism of nodulated soybean (*Glycine max* L. Merrill). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 47, p.2920-2925, 1999.

KING, C.A.; PURCELL, L.C.; VORIES, E.D. Plant growth and nitrogenase activity of glyphosate-tolerant soybean in response to foliar glyphosate applications. **Agronomy Journal**, v.93, p.179-186, 2001.

KU, Y.S.; YEUNG, W.K.A.; YUNG, Y.L.; LI, M.W.; WEN, C.Q.; LIU, X.; LAM,

H.M. Drought Stress and Tolerance in Soybean. In: BOARD, J.E. (Ed.). **A Comprehensive Survey of International Soybean Research** - Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships. Rijeka, Croácia, 2013, p. 209-237.

JAMES, C. **Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2012**. ISAAA, Ithaca, NY, n.44, 2012.

LOPES, J.C.; MARTINS-FILHO, S.; TAGLIAFERRE, C.; RAGEL, O.J.P. Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja produzidas em Alegre-ES. **Revista Brasileira de Sementes**, v.24, n.01, p.51-58, 2002.

LUCHINI, L.C. Considerações sobre algumas propriedades físico-químicas do glyphosate. In: VELINI, E. D. et al. **Glyphosate**. Fepaf: Botucatu, 2009, p. 21-30.

OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; DVORANEN, E.C.; CONSTANTIN, J.; CAVALIERI, S.D.; FRANCHINI, L.H.M.; RIOS, F.A.; BRAINSKI, E. Influência do glyphosate sobre a nodulação e o crescimento de cultivares de soja resistente ao glyphosate. **Planta Daninha**, v.26, n.4, p.831-843, 2008.

ORCARAY, L.; IGAL, M.; MARINO, D.; ZABALZA, A.; ROYUELA, M. The possible role of quinate in the mode of action of glyphosate and acetolactate synthase inhibitors. **Pest Management Science**, v.66, p.262-269, 2010.

PAIVA, B.M.; ALVES, R.M.; HELENO, N.M. Aspecto socioeconômico da soja. **Informe Agropecuário**, v.27, n.230, p.7-14, 2006.

PEREIRA, F.A.R.; BARROS, A.C.; MATOS, F.S.A.; SOARES FILHO, R.; ARIAS, E.R.A. Alternativas de manejo de plantas daninhas para o plantio direto da soja na palha. **Ensaio e ciência**, v.10, n.1, p.11-20, 2006.

PEREZ, A.; KORGAN, K. Glyphosate-resistant *Lolium multiflorum* in Chilean orchards. **Weed Research**, v.43, p.12-19, 2002.

PETTER, F.A.; PROCÓPIO, S.O.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BARROSO, A.L.L.; PACHECO, L.P. Manejo de herbicidas na cultura da soja Roundup Ready. **Planta Daninha**, v.25, n.3, p.557-566, 2007.

REDDY, K.N.; HOAGLAND, R.E.; ZABLOTOWICZ, R.M. Effect of glyphosate on growth, chlorophyll content and nodulation in glyphosate-resistant soybeans (*Glycine max*) varieties. **Journal of New Seeds**, v.2, n.1, p.37-52, 2000.

REDDY, K.N.; ZABLOTOWICZ, R.M. Glyphosate-resistant soybean response to various salts of glyphosate and glyphosate accumulation in soybean nodules. **Weed Science**, v. 51, p.496-502, 2003.

REIS, M.R.; SILVA, A.A.; PEREIRA, J.L.; FREITAS, M.A.M.; COSTA, M.D.; SILVA, M.C.S.; SANTOS, E.A.; FRANÇA, A.C.; FERREIRA, G.L. Impacto do glyphosate associado com endossulfan e tebuconazole sobre microrganismos endossimbiontes da soja. **Planta Daninha**, v.28, n.1, p.113-121, 2010.

RODRIGUES, O.; TEIXEIRA, M.C.; COSTENARO, E.R.; BERTAGNOLLI, P.F.; GATTO, K.P. **Atividade da redutase do nitrato e acúmulo de prolina livre em genótipos de soja transgênica (BRS-RR) sob deficiência hídrica**. Passo Fundo: Embrapa Trigo 2009, 12 p. html (Embrapa Trigo. Boletim de pesquisa e desenvolvimento online, 71) Disponível em <http://cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp71.htm>. Acesso em 14 de maio de 2011.

SANTOS, J.B.; JACQUES, R.J.S.; PROCÓPIO, S.O.; KASUYA, M.C.M.; SILVA, A.A.; SANTOS, E.A. Efeitos de diferentes formulações comerciais de glyphosate sobre estirpes de *Bradyrhizobium*. **Planta Daninha**, v.22, n.2, p.293-299, 2004.

SANTOS, J.B.; FERREIRA, E.A.; REIS, M.R.; SILVA, A.A.; FIALHO, C.M.T.; FREITAS, M.A.M. Avaliação de formulações de glyphosate sobre soja Roundup Ready. **Planta Daninha**, v.25, n.1, p.165-171, 2007.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Disponível em <<http://www.usdabrazil.org.br/home/>>. Acesso em 14 outubro 2013.

VELINI, E.D.; ALVES, E.; GODOY, M.C.; MESCHEDE, D.K.; SOUZA, R.T.; DUKE, S.O. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pest Management Science**, v.64, p.489-496, 2008.

VELINI, E.D.; DUKE, S.O.; TRINDADE, M.L.B.; MESCHEDE, D.K.; CARBONARI, C.A. Modo de ação do glyphosate. In: VELINI, E.D.; MESCHELE, D.K.; CARBONARI, C.A.; TRINDADE, M.L.B. **Glyphosate**. Botucatu: Fepaf, 299-308, 2009.

VELINI, E.D.; CARBONARI, C.A.; TRINDADE, M.L.B.; GOMES, G.L.G.C.; MESCHEDE, D.K.; DUKE, S.O. Modo de ação do glyphosate. In: VELINI, E.D.; CARBONARI, C.A.; MESCHEDE, D.K.; TRINDADE, M.L.B. **Glyphosate: uso sustentável**. Botucatu: Fepaf, 39-64, 2012.

ZABLOTOWICZ, R.M.; REDDY, K.N. Impact of glyphosate on the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean : a minireview. **Journal of Environmental Quality**, v.33, n.3, p.825-831, 2004.

ZABLOTOWICZ, R.M.; REDDY, K.N. Nitrogenase activity, nitrogen content, and yield responses to glyphosate in glyphosate-resistant soybean. **Crop Protection**, v.26, p.370-376, 2007.

ZOBIOLE, L.H.S.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; KREMER, R.J.; CONSTANTIN, J.; BONATO, C.M.; MUNIZ, A.S. Water use efficiency and photosynthesis of glyphosate-resistant soybean as affected by glyphosate. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.97, p.182-193, 2010a.

ZOBIOLE, L.H.S.; OLIVEIRA JR, R.S.; KREMER, R.J.; CONSTANTIN, J.; YAMADA, T.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F.A.; OLIVEIRA JR, A. Effect of glyphosate on symbiotic N₂ fixation and nickel concentration in glyphosate-resistant soybeans. **Applied Soil Ecology**, v.44, p.176-180, 2010b.

ZOBIOLE, Z.H.S.; KREMER, R.J.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; CONSTANTIN, J. Glyphosate affects photosynthesis in first and second generation of glyphosate-resistant soybean. **Plant Soil**, v.336 p.251-265, 2010c.

ZOBIOLE, Z.H.S.; KREMER, R.J.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; CONSTANTIN, J. Glyphosate affects chlorophyll, nodulation and nutrient accumulation of "second generation" glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.99, p.53-60, 2011.

ZONETTI, P.C.; SUZUKI, LS.; BONINI, E.A.; FERRARESE, M.L.L.; FERRARESE-FILHO, O. Growth and root lignification of susceptible and glyphosate-resistant soybean. **Acta Scientiarum**, v.33, n.2, p.291-295, 2011.

2 EFEITO DO GLYPHOSATE E DA RESTRIÇÃO HÍDRICA NOS ÍNDICES DE CRESCIMENTO E NO INTERCÂMBIO GASOSO DE SOJA ROUNDUP READY EM CAMPO

RESUMO – A soja transgênica resistente ao glyphosate ocupa grande parte das áreas destinadas ao cultivo dessa leguminosa. No entanto, existem evidências de que esse herbicida pode provocar injúrias e afetar negativamente o metabolismo da planta, principalmente, sob restrição hídrica no solo. Portanto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do herbicida glyphosate e da restrição hídrica nos índices de crescimento e no intercâmbio gasoso de soja transgênica resistente ao glyphosate, em condições de campo. Para isso, a cultivar de soja TMG 115 RR foi semeada no Campo Experimental do UNIVAG – Centro Universitário, em Várzea Grande, Mato Grosso, Brasil, em blocos casualizados, com três repetições e em esquema fatorial (2x2), sendo o método de controle de plantas daninhas (C), com aplicação de glyphosate ou realização da capina manual, e o regime hídrico (W), com ou sem a interrupção da irrigação, totalizando quatro tratamentos. Foram determinados a matéria seca total, o índice de área foliar, o rendimento final de grãos, o potencial hídrico antemanhã e do meio-dia, a eficiência instantânea no uso da água, a evapotranspiração, a taxa fotossintética líquida, a condutância estomática e a relação entre a concentração interna e ambiente de CO₂. Observou-se que não houve alteração significativa no índice de área foliar da cultura pela utilização do herbicida glyphosate, em condições hídricas adequadas. Em contrapartida, a matéria seca total foi afetada negativamente pelo herbicida ao se submeter a soja à restrição hídrica. De forma geral, embora não significativo, tanto o potencial hídrico antemanhã quanto do meio-dia tiveram seus valores reduzidos pelo uso do glyphosate em comparação aos tratamentos capinados. Para o intercâmbio gasoso, o glyphosate determinou o aumento na condutância estomática, na relação entre a concentração interna e

ambiente de CO₂, e redução na eficiência instantânea no uso da água. Sem interromper a irrigação, houve incrementos na taxa fotossintética líquida, sendo observado efeito contrário em condições de restrição hídrica. O rendimento de grãos não foi afetado pelos diferentes métodos de controle de plantas daninhas empregados, apenas pela restrição hídrica imposta no período vegetativo da cultura. Porém, houve aumento significativo no consumo final de água pela aplicação de glyphosate na soja RR.

Palavras-chave: eficiência no uso da água, evapotranspiração, *Glycine max* L., intercambio gasoso e rendimento de grãos.

WATER RESTRICTION AND GLYPHOSATE EFFECTS ON GROWTH RATES AND GAS EXCHANGES OF ROUNDUP READY SOYBEAN ON FIELD

ABSTRACT – Glyphosate resistant soybean (GRS) occupies most of the areas for the cultivation of this leguminous plant. However, there is evidence that this herbicide can cause injuries and affects negatively the plant metabolism, but mostly under soil water restriction. Therefore, the aim of this study was to evaluate the effect of the glyphosate herbicide and water restriction on growth rates and gas exchange of GRS under field conditions. For this, the TMG 115 RR soybean cultivar was sown in the experimental field of the UNIVAG – Centro Universitário de Várzea Grande, in Várzea Grande-MT, in a randomized blocks with three replications and factorial design (2x2), method of weed control (*C*) with glyphosate application or manual capping, and the hydrological regime (*W*), with or without interruption of irrigation, and a total of four treatments. The total dry matter, leaf area index, grains yield, predawn and midday leaf water potential, instantaneous efficiency in water use, evapotranspiration, net photosynthetic rate, stomatal conductance and relationship between the internal and environment CO₂ concentration were determined. It was observed that there was no significant change in leaf area index of the crop by the use of glyphosate in normal water conditions. In contrast, the total dry matter was negatively affected by the herbicide while water restriction. Generally, although not significant, both predawn and midday leaf water potential were reduced by the use of glyphosate compared with manual weeding. For gas exchange, glyphosate has determined the increase in stomatal conductance, the relationship between the internal and environment CO₂ concentration and reduction in efficiency instantaneous of water use. Without interrupting irrigation, there were increases in net photosynthetic rate, the opposite effect was observed under water stress conditions. Grains yield was not affected by different

methods of weed control, only by water restriction imposed on the vegetative period. However, was observed a significant increase in water consumption by glyphosate application on TMG 115 RR soybean cultivar.

Key-words: evapotranspiration, gas exchange, *Glycine max* L., grains yield, water use efficiency.

2.1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) representa o produto de origem vegetal de maior impacto na economia brasileira (Klahold et al., 2006). Na safra 2012/2013, as exportações do agronegócio registraram superávit recorde de US\$ 100,61 bilhões, com liderança do complexo produtivo da soja, responsável por mais de US\$ 17,31 bilhões (Brasil, 2013). Esses valores são reflexos dessa principal oleaginosa produzida no mundo, por ser uma importante matéria-prima empregada na elaboração de diversos produtos, desde ração animal, óleo e até papel (Leite et al., 2012).

Em virtude de seu valor econômico e de sua potencialidade de cultivo em diversas condições edafoclimáticas, a cultura da soja tem sido objeto de constante investimento em tecnologias (Zhou et al., 2011), que vem permitindo, entre outras coisas, aumento significativo de sua produtividade e expansão de fronteiras agrícolas (Bulbovas et al., 2007).

Uma dessas tecnologias foi a introdução da soja transgênica resistente ao herbicida glyphosate (soja RR), cujo cultivo foi liberado no país em 2003. O amplo espectro de controle, a alta eficiência na eliminação de plantas daninhas e a baixa toxidez desse produto fizeram do glyphosate o herbicida de maior participação no mercado mundial (Santos et al., 2004), possibilitando sua plena utilização no sistema de plantio direto, que oferece um apelo conservacionista benéfico à agricultura e ao meio ambiente (Melo Júnior et al., 2011).

Embora desenvolvida para trazer benefícios e facilidades no manejo de plantas daninhas (EMBRAPA, 2008), a tecnologia da soja RR ainda levanta dúvidas no meio científico e entre produtores rurais quanto ao seu desempenho produtivo em condições de campo, se comparada às cultivares convencionais. A preocupação com o surgimento de novas plantas daninhas resistentes ao glyphosate pelo uso intensivo desse herbicida, os menores preços pagos ao produtor pela saca de soja RR e a imposição de royalties também pesam na hora da escolha da cultivar de soja para a semeadura, se transgênica ou convencional.

O glyphosate controla as plantas pela inibição da enzima 5-enolpiruvilchiquimato 3-fosfato sintase (EPSPs) que é uma enzima chave na rota do ácido chiquímico, catalisando a condensação desse ácido e do fosfoenolpiruvato (Hernandez et al., 1999). A rota do ácido chiquímico é responsável pela síntese dos aminoácidos aromáticos fenilalanina, tirosina e triptofano, essenciais para a síntese de vários compostos do metabolismo normal das plantas, como os flavonoides, as ligninas, entre outros (Yamada e Castro, 2007). No entanto, os eventos pós inibição da EPSPs pelo glyphosate, que levam as plantas à morte, não estão claramente estabelecidos (Velini et al., 2009).

Existem evidências de que a soja transgênica resistente ao glyphosate pode apresentar injúrias, como redução nos teores de clorofila, redução na biomassa dos nódulos, no teor de leghemoglobina, no teor e na fixação do nitrogênio (Zablotowicz e Reddy, 2007), no teor de macro e micronutrientes foliares, na condutância estomática, na taxa transpiratória, na taxa fotossintética (Zobiole et al., 2010a, 2010b, 2010c, 2010d, 2011, 2012) quando exposta ao glyphosate. Aparentemente, algumas dessas injúrias são causadas pelo produto da degradação do próprio glyphosate, o ácido aminometilfosfônico (AMPA) (Reddy et al., 2004).

Ainda que existam trabalhos sobre o efeito do glyphosate na fisiologia da soja RR, alguns deles apresentam resultados contraditórios o que leva à necessidade de novos estudos. Além disso, poucos são os estudos sobre o desempenho desse material em condições de campo (Bohm et al., 2008), onde realmente ocorrem os cultivos em larga escala.

Sabe-se que as condições normais de cultivo de uma lavoura em campo estão sujeitas aos efeitos de estresses bióticos e abióticos, sendo assim, é possível levantar a hipótese de que o efeito da restrição hídrica temporária em determinada fase do desenvolvimento vegetal também possa afetar o desempenho da soja transgênica tratada com glyphosate.

Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do herbicida glyphosate e da restrição hídrica nos índices de crescimento e no intercâmbio gasoso de soja transgênica resistente ao glyphosate, em

condições de campo.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Localização e características gerais do experimento

O experimento foi conduzido no campo experimental do UNIVAG – Centro Universitário, em Várzea Grande, Mato Grosso, Brasil (latitude 15°38' S, longitude 56°05' W, altitude: 192 m). O clima da região de estudo é do tipo Aw, conforme a classificação de Köppen, e o solo da área experimental apresenta textura arenosa, profundidade acima de 2 m e relevo plano.

Foi utilizada a cultivar de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) TMG 115 RR, planta transgênica, apresentando o gene de resistência ao herbicida glyphosate, com ciclo médio de maturação, hábito de crescimento determinado e recomendada para cultivo nas regiões Sul de baixa altitude do estado de Mato Grosso (Fundação MT, 2010). A semeadura foi feita em espaçamento de 0,45 m entre fileiras, com densidade de 12 plantas m⁻¹ linear e população final de 267.000 plantas ha⁻¹.

O cultivo foi feito empregando um sistema de irrigação por tubos gotejadores da AZUD, modelo AZUDLINE, vazão média de 5 mm h⁻¹, espaçamento de 0,45 m entre os tubos e de 0,3 m entre os gotejadores, apresentando uma densidade de 7 gotejadores por m². O sistema era acionado diariamente ou em dias intercalados entre as irrigações, dependendo da precipitação ocorrida no local.

Por meio de um conjunto lisimétrico do tipo lençol freático constante, composto por 12 caixas d'água em PVC, mediu-se o consumo de água das plantas de soja. O nível do lençol freático foi fixado a 40 cm da superfície do lisímetro. A lâmina de água evapotranspirada pela cultura foi obtida pela divisão do volume consumido pela área de exposição do lisímetro (1,53 m²). Para medir o consumo de água, eram feitas três leituras semanais do

volume de água necessário para a reposição do reservatório de alimentação dos lisímetros.

Com o intuito de simular a condição de restrição hídrica em campo, foi necessário que a semeadura e a condução de cultivo no período vegetativo fossem feitas nos meses de agosto e setembro, que coincidem com a estação seca na região de estudo (Diniz et al., 2008). A semeadura foi feita no dia 25 de agosto de 2011 e o ciclo da soja encerrado no dia 23 de dezembro de 2011, perfazendo um total de 117 dias da emergência à colheita.

A adubação de base foi feita de acordo com a interpretação da análise de solo (Tabela 1), distribuindo na linha de semeadura 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (18%) na forma de superfosfato simples, 50 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio (60%) e 30 kg ha⁻¹ de FTE BR 12 (9% de Zn + 1,8% de B + 0,8% de Cu + 2% de Mn + 3,5% de Fe + 0,1% de Mo). Aos 25 dias após a emergência (DAE) foi feita uma adubação de cobertura com 50 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio.

TABELA 1. Análise de solo do Campo Experimental do UNIVAG – Centro Universitário de Várzea Grande, Várzea Grande - MT, no perfil de 0-20 cm de profundidade.

Química								Física			
pH	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H	Areia	Silte	Argila
CaCl ₂	H ₂ O	mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³				g kg ⁻¹		
5,4	6,2	6	19	59	1,29	0,68	0,0	1,1	815	94	91

O tratamento das sementes foi feito com 300 mL do produto comercial (p.c.) Imidacloprido (15%) + Tiodicarb (45%) para 100 kg de sementes, 250 mL do p.c. Carbendazim (15%) + Tiram (35%) para 100 kg de sementes e uma dose de inoculante turfoso para 50 kg sementes.

O controle de pragas foi feito com quatro aplicações de 1,0 L ha⁻¹ do p.c. Metomil (21,5%) + 100 g ha⁻¹ do p.c. Imidacloprido (20%),

aos 27, 42, 63 e 85 DAE. Para o controle de doenças foram realizadas três aplicações de $0,3 \text{ L ha}^{-1}$ do p.c. Azosystrobin (20%) + Cyproconazole (8%), aos 42, 63 e 85 DAE.

As aplicações foram feitas utilizando um pulverizador costal elétrico de vazão constante, capacidade de 16 L, marca Flopi, modelo ESR-16A, dotado de uma barra com seis bicos com pontas de pulverização da Teejet, modelo XR110015, trabalhando a 1,5 bar de pressão, com volume de aplicação de 200 L ha^{-1} .

Como o experimento foi conduzido dentro do período do “Vazio sanitário para a cultura da soja”, conforme definido pelo Artigo 3º da Instrução Normativa SEDER Nº 001/2006, que vai de 15 de junho a 15 de setembro, e que visa a minimizar os impactos causados pela ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*), foi necessário solicitar a devida autorização do INDEA/MT, pelo requerimento protocolado e deferido sob nº 316831/2011, para o cultivo da soja dentro desse período.

2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, com três repetições, em esquema fatorial (2x2), sendo aplicados como tratamentos o método de controle de plantas daninhas (C), com aplicação de glyphosate ou realização da capina manual, e o regime hídrico (W), com ou sem restrição hídrica (RH), totalizando quatro tratamentos: T1 – sem restrição hídrica e aplicação de glyphosate (Gly); T2 – sem restrição hídrica e com capina manual (Cap); T3 – com restrição hídrica e aplicação de glyphosate (Gly+RH) e; T4 – com restrição hídrica e capina manual (Cap+RH). A soja foi submetida aos diferentes tratamentos no estádio fenológico V7, segundo Fehr e Caviness (1977), efetuando-se a capina manual, a aplicação de $3,0 \text{ L ha}^{-1}$ de Roundup Original, produto contendo glyphosate, formulado à base de sal de isopropilamina (360 g L^{-1} do equivalente ácido), e o início da restrição hídrica, conforme cada tratamento.

O produto Roundup Original foi aplicado com as mesmas calibrações

utilizadas para as demais aplicações de defensivos agrícolas, conforme o item 2.2.1. No momento da aplicação, as condições climáticas eram de velocidade do vento menor que $1,8 \text{ km h}^{-1}$, umidade relativa do ar entre 65 e 75%, temperatura entre 27 e 29°C e céu aberto.

Os tratamentos conduzidos sob plena disponibilidade de água no solo foram irrigados durante todo o ciclo da cultura. Os tratamentos submetidos à restrição hídrica foram igualmente irrigados, porém, quando as plantas atingiram o estágio fenológico V7, foram privadas da irrigação por um período de oito dias consecutivos, findos os quais, tornaram a ser irrigadas normalmente como as demais, até o final do ciclo.

A aplicação dos tratamentos no estágio fenológico V7 foi necessário para que as plantas de soja tivessem tamanho adequado no período de realização das medidas de intercâmbio gasoso com equipamento específico, as quais começaram a ser feitas entre os estádios V5 e V6. Dessa forma, houve necessidade de uma capina manual em todo o experimento no momento do raleamento das plantas de soja, que ocorreu entre os estádios V1 e V2, para evitar a competição das plantas daninhas com a cultura.

No total, o experimento foi formado por 12 unidades experimentais que ocupavam uma área aproximada de 105 m^2 cada. Cada unidade experimental tinha um lisímetro em sua área útil.

2.2.3 Medidas das plantas e rendimento de grãos

A determinação da área foliar e da matéria seca total das plantas de soja foi feita por amostragens em intervalos de aproximadamente 15 dias, tendo sido iniciada a partir do 17º DAE (dia após a emergência), coletando-se três plantas por repetição. Na última coleta, que coincidiu com a colheita, foi avaliado o rendimento de grãos, com umidade corrigida para 14%, sendo utilizado, para isso, um medidor de umidade digital, modelo G800 (Indústria e Comércio Eletro Eletrônica Gehaka, Ltda., São Paulo, SP, Brasil).

Para cada amostragem, a determinação da área foliar foi feita pela medição de oito folhas, utilizando um medidor portátil de área foliar modelo

CI-202 (CID, Inc., Camas, WA, EUA) previamente calibrado. Em seguida, as folhas medidas, o restante das folhas, caule, raiz, flores e frutos foram secos a 70°C por 72 h e posteriormente pesados em uma balança de precisão modelo AG 200 (Indústria e Comércio Eletro Eletrônica Gehaka, Ltda., São Paulo, SP, Brasil). A área foliar total de cada repetição foi obtida pela associação entre a área foliar das folhas medidas e o seu peso, sendo extrapoladas para as demais folhas da repetição. A partir desse resultado, foi possível obter o índice de área foliar (*IAF*), ao relacionar a área foliar total com a área do solo onde foram coletadas as três plantas. Considerou-se matéria seca total (*MST*) a somatória do peso seco de todas as folhas, caule, raiz, flores e frutos, convertidos para a área de 1,0 m².

Para verificar a existência de diferenças entre o *IAF* das áreas da parcela fora do lisímetro e as de dentro, também foi feita a mensuração do *IAF* com um ceptômetro, modelo AccuPAR LP-80 (Decagon, Pullman, WA, USA), a cada dez dias, tomando-se uma medida na área útil de cada parcela e do lisímetro correspondente a repetição, conforme metodologia descrita por Decagon Devices (2004). Isto foi necessário pela impossibilidade de fazer a amostragem destrutiva das plantas de soja de dentro dos lisímetros, conforme foi feito com as plantas de soja na área de fora, para não comprometer as medidas de consumo final de água de cada repetição. Com isso, elimina-se a dúvida da existência ou não de diferença entre os *IAF* de dentro e fora dos lisímetros.

2.2.4 Funções de crescimento

Foi utilizada a função de crescimento beta (Yin et al., 2003) para descrever a *MST* e o *IAF* no decorrer do tempo (*t*), conforme as equações (1) e (2).

$$MST = MST \max \left(1 + \frac{te - t}{te - tm} \right) \left(\frac{t}{te} \right)^{\frac{te}{te - tm}} \quad (1)$$

$$IAF = IAF \max \cdot \left(1 + \frac{te - t}{te - tm} \right) \cdot \left(\frac{t}{te} \right)^{\frac{te}{te - tm}} \quad (2)$$

$MSTmax$ é o valor máximo de matéria seca e $IAFmax$, o índice de área foliar máximo que alcançado nos tempos te e tm , o ponto de inflexão em que ocorre a máxima taxa de crescimento que obtido pelas equações (3) ou (4), sendo Cm a máxima taxa de crescimento.

$$Cm = \frac{2 \cdot te - tm}{te \cdot (te - tm)} \cdot \left(\frac{tm}{te} \right)^{\frac{tm}{te - tm}} \cdot MST \max \quad (3)$$

$$Cm = \frac{2 \cdot te - tm}{te \cdot (te - tm)} \cdot \left(\frac{tm}{te} \right)^{\frac{tm}{te - tm}} \cdot IAF \max \quad (4)$$

2.2.5 Medidas do intercâmbio gasoso

Utilizando um sistema portátil de medição da fotossíntese, modelo LI-6400 (LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA), foi feita uma primeira avaliação do intercâmbio gasoso, sendo medidas a condutância estomática (g_s), a taxa fotossintética líquida potencial (A), a taxa transpiratória (E) e a concentração intercelular de CO_2 (C_i). O equipamento foi ajustado para fornecer uma condição potencial à planta, com densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos ($DFFA$) de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, temperatura do bloco de 28°C , umidade relativa do ar de referência próxima de 60% e concentração de CO_2 do ar de referência de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$, para padronizar as condições nas quais as plantas foram avaliadas.

A partir dessas medições, também foram avaliadas a relação entre a concentração interna e ambiente de CO_2 (C_i/C_a) e a eficiência instantânea no uso da água, obtida pela relação entre A e E .

As medidas foram feitas das 7:30 às 11:00 h, no trifólio central da última folha totalmente expandida e que não apresentasse sinais de injúria, herbivoria ou ataque de patógenos. Considerou-se uma medida do intercâmbio gasoso por repetição, totalizando três medidas por tratamento.

O intercâmbio gasoso foi avaliado durante 21 dias (30-50 DAE): três dias de medida antes da aplicação dos tratamentos (30-32 DAE), sete dias após a aplicação dos tratamentos (34-40 DAE) e nove dias após a retomada da irrigação (42-50 DAE). Os outros dois dias se referem ao dia da aplicação dos tratamentos (33 DAE) e ao dia da retomada da irrigação (41 DAE), nos quais não foram feitas medidas.

2.2.6 Potencial hídrico

O potencial hídrico foliar foi determinado no período da antemanhã (Ψ_{am}) e ao meio-dia (Ψ_{md}), utilizando uma bomba de pressão (Scholander et al., 1965) de fabricação própria. As medidas foram feitas em um trifólio central da última folha totalmente expandida de cada repetição, totalizando três medidas por tratamento.

Para isso, imediatamente após a coleta das folhas, fez-se um corte na base do pecíolo da folha com uma lâmina de inox para facilitar a saída da seiva xilemática. Em seguida, a folha foi inserida na câmara da bomba deixando-se a base do pecíolo aparente. Para observação da saída da seiva xilemática, foram utilizadas lupa e iluminação artificial, sendo a leitura da pressão exercida dentro da câmara da bomba feita por um manômetro. Foi mantido na câmara de pressão um fluxo contínuo de gás nitrogênio até o momento em que se observou a saída da seiva xilemática. Os valores de pressão foram então anotados e posteriormente convertidos em valores de potencial hídrico.

As avaliações do potencial hídrico foram realizadas feitas durante 21 dias, obedecendo ao mesmo intervalo de medidas executadas para o intercâmbio gasoso (30-50 DAE).

2.2.7 Instrumentação, coleta de dados e cálculos micrometeorológicos

Na área experimental, foram instalados equipamentos de medições micrometeorológicas que permitiram a coleta e registro de dados ao longo do ciclo da cultura, durante 24 horas por dia.

Para a medição da temperatura (T) e da umidade relativa do ar (UR), foi utilizado um termo-higrômetro, modelo HMP 45AC (Vaisala, Inc., Helsinki, Finland), instalado a 1,5 m de altura. A umidade do solo (U) foi medida em uma parcela sem interrupção da irrigação e uma com interrupção da irrigação por dois reflectômetros (CS616 Soil Moisture Sensor, Campbell Scientific, Inc., USA) instalados em cada parcela a 20 cm de profundidade, previamente calibrados.

Os equipamentos foram alimentados com tensão de 12 V por uma bateria de 45 Ah. Os dados micrometeorológicos foram coletados por sensores de aquisição de dados, ligados a um datalogger CR 1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA), com intervalo de leitura de 30 segundos e registro das médias a cada 30 minutos.

Constantemente os dados armazenados no datalogger foram transferidos para um disco rígido de um laptop. Verificações do funcionamento e o estado de conservação dos sensores também foram feitos a cada visita ao local. Foi instalado, ainda, junto às parcelas, um pluviômetro para determinar a precipitação (ppt).

Pelos dados de T e UR foi possível calcular o déficit de pressão de vapor d'água do ar (dpv), que é a diferença entre a pressão de vapor d'água do ar saturado (e_s) e a pressão de vapor d'água do ar atual (e). A pressão de vapor d'água do ar atual (e) em (kPa) foi calculada conforme a equação (5).

$$e = \frac{e_s UR}{100} \quad (5)$$

A pressão de vapor d'água do ar saturado (e_s) em (kPa) foi obtida como uma função da T , conforme a equação (6).

$$e_s = 0,6108.10^{\left(\frac{7,5T}{237,3+T}\right)} \quad (6)$$

2.2.8 Análise estatística

Os dados relativos às curvas das funções de crescimento beta para *IAF* e *MST* foram submetidos ao teste de normalidade e avaliados por ANOVA pelo teste *F* ($p < 0,05$). Foi feito um teste de hipótese randômico pela metodologia da reamostragem por Monte Carlo, com 10.000 reamostragens de 20 pontos ao longo da curva, para verificar a equivalência dos parâmetros.

Os dados do intercâmbio gasoso e do potencial hídrico foram submetidos ao teste de normalidade e ANOVA com medidas repetidas no tempo. Foram considerado fatores dependentes *C* e *W*, e como fator independente o tempo (*t*). Para os valores finais da evapotranspiração medidos pelos lisímetros e de rendimento de grãos, foi feita uma ANOVA de dois fatores. Para aqueles tratamentos ou interações que foram significativos ($p < 0,05$) pelo teste *F*, foram feitos testes de médias por Tukey a 5% de probabilidade. No caso de não significância entre os fatores, os dados foram agrupados.

Foi feito o teste *t* de Student para dados pareados para verificar se houve diferença entre os dados de *IAF* das plantas de dentro e fora dos lisímetros para cada tratamento.

As análises estatísticas deste trabalho foram feitas utilizando o programa estatístico NCSS 2007 (NCSS, Kaysville, Utah).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Funções de crescimento

O ajuste aos dados observados do *IAF* foi bem descrito pela função beta de crescimento, com valores do coeficiente de determinação (r^2) variando entre 0,78 e 0,86 (Figura 1).

Entre os tratamentos, foram observadas diferenças significativas para os ajustes do *IAF* ao longo do ciclo da cultura (Figura 1).

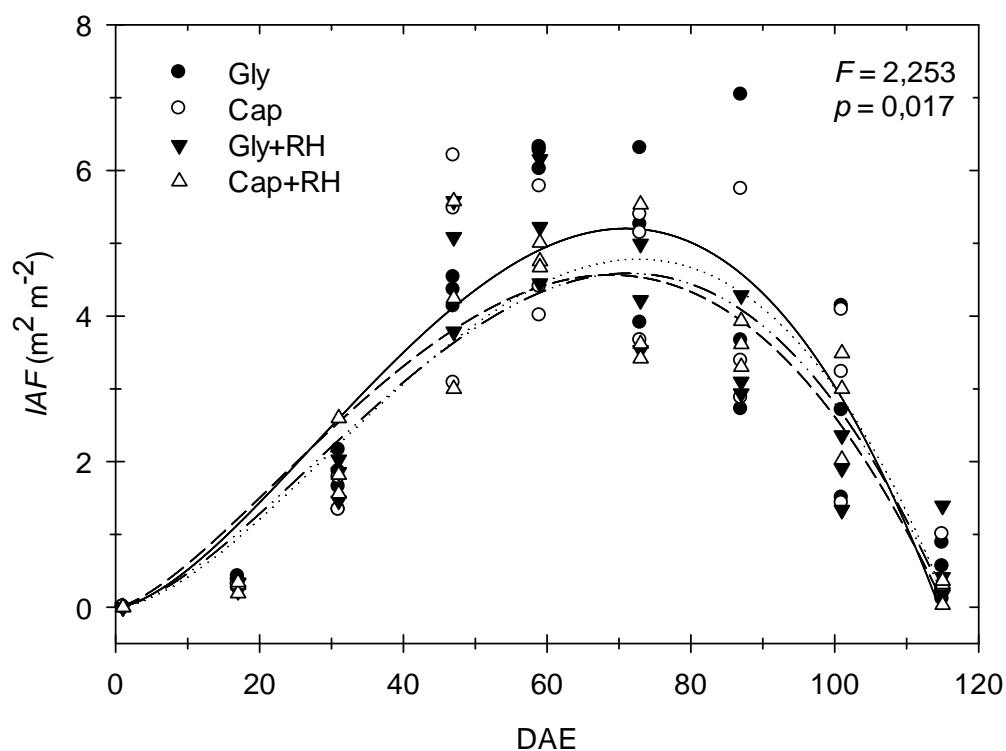


FIGURA 1. Ajuste da função de crescimento beta aos dados observados do *IAF* da soja TMG 115 RR para os tratamentos Gly (—), Cap (.....), Gly+RH (_ _) e Cap+RH (_ .. _ ..).

O tratamento Gly apresentou os maiores *IAF* em quase todo o período de cultivo da soja, enquanto o Gly+RH teve seus valores reduzidos a partir

de 30 DAE, em relação à Gly. Cap e Cap+RH apresentaram comportamento semelhante até os 60 DAE, quando Cap passou a apresentar valores superiores até próximo do final do ciclo da soja (Figura 1).

No entanto, a restrição hídrica de oito dias consecutivos não foi suficiente para afetar significativamente os parâmetros dos ajustes da função beta de *IAF* entre os tratamentos Cap (4,78 m² m⁻²) e Cap+RH (4,59 m² m⁻²). Este comportamento não foi observado ao comparar o *IAFmax* de Gly+RH (4,56 m² m⁻²) com o de Gly (5,20 m² m⁻²) (Tabela 2).

TABELA 2. Valores estimados dos parâmetros da função de crescimento beta (intervalo de confiança entre parênteses a 95%) para o *IAF* da soja TMG 115 RR nos diferentes tratamentos, Várzea Grande-MT, 2011.

Parâmetro	Tratamento*			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
<i>IAFmax</i> (m ² m ⁻²)	5,20 a (4,59;5,71)	4,78 ab (4,50;5,13)	4,56 b (4,36;4,76)	4,59 b (4,45;4,75)
<i>tm-IAF</i> (dias)	27,36 ab (20,64;35,04)	29,47 a (24,68;36,48)	22,33 b (19,45;25,61)	26,89 a (24,07;29,76)
<i>te-IAF</i> (dias)	70,94 ab (67,34;75,04)	72,69 a (70,11;76,16)	68,84 b (67,35;70,31)	71,34 a (69,93;72,90)
<i>Cm-IAF</i> (m ² m ⁻² dia ⁻¹)	0,11 a (0,12;0,10)	0,10 a (0,11;0,09)	0,10 a (0,10;0,09)	0,10 a (0,10;0,09)

* Médias seguidas da mesma letra, em cada linha, não diferem entre si segundo metodologia de reamostragem de Monte Carlo.

Tanto o tempo em que ocorre *IAFmax* (*te-IAF*) quanto o ponto de inflexão para a máxima taxa de crescimento do *IAF* (*tm-IAF*) apresentaram menores valores no tratamento Gly+RH, não diferindo significativamente apenas de Gly (Tabela 2). Embora os tratamentos que receberam a aplicação de glyphosate tenham alcançado menores tempos de *te-IAF* e *tm-IAF*, não houve diferença na duração total do ciclo da cultura da soja. Para

a máxima taxa de crescimento do IAF (Cm_{-IAF}), não houve diferença entre os tratamentos, permanecendo os valores médios entre 0,10 e 0,11 $m^2 m^{-2} dia^{-1}$ (Tabela 2).

Da mesma forma que IAF , o ajuste aos dados observados da MST também foi bem descrito pela função beta de crescimento, com valores do r^2 entre 0,90 e 0,93, com diferença significativa entre os ajustes dos tratamentos (Figura 2).

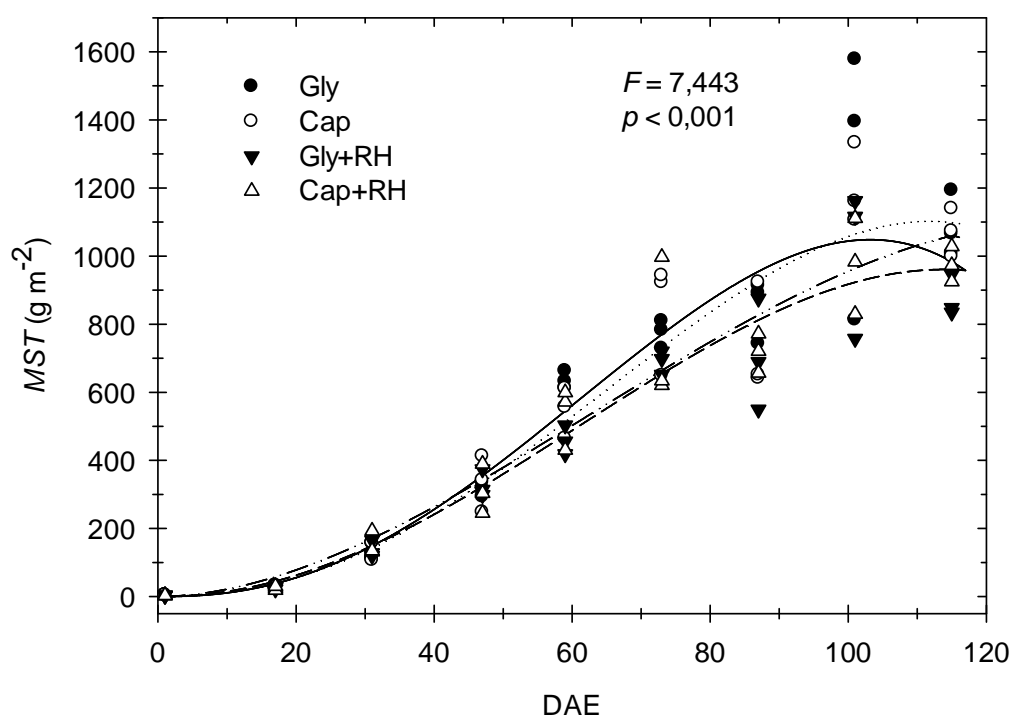


FIGURA 2. Ajuste da função de crescimento beta aos dados observados da MST da soja TMG 115 RR para os tratamentos Gly (____), Cap (.....), Gly+RH (___ __) e Cap+RH (___ .. ___ ..).

Pelos valores estimados dos parâmetros da função beta de crescimento (Tabela 3), observou-se que o tratamento Gly+RH apresentou o menor valor da matéria seca total máxima (MST_{max}) (960,7 $g m^{-2}$), porém, não diferiu do tratamento Gly (1048,2 $g m^{-2}$), que obteve valores inferiores ao Cap (1102,3 $g m^{-2}$) e Cap+RH (1101,5 $g m^{-2}$). Esses valores, no entanto, não

são significativamente diferentes. Para os demais parâmetros não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, embora a soja com aplicação de glyphosate obtivesse menor tempo para alcançar MST_{max} (te_{-MST}) do que o controle por capina (Figura 2 e Tabela 3).

TABELA 3. Valores estimados dos parâmetros da função de crescimento beta (intervalo de confiança entre parênteses a 95%) para a MST da soja TMG 115 RR nos diferentes tratamentos, Várzea Grande-MT, 2011.

Parâmetro	Tratamento*			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
MST_{max}	1048,2 ab	1102,3 a	960,7 b	1101,5 a
(g m ⁻²)	(882,1;1149,1)	(1047,8;1141,1)	(870,8;1010,2)	(881,2;1184,7)
tm_{-MST}	61,2 a	64,7 a	61,1 a	62,8 a
(dias)	(54,2;67,6)	(61,6;67,9)	(57,9;63,9)	(56,1;65,9)
te_{-MST}	103,2 a	117,7 a	113,7 a	117,1 a
(dias)	(96,7;109,7)	(98,8;118,1)	(106,1;121,1)	(109,7;124,6)
Cm_{-MST}	18,26 a	16,01 a	13,81 a	13,35 a
(g m ⁻² dia ⁻¹)	(15,21;21,50)	(14,81;18,06)	(12,04;15,65)	(11,45;15,26)

* Médias seguidas da mesma letra, em cada linha, não diferem entre si segundo metodologia de reamostragem de Monte Carlo.

O estresse hídrico durante os estádios de crescimento faz com que ocorra redução no potencial hídrico dos tecidos, promovendo um decréscimo no potencial de pressão abaixo do necessário para o crescimento celular (Taiz e Zieger, 2013). Nessa situação, a redução no incremento do IAF pode estar relacionada à pequena redução no tamanho das folhas individuais, com a menor produção de folhas (Setiyono et al., 2008) ou com a aceleração da senescência foliar (Egli e Bruening, 2004), com o intuito de diminuir a área disponível para a transpiração (Santos e Carlesso, 1998).

Particularmente, a soja é uma espécie propensa a abortar as folhas mais velhas com o desenvolvimento do estresse hídrico, em parte porque os estômatos permanecem abertos por mais tempo e há menor capacidade de

movimento paraeliotrópico e enrolamento foliar, em comparação com outras leguminosas (Likoswe e Lawn, 2008).

Assim como o estresse hídrico, o glyphosate também pode causar menor desenvolvimento da parte aérea em culturas ao inibir a biossíntese de ácido indol acético (AIA) (Zobiolo et al., 2010c), hormônio promotor do crescimento, que deriva da via metabólica do chiquimato (Taiz e Zieger, 2009). Além disso, a soja é uma planta dependente da fixação biológica de nitrogênio para o seu crescimento, sendo a relação simbiótica entre a soja e a bactéria *Bradyrhizobium japonicum* fixadora de N mais sensível ao déficit hídrico do que qualquer outro processo (Serraj et al., 1997, 1998), tal como trocas gasosas, transpiração e assimilação. A aplicação de glyphosate também pode ser um agravante, visto que essas bactérias têm a forma da enzima 5-enolpiruvilchiquimato 3-fosfato sintase (EPSPs) sensível ao herbicida (Zablotowicz e Reddy, 2004; 2007), que pode ocasionar redução dos números de nódulos (Reddy et al., 2000) e/ou da matéria seca total dos nódulos (Oliveira Jr et al., 2008; Zobiolo et al., 2010c; 2011), o que poderia explicar o menor valor de alguns parâmetros das curvas de *IAF* e *MST* para Gly+RH com relação aos demais tratamentos.

Johnson et al. (2002), em cultivo de soja RR safrinha com aplicação de glyphosate, observaram redução significativa em *IAF* quando comparada com a temporada de chuvas abundantes, exemplificando o efeito negativo da restrição hídrica somado ao uso de glyphosate no *IAF*. Porém, quando se analisa apenas o efeito do herbicida, Young et al. (2003) não observaram redução do *IAF* com a aplicação de 1.120 g ha⁻¹ de glyphosate entre os estádios V2-V6, para um período de avaliação de três anos de cultivo. Alonso et al. (2010), estudando a seletividade do glyphosate em misturas em tanques para soja RR em campo, observaram que tratamentos com aplicação de 720 a 1200 g ha⁻¹ de glyphosate em única aplicação no estágio V2-V3 não afetaram o desenvolvimento do dossel da soja. Redução significativa foi observada apenas para a dose de 1440 g ha⁻¹ de glyphosate.

Da mesma forma, com oferta hídrica adequada, Oliveira Jr et al. (2008) não encontraram redução significativa da matéria seca da parte aérea

pela aplicação de glyphosate em relação às respectivas testemunhas sem aplicação. Reddy et al. (2000) observaram redução da matéria seca, tanto da parte aérea quanto do sistema radicular de plantas de soja RR tratadas com glyphosate, somente para a dose de 2240 g ha⁻¹ em comparação com a testemunha sem herbicida. De modo semelhante, a aplicação isolada de glyphosate nas doses de 480, 960 e 1.440 g ha⁻¹ não causou intoxicação e nem reduziu a altura e o acúmulo de massa seca das plantas de soja RR (Procópio et al., 2006).

Ademais, pesquisadores demonstraram que culturas como a soja, após estresse hídrico seguido de retomada da irrigação, exibem rápido crescimento assim que o estresse desaparece, para compensar parcialmente a perda induzida pelo estresse (Lei et al., 2006), o que pode minimizar o efeito da restrição hídrica entre os tratamentos.

2.3.2 Variáveis microclimáticas

É possível observar na Figura 3, o comportamento das variáveis microclimáticas temperatura (T), déficit de pressão de vapor d'água do ar (dpv), umidade do solo (U) e precipitação (ppt), durante o período de avaliação do intercâmbio gasoso e do potencial hídrico, compreendido entre 30 e 50 DAE.

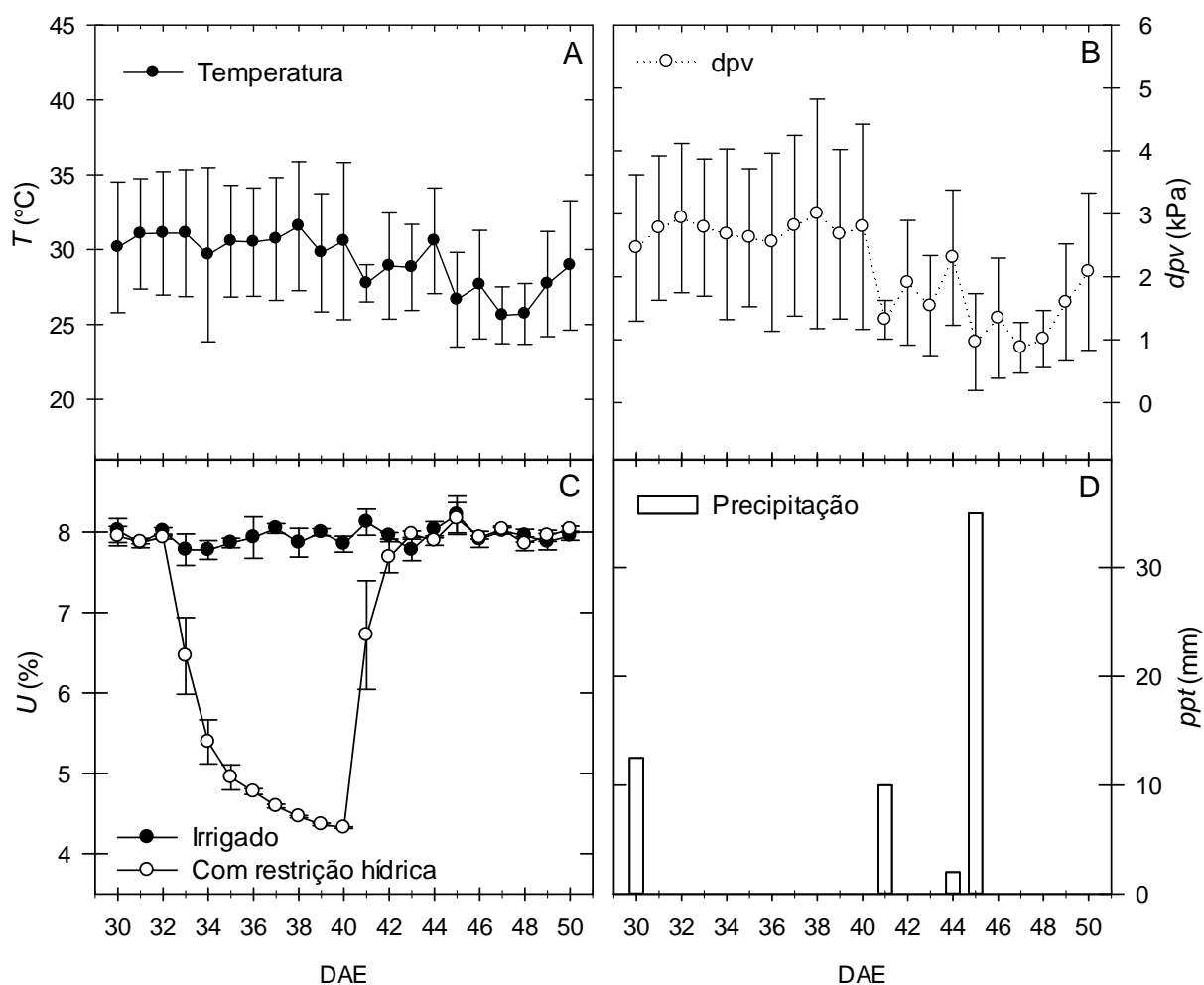


FIGURA 3. Média diária (\pm EP) da temperatura (A), déficit de pressão de vapor do ar (B) e umidade do solo (C) e o acumulado diário da precipitação (D) durante as avaliações do intercâmbio gasoso e do potencial hídrico.

Valores médios diários, tanto de T quanto de dpv , observados durante os 30-40 DAE, foram elevados, tendo alcançado, no 38° DAE 31,57 $^{\circ}\text{C}$, e 3,00 kPa, respectivamente (Figura 3). Estes valores estão em consonância com aqueles encontrados para os meses de agosto e setembro que, historicamente, apresentam elevadas médias diárias de T e dpv na região de estudo, relacionados a uma baixa umidade relativa do ar (UR) (Antunes Junior et al., 2011).

As precipitações desse período ocorreram entre os períodos

vespertino e noturno, não interferindo nas medições. Porém, a chuva do 41º DAE acabou antecipando o período de retomada da irrigação nos tratamentos submetidos à restrição hídrica, cujo intuito era prosseguir até que a taxa fotossintética se igualasse zero.

Pela baixa presença de argila como componente do gradiente textural do solo (Tabela 1), a área em estudo tem como características a baixa capacidade de retenção e armazenamento de água, causando considerável redução na umidade do solo (U) logo após o início da restrição hídrica (Figura 3). Findo o período de restrição hídrica (34-40 DAE) para os tratamentos Gly+RH e Cap+RH, a U voltou a níveis próximos dos tratamentos com irrigação constante.

2.3.3 Potencial hídrico

O potencial hídrico foliar é considerado um bom indicador do estado hídrico da planta (Vieira Júnior et al., 2007), podendo ser usado para o entendimento dos mecanismos fisiológicos envolvidos e dos processos afetados no controle do déficit hídrico pela própria planta (Martins et al., 2010).

Neste trabalho, tanto o potencial hídrico foliar na antemãhã (Ψ_{am}) quanto ao meio-dia (Ψ_{md}) foi altamente significativo para o fator regime hídrico (W), como já era esperado, apresentando, também, significância para o fator tempo (t) e a interação entre Wxt . Embora não significativo, o fator controle (C) apresentou valores de p próximos de 5% de probabilidade de erro para ambos os potenciais hídricos (Tabela 4), observando-se que as plantas sob efeito do glyphosate apresentaram menores Ψ_{am} e Ψ_{md} .

TABELA 4. Resultado da ANOVA com medidas repetidas no tempo do potencial hídrico foliar na antemanhã (Ψ_{am}) e ao meio-dia (Ψ_{md}), para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.

Causas de variação*	Ψ_{am}		Ψ_{md}	
	F	p	F	p
R. Hídrico (W)	564,74	<0,01	214,68	<0,01
Controle (C)	4,52 ^{ns}	0,066	5,10 ^{ns}	0,054
Tempo (t)	26,04	<0,01	37,09	<0,01
W x C	2,09 ^{ns}	0,186	0,00 ^{ns}	0,966
W x t	25,58	<0,01	32,19	<0,01
C x t	0,29 ^{ns}	0,998	0,49 ^{ns}	0,957
W x C x t	0,34 ^{ns}	0,994	0,23 ^{ns}	0,999

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
Ψ_{am} (MPa)	-0,714 (\pm 0,042)	-0,707 (\pm 0,051)	-0,969 (\pm 0,050)	-0,932 (\pm 0,054)
Ψ_{md} (MPa)	-1,421 (\pm 0,059)	-1,376 (\pm 0,052)	-1,705 (\pm 0,068)	-1,662 (\pm 0,057)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

Em média, os tratamentos com capina apresentaram os maiores valores dos potenciais hídricos medidos. Quando comparados os potenciais hídricos dentro de cada regime hídrico adotado, foram observadas reduções em Ψ_{am} e Ψ_{md} da ordem de 0,1% e 3,3% de Gly para Cap e de 3,9% e 2,6% de Gly+RH para Cap+RH, respectivamente. Na mesma comparação, mas agora dentro dos métodos de controle de plantas daninhas, houve decréscimo de 26,3% e 16,7% de Gly para Gly+RH e de 24,1% e 17,2% de Cap para Cap+RH (Tabela 4).

O fato de Ψ_{md} ser menor que Ψ_{am} é devido serem as condições ambientais mais propícias à desidratação excessiva do tecido foliar, visto que a planta perde água a uma taxa superior à sua capacidade de absorção e transporte, levando ao fechamento estomático e à redução da fotossíntese

como tentativa de evitar que o Ψ desça abaixo dos níveis considerados críticos (Costa e Marengo, 2007). Somando-se a essas condições, em situação de baixa disponibilidade de água no solo, Ψ_{am} e Ψ_{md} podem ser reduzidos ainda mais, como no caso dos tratamentos sob restrição hídrica (Tabela 4).

Bono et al. (2001) classificaram em três intervalos representativos as condições hídricas nos níveis $\Psi < -1,5$ MPa como alto déficit, Ψ entre $-1,5$ e $-0,8$ MPa como médio déficit e $\Psi > -0,8$ MPa como sem condição de déficit hídrico, sendo que Ψ_{am} de Gly e Cap pode ser classificado como sem condição de déficit hídrico, Ψ_{am} de Gly+RH e Cap+RH e Ψ_{md} de Gly e Cap como médio déficit hídrico e Ψ_{md} de Gly+RH e Cap+RH como alto déficit hídrico, refletindo o efeito das condições ambientais e da umidade do solo nos tratamentos estudados.

Para melhor elucidar as variações médias diárias em Ψ_{am} e Ψ_{md} de cada tratamento, na Figura 4 podem ser observadas as médias diárias durante os períodos avaliados.

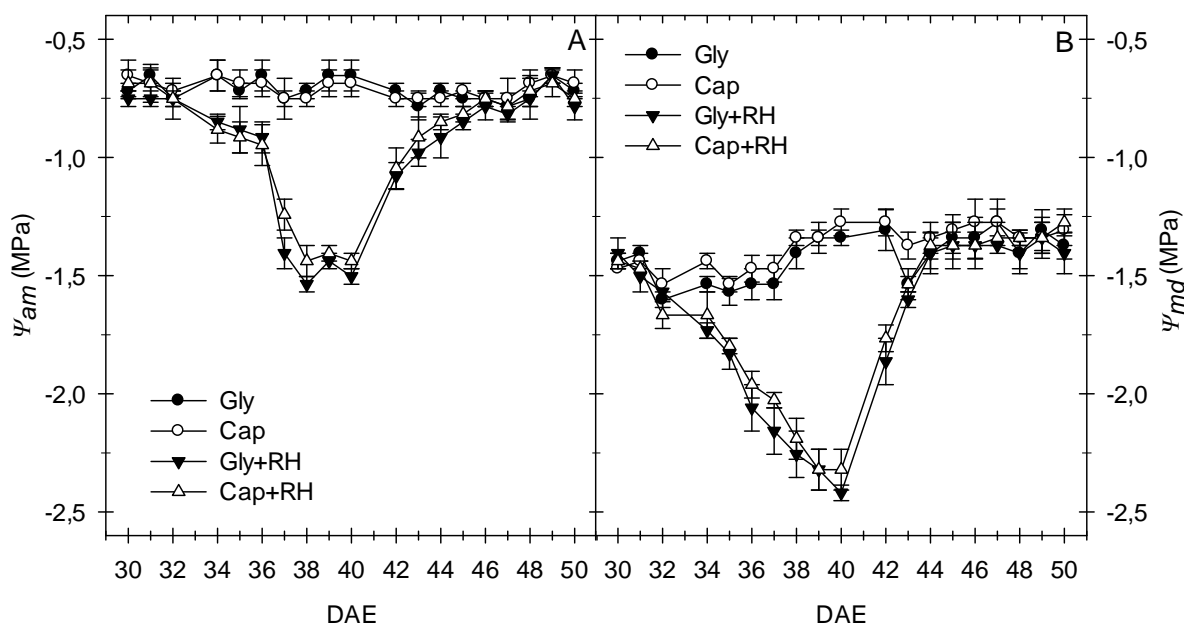


FIGURA 4. Média (\pm EP; $n = 3$ plantas por tratamento) do potencial hídrico foliar na antemanhã (Ψ_{am}) (A) e do potencial hídrico foliar ao meio-dia (Ψ_{md}) (B) da soja TMG 115 RR.

O maior valor de Ψ_{am} , alcançado durante o período de avaliação, foi de -0,65 MPa e ocorreu no 30° DAE, durante o período em que todos os tratamentos estavam sendo irrigados, voltando a se repetir no 34° e 49° DAE, apenas para os tratamentos sem restrição hídrica. De forma contrária, o menor valor de Ψ_{am} , próximo de -1,54 MPa, atribuído ao tratamento Gly+RH, ocorreu no 38° DAE. Para Ψ_{md} , os picos máximos ocorreram no 40° e 42° DAE para Cap, com valores iguais a -1,27 MPa, sendo o valor mínimo de -2,42 MPa, observado no 40° DAE para o tratamento Gly+RH (Figura 4). Os intervalos de valores do potencial hídrico foliar encontrados nesse trabalho ficaram muito próximos dos apresentados por Allen Jr et al. (1998), Liu et al. (2004), Lei et al. (2006) e Firmano et al. (2009), ao estudarem o efeito do déficit hídrico em parâmetros fisiológicos de soja. No entanto, Likoswe e Lawn (2008), trabalhando com respostas de diferentes espécies leguminosas ao déficit hídrico acentuado, encontraram valores de Ψ para soja de até -3,1 MPa.

Após o período de retomada da irrigação (41° DAE), os valores de Ψ_{am} e Ψ_{md} , para ambos os tratamentos sob restrição hídrica, voltaram a subir e não mais diferiram dos tratamentos irrigados (Figura 4). Da mesma forma, Lei et al. (2006) observaram que a soja, mesmo com valores de Ψ próximos de -2,5 MPa, pode retomar rapidamente sua condição hídrica foliar após reidratação e, conseqüentemente, os processos fotossintéticos e ecofisiológicos.

Com relação às diferenças no Ψ entre os tratamentos com glyphosate e capina, as plantas, ao detectarem sinais de seca, produzem substâncias químicas que são transportadas para a parte aérea (Ku et al., 2013), buscando mecanismos de tolerância como o ajuste osmótico, para que a célula absorva água e mantenha o potencial de pressão em níveis adequados (Vieira Júnior et al., 2007). Sabe-se que o aumento na concentração citosólica de Ca^{+2} nas células-guarda está envolvido no processo de fechamento estomático (Lei et al., 2006). Portanto, reduções na concentração desse elemento poderiam afetar o funcionamento de tal

processo (Wang et al., 2012). O glyphosate, ao exercer a sua característica de quelante (Zobiolo et al., 2011), pode dificultar o transporte de Ca^{+2} na planta e sua imobilização (Cakmak et al., 2009), favorecendo ainda mais a redução no potencial hídrico foliar.

2.3.4 Intercâmbio gasoso

A análise de variância indicou significância entre a interação método de controle de plantas daninhas e regime hídrico ($W \times C$) somente para os parâmetros do intercâmbio gasoso taxa fotossintética (A) e relação entre a concentração interna e a concentração ambiente de CO_2 (C_i/C_a), evidenciando interdependência dos fatores em estudo. Quanto à condutância estomática (g_s) e à eficiência instantânea no uso da água (A/E), foi observado efeito significativo no fator regime hídrico e método de controle de plantas daninhas (Tabela 5), mesmo g_s apresentando valores de p (0,051) muito próximos da significância para a interação $W \times C$.

TABELA 5. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo das variáveis do intercâmbio gasoso para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.

Causas de variação*	A		C _i /C _a		g _s		A/E	
	F	p	F	p	F	p	F	p
R. hídrico (W)	441,13	<0,01	99,24	<0,01	142,72	<0,01	17,27	<0,01
Controle (C)	1,05 ^{ns}	0,33	106,79	<0,01	82,61	<0,01	21,82	<0,01
Tempo (t)	13,29	<0,01	22,98	<0,01	18,39	<0,01	5,28	<0,01
W x C	21,30	<0,01	6,92	<0,01	4,83 ^{ns}	0,051	0,01 ^{ns}	0,92
W x t	20,81	<0,01	9,76	<0,01	7,32	<0,01	4,28	<0,01
C x t	0,46 ^{ns}	0,96	1,80	0,02	0,71 ^{ns}	0,79	2,08	<0,01
W x C x t	0,56 ^{ns}	0,92	1,33 ^{ns}	0,17	1,45 ^{ns}	0,11	1,07 ^{ns}	0,387

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
A ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	22,19 ($\pm 0,55$)	21,42 ($\pm 0,52$)	18,70 ($\pm 0,69$)	19,19 ($\pm 0,73$)
C _i /C _a	0,76 ($\pm 0,01$)	0,73 ($\pm 0,02$)	0,73 ($\pm 0,02$)	0,69 ($\pm 0,02$)
g _s ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	0,81 ($\pm 0,07$)	0,65 ($\pm 0,08$)	0,62 ($\pm 0,07$)	0,52 ($\pm 0,06$)
A/E ($\mu\text{mol mmol}^{-1}$)	2,28 ($\pm 0,14$)	2,52 ($\pm 0,24$)	2,49 ($\pm 0,19$)	2,72 ($\pm 0,16$)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

Analisando a variação média da A, C_i/C_a, g_s e A/E da soja TMG 115 RR, ao longo do período de avaliação do intercâmbio gasoso (Figura 5), observa-se que, a partir do primeiro dia após a aplicação do glyphosate e realização da capina (33 DAE), o tratamento Gly apresentou, em média, os maiores valores de A, C_i/C_a, g_s e o menor valor de A/E até, aproximadamente, o 46^o DAE. No entanto, em condições de restrição hídrica, o tratamento capinado (Cap+RH) apresentou maiores A e A/E e menores g_s e C_i/C_a que com glyphosate (Gly+RH).

Em média, a A de Gly foi 3,6%, 18,7% e 15,6% superior à A de Cap, Gly+RH e Cap+RH, respectivamente. Da mesma forma, a relação C_i/C_a de

Gly também foi 4,2% superior à de Cap e de Gly+RH e 5,8% superior à de Cap+RH. Para a variável g_s , Gly apresentou valores 24,6%, 30,6 e 55,8% à Cap, Gly+RH e Cap+RH, respectivamente. No entanto, para A/E , o maior valor médio encontrado foi para o tratamento Cap+RH, 19,3%, 7,9% e 9,2% maior que de Gly, Cap e Gly+RH, respectivamente (Tabela 5, Figura 5).

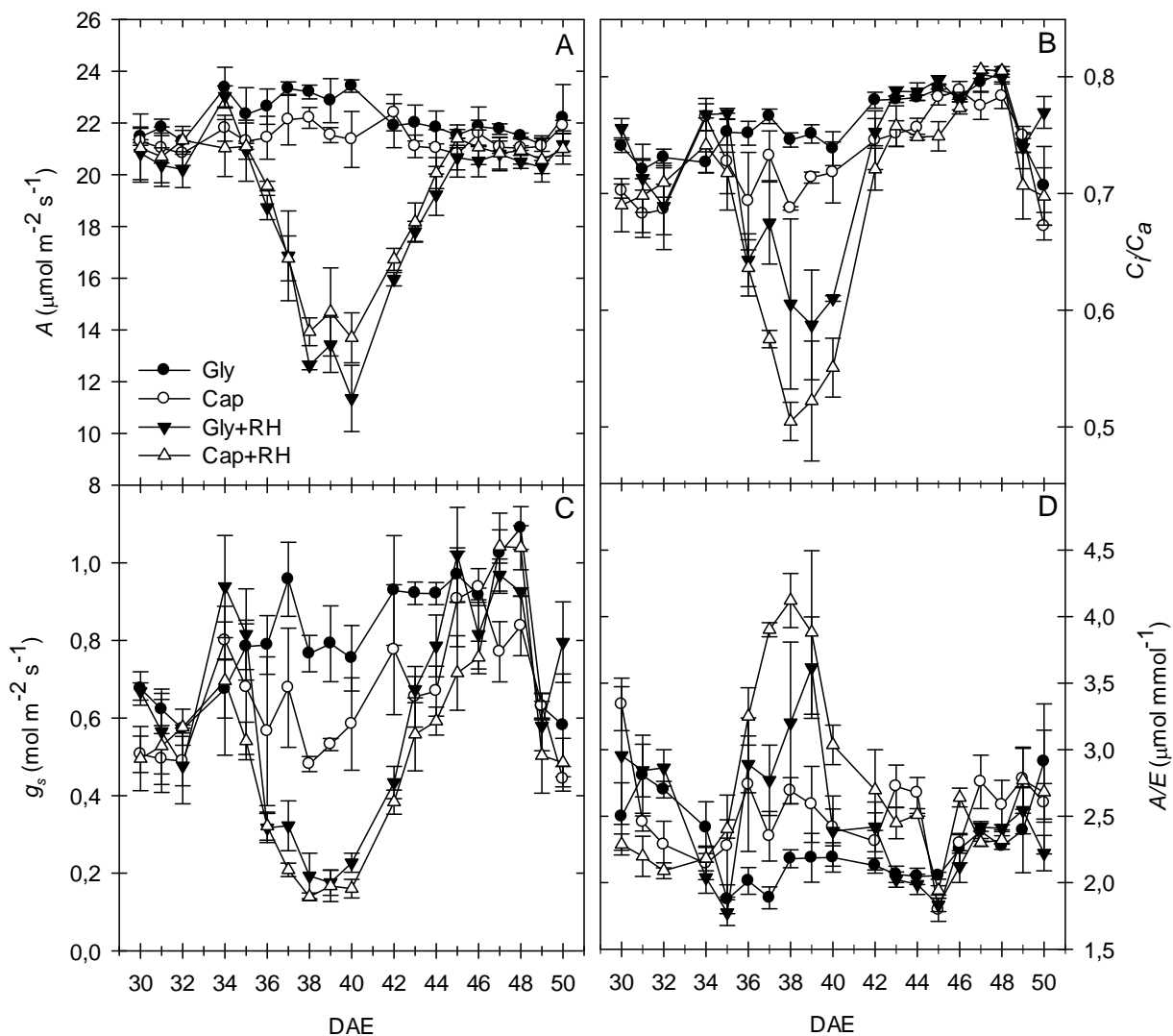


FIGURA 5. Média (\pm EP; $n = 3$ plantas por tratamento) da taxa fotossintética (A), relação entre a concentração interna e a concentração ambiente de CO_2 (C_i/C_a) (B), condutância estomática (C) e eficiência instantânea no uso da água (D) da soja TMG 115 RR.

Após a retomada da irrigação (41 DAE), as diferenças entre as variáveis do intercâmbio gasoso dos tratamentos submetidos à restrição hídrica com as dos tratamentos irrigados foram diminuindo gradativamente até não mais serem observadas. Lei et al. (2006) afirmam que os processos fisiológicos da soja, tais como fotossíntese e transpiração, podem se recuperar rapidamente após a remoção do estresse hídrico. Para 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 e, geralmente, plantas submetidas a estresse hídrico severo apresentam recuperação de apenas 40–60% da taxa fotossintética máxima no dia seguinte.

Na planta, após uma longa fase lenta de penetração, o glyphosate é rapidamente translocado e tende a se concentrar em regiões com alta atividade metabólica e meristemática (Arregui et al., 2003), principalmente durante um período de até 14 dias após sua aplicação (Bariuan et al., 1999).

Esta situação poderia proporcionar as diferenças apresentadas entre os tratamentos, com destaque para os primeiros dias de avaliação (Tabela 5 e Figura 5), por um possível efeito estomático na soja RR que o glyphosate tenha causado, independentemente do regime hídrico adotado.

Em alguns trabalhos feitos tanto em casa de vegetação quanto em campo, pesquisadores diagnosticaram efeito do glyphosate na redução da taxa fotossintética em soja RR (Bohm et al., 2009; Zobiolo et al., 2010a, 2010d, 2012). Em parte, atribui-se essa redução ao forte efeito quelante do glyphosate sobre a imobilização de micronutrientes essenciais (Coutinho e Mazo, 2005; Zobiolo et al., 2011) como o Mn, que é cofator enzimático da proteína D1 do fotossistema II, responsável pela oxidação da água; o Fe, que é cofator da flavoproteína ferredoxina-NADP redutase, responsável pela síntese de NADPH e também requerido na síntese da clorofila; e o Zn, que, em muitas espécies, é requerido para a síntese de clorofila (Taiz e Zeiger, 2013).

O glyphosate afeta a síntese de clorofila também pelos seus efeitos deletérios na síntese de seu precursor, o ácido aminolevulínico (ALA)

(Kitchen et al., 1981; Siqueira et al., 1999), havendo evidências de que o efeito fitotóxico do ácido aminometilfosfônico (AMPA), metabólito formado na planta com a degradação do glyphosate, também seja o responsável pela redução do conteúdo de clorofila em soja RR, por um mecanismo não conhecido (Reddy et al. 2004), porém, chamado de “yellow flash” (Vyn et al., 2008). Por outro lado, também é preciso salientar o efeito quelante do glyphosate sobre o íon Mg (Coutinho e Mazo, 2005; Cakmak et al., 2009) que é elemento constitutivo da molécula de clorofila (Taiz e Zeiger, 2013).

No caso dos outros pigmentos cloroplastídicos, os carotenoides, o glyphosate também reduz seu conteúdo em algas (Hernando et al., 1989; Doddaiyah et al., 2011) e em plantas não modificadas geneticamente (Abu-Irmaileh e Jordan, 1978; Villanueva et al., 1985; Muñoz Rueda et al., 1986; El-Hattab et al. 1987; Kim et al., 2004; Meschede et al., 2011), contudo, praticamente não existe qualquer informação para plantas modificadas geneticamente resistentes ao glyphosate. O mecanismo pelo qual se verifica a redução nos teores dos carotenoides pela ação do glyphosate também não está explicado.

Cabe aqui ressaltar que os carotenoides contribuem para a estabilidade das clorofilas e do sistema fotossintético como um todo, por sua ação fotoprotetora com a dissipação de excedente energético evitando a formação de espécies reativas de oxigênio (Johnson et al. 2007; Ramel et al., 2012a; 2012b; 2013; Taiz e Zeiger, 2013). Nesse sentido, o efeito da redução no teor de clorofila determinado pelo glyphosate pode também ser decorrente de uma redução precedente dos níveis de carotenoides.

Por outro lado, o efeito do glyphosate sobre a abertura estomática afetando o processo fotossintético já é mais difícil de ser interpretado, devido às diferentes possibilidades de resposta.

O processo de abertura e fechamento dos estômatos está relacionado principalmente com a intensidade de luz e o estado de hidratação da folha (Costa e Marengo, 2007). Dessa forma, o funcionamento dos estômatos influencia a atividade fotossintética e, conseqüentemente, a produtividade do vegetal.

Sabe-se que os estômatos respondem à luz de duas formas. Num primeiro momento, nas membranas plasmáticas das células-guarda, a luz azul ativa uma bomba protônica (ATPase) que acidifica o apoplasto, criando um gradiente de carga e de pH entre estas células e o meio externo. Tal ativação tem início com a percepção da luz azul pelo fotorreceptor, sendo à zeaxantina atualmente atribuído esse papel (Tallman et al., 1997; Zeiger e Zhu, 1998; Zeiger et al., 2002), seguindo-se uma cadeia de transdução do sinal até chegar à ATPase. O gradiente de carga e pH entre as células-guarda e o apoplasto criado pela ATPase determina um mecanismo de transporte secundário, no qual o íon K entra nas células-guarda através de canais iônicos que se abrem naquelas condições, sendo este íon responsável pela redução do potencial hídrico das células-guarda, o que faz com que a água entre nessas células causando a abertura estomática (Taiz e Zeiger, 2013). Aparentemente, o íon K não sofre tanto o efeito quelante do glyphosate (Cakmak et al., 2009).

Sob condições de restrição hídrica no solo e/ou elevada demanda evaporativa da atmosfera, o ácido abscísico (ABA) é sintetizado na raiz e transportado até as folhas onde causa redução na abertura ou o completo fechamento dos estômatos (Finkelstein et al., 2002; Paiva et al., 2005; Li et al., 2006; Taiz e Zieger, 2009; Ache et al., 2010; Damour et al., 2010; Kim et al., 2010). O ABA promove aumento da concentração do Ca no citossol das células-guarda tanto pelo influxo desse íon para o interior destas células quanto pela mobilização do Ca do vacúolo destas células para o citossol. Esse fenômeno faz com que a membrana citoplasmática das células-guarda fique despolarizada, causando o fechamento dos canais iônicos para entrada do K e a abertura dos canais iônicos para a saída de K nestas células, fechando os estômatos (Taiz e Zeiger, 2013). Sabe-se que o Ca é fortemente quelado pelo glyphosate (Coutinho e Mazo, 2005; Zobiolo et al., 2011; Duke et al., 2012). Num segundo momento, a abertura estomática que tem início com o mecanismo mediado pelo íon K, só pode ser mantida em função do aumento na concentração dos açúcares provenientes da fotossíntese das próprias células-guarda (Taiz e Zeiger, 2013) e, como já foi

mencionado, há várias possibilidades de o glyphosate agir negativamente sobre a etapa fotoquímica da fotossíntese obviamente também dessas células. Há também que se mencionar o fato de que a biossíntese do ABA tem os carotenoides como precursores (Milborrow, 2001; Taiz e Zeiger, 2013) e como há evidências de que o glyphosate promova a redução dos níveis de carotenoides, então, nesses casos, os níveis de ABA também podem ficar comprometidos.

Portanto, não é de se estranhar que possam existir até mesmo contradições na avaliação do efeito do glyphosate sobre a fotossíntese, uma vez que as respostas fisiológicas podem ter um forte componente específico, dependendo do material vegetal que se esteja estudando.

Isso explicaria os resultados obtidos por Ferronato (2010), que verificou aumento no consumo de água pelas plantas de soja RR tratadas com esse herbicida em relação ao tratamento capinado, em três cultivos em campo, feitos entre os anos de 2007 e 2009. Em seu trabalho, Ferronato (2010) não verificou diferença significativa no índice de área foliar entre plantas tratadas e não tratadas com glyphosate. Assim, surge o indício de que o aumento do consumo de água pelas plantas tratadas com glyphosate foi mediada por um aumento na condutância estomática.

Neste trabalho, o efeito do glyphosate no controle parcial dos estômatos é visível na variação em A entre os tratamentos dentro de cada regime hídrico adotado, visto que essa variável apresentou padrões similares à g_s , e, conseqüentemente, à C_i/C_a (Figura 5). Em condições normais de cultivo, um aumento em g_s , que regula as trocas gasosas, pode permitir um aumento na absorção de CO_2 e, conseqüentemente, em A (Kasumi et al., 2012). No entanto, durante o estresse hídrico, a redução da A deve-se à redução na disponibilidade de CO_2 no interior da folha, causada pelo fechamento dos estômatos em resposta à redução da disponibilidade de água no solo.

Pelas Figuras 5 e 6, pode-se verificar que, para o tratamento Gly, o glyphosate proporcionou aumento significativo em A em relação aos demais tratamentos, inclusive à Cap, principalmente nos primeiros dias após a

aplicação do herbicida. Porém, em condições de restrição hídrica o efeito foi contrário, com ênfase para os dias entre o 38° e o 40° DAE, mas não foi suficiente para gerar diferença significativa entre os tratamentos com restrição hídrica.

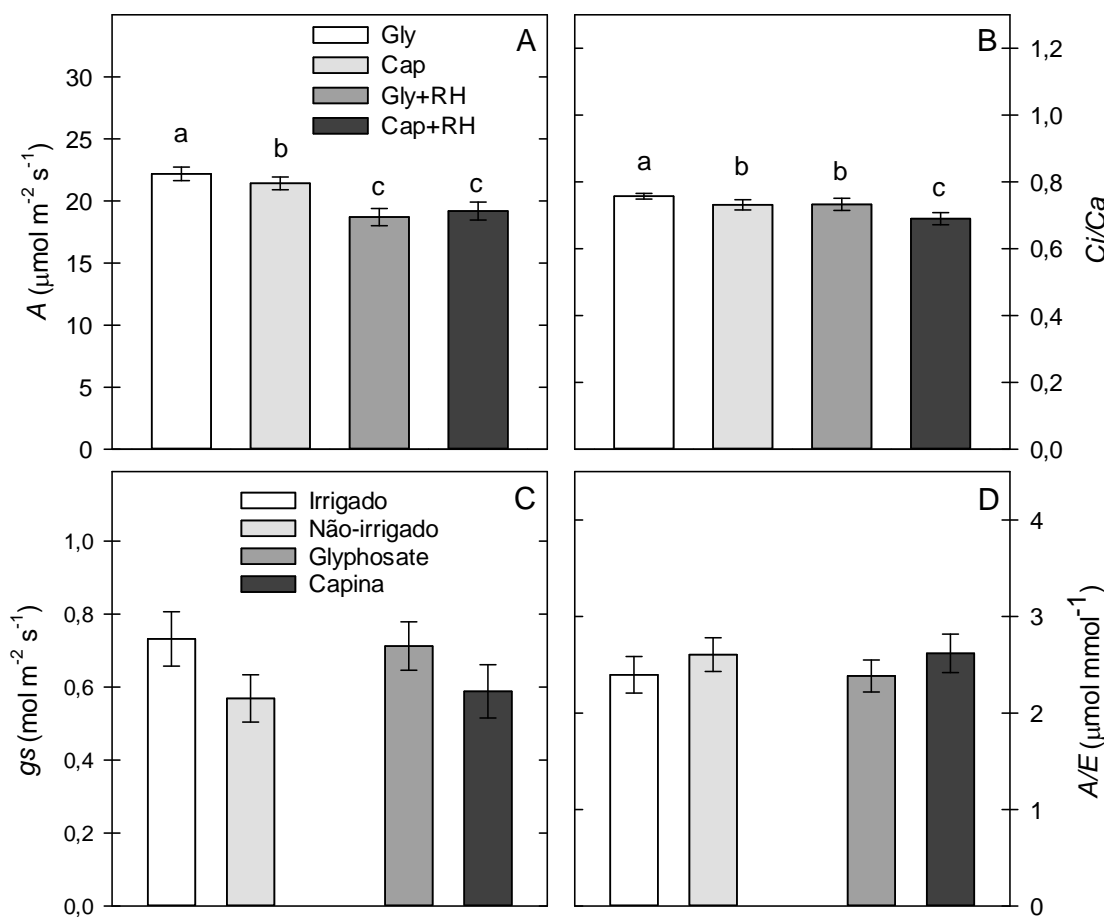


FIGURA 6. Média do período de avaliação do intercâmbio gasoso para a taxa fotossintética (A) e relação entre a concentração interna e a concentração ambiente de CO_2 (B) (\pm EP; $n = 3$ plantas por tratamento), e da condutância estomática (C) e eficiência instantânea no uso da água (D) (\pm EP; $n = 6$ plantas por tratamento) da soja TMG 115 RR. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Embora a A seja maior nos primeiros dias após a aplicação de glyphosate entre os tratamentos irrigados, esse resultado difere dos

encontrados por alguns autores (Zobiolo et al., 2010a, d), que também avaliaram o efeito do glyphosate no intercâmbio gasoso de soja RR, porém, em condições de vasos e em casa de vegetação. Cabe ressaltar que o cultivo em vasos pode provocar respostas fisiológicas incomuns e contraditórias àquelas obtidas em campo. Há trabalhos que ressaltam esse aspecto, como o desenvolvido por Ronchi et al. (2006), no qual os pesquisadores verificaram que, em mudas de café, a restrição radicular devida ao cultivo em vasos afetou negativamente a atividade de enzimas relacionadas ao metabolismo do carbono, com redução significativa das taxas fotossintéticas, justamente porque mesmo com níveis ótimos de N, as plantas apresentaram deficiência desse macronutriente.

Influenciando diretamente a A , a g_s também foi maior nos tratamentos que receberam a aplicação de glyphosate, independentemente do regime hídrico adotado (Figura 6). Como não houve interação significativa entre $W \times C$ (Tabela 5), tanto para g_s como para A/E , os dados foram agrupados e revelaram valores significativamente maiores de g_s para o controle de plantas daninhas com glyphosate ($0,71 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) do que com capina ($0,59 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 6). Entre os regimes hídricos, como já era esperado, o tratamento irrigado foi significativamente maior do que o tratamento com restrição hídrica, com valores médios de $0,71 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,57 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Condições ligadas ao ambiente podem levar ao fechamento estomático, como, por exemplo, baixa umidade do solo e dpv elevado (Lemos et al., 2012), com reflexos na redução em g_s (Likoswe e Lawn, 2008; Ku et al., 2013).

A relação entre a concentração interna e a concentração ambiente de CO_2 (C_i/C_a), como consequência de g_s , também foi afetada significativamente entre os tratamentos, durante quase todo o período de avaliação (Figura 5). O tratamento Gly foi o que apresentou o maior valor para essa variável (0,76), sendo significativamente superior aos demais tratamentos (Figura 6). Embora sob restrição hídrica, a C_i/C_a de Gly+RH (0,73) não diferiu de Cap (0,73), porém, ambos sendo superiores à de Cap+RH (0,69). Para manutenção da taxa de fotossíntese com a redução da

abertura estomática, há necessidade de maior eficiência em consumir o carbono que se encontra internamente ao mesofilo foliar e, assim, diminuir a razão C_i/C_a (Lemos et al., 2012). Neste caso, por conta do aumento na g_s provocado pelo glyphosate, houve aumento na C_i de Gly+RH, mas que não se traduziu em maior A , como ocorreu com Gly (Figura 5). Nas folhas, a principal entrada do CO_2 é o poro estomático, pois a cutícula foliar é praticamente impermeável a esse gás, sendo assim, o CO_2 se difunde do poro para a cavidade subestomática e, conseqüentemente, para os espaços intercelulares nas células do mesofilo (Taiz e Zeiger, 2013). Mas quando a planta perde água a uma taxa superior à sua capacidade de absorção e transporte, presume-se que a g_s deveria diminuir a ponto de evitar o decréscimo no potencial hídrico da folha abaixo de níveis considerados críticos para a estabilidade do sistema de transporte de água, levando ao fechamento dos estômatos (Costa e Marengo, 2007), o que não aconteceu com Gly+RH se comparado à Cap+RH. Yanniccari et al. (2012) observaram que a g_s foi o principal parâmetro das trocas gasosas afetado pelo glyphosate e que as variações em g_s não parecem ser mediadas nem pela C_i , indicando, inclusive, efeito direto do herbicida no funcionamento das células-guarda.

Do ponto de vista da eficiência do uso da água (A/E), os tratamentos que receberam aplicação de glyphosate obtiveram pior desempenho em relação aos tratamentos capinados, dentro de cada regime hídrico adotado (Figura 5). Em média, o valor agrupado de A/E dos tratamentos com glyphosate ($2,39 \mu\text{mol mmol}^{-1}$) foi 9,9% inferior ao valor dos tratamentos capinados ($2,62 \mu\text{mol mmol}^{-1}$) e ao dos tratamentos irrigados ($2,24 \mu\text{mol mmol}^{-1}$) e 16,3% inferior ao valor dos tratamentos sob restrição hídrica ($2,61 \mu\text{mol mmol}^{-1}$) (Figura 6).

O uso mais eficiente da água está diretamente relacionado ao tempo de abertura estomática, pois, enquanto a planta absorve CO_2 para a fotossíntese, a água é perdida por transpiração, com intensidade variável, dependendo do gradiente de potencial entre a superfície foliar e a atmosfera, seguindo uma corrente de potenciais hídricos (Concenço et al., 2007). Além

disso, plantas sob deficiência hídrica moderada frequentemente apresentam aumento na eficiência do uso da água, uma vez que uma redução apenas parcial da abertura estomática limita mais fortemente a transpiração do que a entrada de CO₂ (Firmano et al., 2009).

Porém, como os tratamentos com glyphosate apresentaram maiores g_s , esse fenômeno acabou se refletindo em menores valores de A/E . Além de interferir no controle estomático por atuar como forte quelante (Eker et al., 2006; Zobiolo et al., 2011) e na síntese de pigmentos cloroplastídicos (Reddy et al., 2004), outros fatores como estresse hídrico, alta luminosidade e temperatura podem também afetar a resistência de algumas cultivares de soja RR ao glyphosate (Pline et al., 1999; King et al., 2001), corroborando o desbalanço no intercâmbio gasoso, conforme observado principalmente em Gly+RH.

2.3.5 Rendimento de grãos e evapotranspiração

Embora o glyphosate tenha proporcionado maior taxa fotossintética líquida em condições hídricas adequadas (Figura 6), isso não foi suficiente para gerar uma diferença significativa para a variável rendimento de grãos entre os tratamentos com glyphosate e capina, mas apenas entre os regimes hídricos, sendo esse último caso já esperado (Tabela 6). No entanto, o efeito do herbicida no intercâmbio gasoso da soja TMG 115 RR foi suficiente para gerar uma diferença significativa no consumo total de água pela cultura entre os diferentes métodos de controle de plantas daninhas adotados. Vale ressaltar que não foram encontradas diferenças significativas entre os dados de IAF de dentro e fora dos lisímetros para cada tratamento (dados não apresentados).

TABELA 6. Resultados da ANOVA de dois fatores dos componentes rendimento de grãos (kg ha^{-1}) e evapotranspiração (mm), para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W) e a interação CxW. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.

Causas de variação*	Rendimento grãos (kg ha^{-1})		Evapotranspiração (mm)	
	F	p	F	p
R. Hídrico (W)	9,60	0,015	4,85 ^{ns}	0,059
Controle (C)	0,28 ^{ns}	0,608	7,66	0,024
W x C	3,29 ^{ns}	0,107	0,03 ^{ns}	0,859

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
Rendimento grãos (kg ha^{-1})	5682,98 (\pm 211,11)	5417,06 (\pm 143,72)	4662,03 (\pm 141,44)	5149,77 (\pm 234,98)
Evapotranspiração (mm)	651,67 (\pm 8,27)	608,57 (\pm 4,26)	616,84 (\pm 19,82)	579,07 (\pm 19,33)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

Ao analisar os resultados da ANOVA para a variável rendimento de grãos, foram observados valores médios de $5.550,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de grãos de soja para os tratamentos irrigados, 12,1% acima dos tratamentos sob restrição hídrica ($4.905,9 \text{ kg ha}^{-1}$) (Figura 7). Essa diferença poderia ter sido maior caso a irrigação fosse paralisada em outro período de desenvolvimento da cultura, visto que a soja é particularmente sensível à deficiência hídrica durante a emergência das plântulas e na fase de florescimento e enchimento de grãos (Kron et al., 2008; Firmano et al., 2009).

Sabe-se que o estresse hídrico é o maior fator limitante para as culturas (Sausen e Rosa, 2010). Na soja, essa redução no rendimento de grãos sob condições de déficit hídrico é causada principalmente pela diminuição no número de vagens por planta, número de grãos por vagem e peso final de grãos (Ohashi et al., 2009; Masouni et al., 2011), como consequência do fechamento estomático, decréscimo na expansão foliar, na

taxa fotossintética líquida e na redução na quantidade de fotossintatos exportados aos órgãos reprodutivos (Liu et al., 2004; Liu et al., 2005).

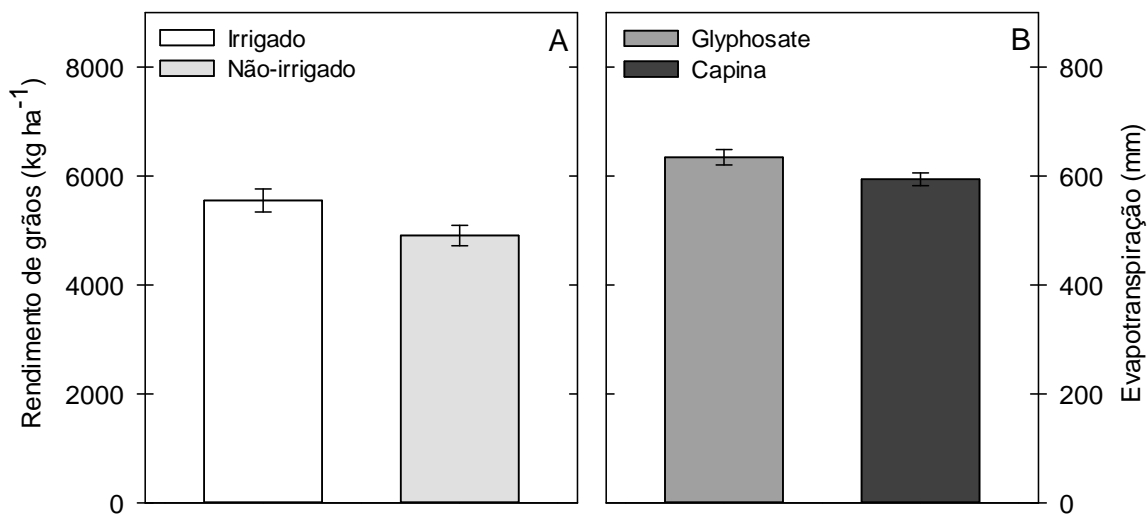


FIGURA 7. Média (\pm EP; n = 6 plantas por tratamento) do rendimento de grãos (A) e da evapotranspiração (B) da soja TMG 115 RR.

Embora não significativo, Gly produziu 4,9% a mais que Cap, porém, Gly+RH foi 10,5% menos produtivo que Cap+RH (Tabela 6). Em condições normais de cultivo, Bennett et al. (1998), Hofer et al. (1998) e Nelson e Renner (1999) citam que a soja RR pode produzir a mesma quantidade ou até mais que quando tratada em sistema convencional, sem o glyphosate.

De forma semelhante ao apresentado neste trabalho (Figura 7), Agostinetto et al. (2009) observaram que produtividade de grãos da cultura da soja não foi afetada pelo herbicida glyphosate, independentemente da formulação ou dose, comparativamente à testemunha capinada. Outros trabalhos também têm demonstrado que o uso de glyphosate em soja RR não interferiu na produtividade de grãos da cultura (Elmore et al., 2001a; Reddy e Zablatowing, 2003; Correia e Durigan, 2007; Zablotowicz e Reddy, 2007; Correia et al., 2008; Franco et al., 2012).

No entanto, assim como aconteceu com Gly+RH, alguns estudos também reportaram redução na produção de grãos de soja sob condições de

estresse, com o baixo aproveitamento de água por certas cultivares de soja geneticamente modificadas (Elmore et al., 2001b). Menor produtividade de grãos também pode estar associada a injúrias causadas por certos tipos de formulação do herbicida, como no caso da aplicação de um sal de isopropilamina (Santos et al., 2007), sintomas estes não observados neste experimento.

Com relação à evapotranspiração, houve efeito significativo do fator controle para essa variável, tendo a utilização do glyphosate proporcionado aumento médio no consumo de água de 6,8% em relação aos tratamentos capinados (Tabela 6, Figura 7). Esse fato pode estar relacionado com o aumento nas taxas de g_s , sendo seguido pela diminuição na A/E , conforme Tabela 5 e Figura 5.

A soja necessita, em média, de 750 g de água por g matéria seca produzida (Baptista et al., 2001), com variação no consumo de água durante todo o desenvolvimento da cultura de 450 a 800 mm, dependendo do ciclo da cultivar (Embrapa, 2007), o que poderia ser aumentado com a utilização de glyphosate em soja RR. Como consequência dessa maior demanda por água (Figura 7), e da tendência em diminuir a produção de biomassa e grãos em condições limitadas de água no solo (King et al., 2001), a produção de soja pode ser reduzida ainda mais em anos em que acontecem períodos prolongados de estiagem, conhecidos por “veranicos” (Hernandez et al., 2003; Cerdeira et al., 2010).

Esse resultado corrobora o encontrado por Zobiolo et al. (2010a, 2011), que também sugerem que a soja RR seja mais sensível à seca e menos eficiente em converter água em biomassa sob aplicação de glyphosate, quando comparada com a soja RR não tratada com esse herbicida.

2.4 CONCLUSÕES

Não houve diferença no índice de área foliar da cultura pela utilização do herbicida glyphosate, em condições hídricas adequadas. Em

contrapartida, a matéria seca total foi afetada negativamente pelo herbicida ao se submeter a soja à restrição hídrica.

De forma geral, embora não significativo, tanto o potencial hídrico antemanhã quanto o meio-dia apresentaram tendência de redução nos seus valores pelo uso do glyphosate em comparação aos tratamentos capinados.

Para o intercâmbio gasoso, houve efeito estomático do glyphosate, observado pelo aumento na condutância estomática, na relação entre a concentração interna e ambiente de CO₂ e pela redução na eficiência instantânea no uso da água. Sem interromper a irrigação, houve incrementos na taxa fotossintética líquida, sendo observado efeito contrário em condições de restrição hídrica.

O rendimento de grãos não foi afetado pelos diferentes métodos de controle de plantas daninhas empregados, apenas pela restrição hídrica imposta no período vegetativo da cultura. Porém, houve aumento significativo no consumo final de água pela aplicação de glyphosate na soja RR.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-IRMAILEH, B.E.; JORDAN, L.S. Some aspects of glyphosate action in Purple Nutsedge (*Cyperus rotundus*). **Weed Science**, v. 26, p.700-703, 1978.

ACHE, P.; BAUER, H.; KOLLIST, H.; AL-RASHEID, K.A.S.; LAUTNER, S.; HARTUNG, W.; HEDRICH, R. Stomatal action directly feeds back on leaf turgor: new insights into the regulation of the plant water status from non-invasive pressures probe measurements. **The Plant Journal**, v. 62, p.072-1082, 2010.

AGOSTINETTO, D.; TIRONI, S.P.; GALON, L.; DAL MAGRO, T. Desempenho de Formulações e Doses de Glyphosate em Soja Transgênica. **Revista Tropica**, v.3, n.2, p.35-41, 2009.

ALLEN JR, L.H.; VALLE, R.R.; JONES, J.W.; JONES, P.H. Soybean leaf water potential responses to carbon dioxide and drought. **Agronomy Journal**, v.90, p.375-383, 1998.

ALONSO, D.G.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA JR., R.S.; BIFFE, D.F.; RAIMONDI, M.A.; GEMELLI, A.; BLAINSKI, E.; CARNEIRO, J.C. Selectivity

of glyphosate in mixtures for RR soybean in sequential applications with mixtures only in the first or second application. **Planta Daninha**, v.28, n.4, p. 865-875, 2010.

ANTUNES JUNIOR, M.Z.; LOBO, F.A.; DALMAGRO, H.J.; VOURLITIS, G.; RODRÍGUEZ ORTÍZ, C.E.; DALMOLIN, A.C.; LUCENA, I.C.; SULI, G.S. Efeito do microclima no intercâmbio gasoso potencial de cambará (*Vochysia divergens* Pohl) e lixeira (*Curatella americana* L.) em área de Cerrado. **Revista Brasileira de Biociências**. v.9, n.1, 77-85, 2011.

ARREGUI, M.C.; LENARDON, A.; SANCHEZ, D.; MAITRE, M.I.; SCOTTA, R.; ENRIQUE, S. Monitoring glyphosate residues in transgenic glyphosate-resistant soybean. **Pest Management Science**, v.60, p.163-166, 2003.

BAPTISTA, J.M.; ALMEIDA, M.C.; VIEIRA, P.; MOURA E SILVA, A.C.; RIBEIRO, R.; FERNANDO, R.M.; SERAFIM, A.; ALVES, I.; CAMEIRA, M.R. **Programa nacional para o uso eficiente da água**. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia, 2001. 212 p.

BARIUAN, J.V.; REDDY, K.N.; WILLS, G.D. Glyphosate injury, rainfastness, absorption, and translocation in purple nutsedge (*Cyperus rotundus*). **Weed Technol**, v.13, p.112-119, 1999.

BENNETT, A.C.; SHAW, D.R.; SCHRAER, S.M. 1998. Effect of conventional herbicide programs and irrigation on glyphosate-tolerant soybean yield. p. 270–271. **Anais...** Proc. Southern Weed Science Society. Southern Weed Sci. Soc., Champaign, IL.

BOHM, G.M.B.; GENOVESE, M.I.; PIGOSSO, G.; TRICHEZ, D.; ROMBALDI, C.V. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, p.192-197, 2008.

BOHM, G.M.B.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; XAVIER, G.R.; HAX, F.; ROMBALDI, C.V. Glyphosate and imazethapyr-induced effects on yield, nodule mass, and biological nitrogen fixation in field-grown glyphosate-resistant soybean. **Soil Biology & Biochemistry**, v.41, p.420-422, 2009.

BONO, L.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L.M.G.; FRANÇA, S.; RADIN, B.; SANTOS, A.O.; BERGONCI, J.I. Alterações no padrão de resposta à luz da condutância estomática do milho causadas pelo déficit hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.1, p. 27-34, 2001.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Comércio exterior brasileiro**. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em 13 de maio de 2013.

BULBOVAS, P.; SOUZA, S.R.; MORAES, R.M.; LUIZÃO, F.; ARTAXO, P.

Plântulas de soja 'Tracajá' expostas ao ozônio sob condições controladas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.5, p.641-646, 2007.

CAKMAK, I.; YAZICI, A.; TUTUS, Y.; OZTURK, L. Glyphosate reduced seed and leaf concentrations of calcium, manganese, magnesium, and iron in non-glyphosate resistant soybean. **European Journal of Agronomy**, v.31, p.114-119, 2009.

CERDEIRA, A.L.; GAZZIEIRO, D.L.P.; DUKE, S.O.; MATALLO, M.B. Agricultural impacts of glyphosate-resistant soybean cultivation in South America. **Agricultural and Food Chemistry**, 2010.

CONCENÇO, G.; FERREIRA, E.A.; FERREIRA, F.A.; SANTOS, J.B. Plasmodesmos: transporte simplástico de herbicidas na planta. **Planta Daninha**, v.25, n.2, p.423-432, 2007.

CORREIA, N.M.; DURIGAN, J.C. Seletividade de diferentes herbicidas à base de glyphosate a soja RR. **Planta Daninha**, v.25, n.2, p.375-379, 2007.

CORREIA, N.M.; DURIGAN, J.C. LEITE, G.J. Seletividade da soja transgênica tolerante ao glyphosate e eficácia de controle de *Commelina benghalensis* com herbicidas aplicados isolados e em misturas. **Bragantia**, v.67, n.3, p.663-671, 2008.

COSTA, G.F.; MARENCO, R.A. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapa guianensis*). *Acta Amazonica*, v.37, n.2, p.229-234, 2007.

COUTINHO, C.F.B.; MAZO, L.H. Complexos metálicos com o herbicida glifosato: revisão. **Química Nova**, v.28, p.1038-1045, 2005.

DAMOUR, G.; SIMONNEAU, T.; COCHARD, H.; URBAN, L. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. **Plant, Cell and Environment**, v. 33, p.1419-1438, 2010.

DECAGON DEVICES. **AccuPAR PAR/LAI ceptometer model LP-80**. Operator's manual. Version 1.2. Decagon Devices, Pullman, WA, 2004, 92p.

DINIZ, G.L.; FONSECA, M.; CAMPELO JÚNIOR, J.H. Análise harmônica do regime de precipitação em duas localidades da baixada cuiabana. **Biomatemática**, v.18, p.37-48, 2008.

DODDAIAH, K.M.; NARAYAN, A.; ASWATHANARAYANA, R.G.; RAVI, S. Effect of metabolic inhibitors on growth and carotenoid production in *Dunaliella bardawil*. **Journal of Food Science and Technology**, DOI 10.1007/s13197-011-0429-6

DUKE, S.O.; REDDY, K.N.; BU, K.; CIZDZIEL, J.V. Effects of Glyphosate on

the Mineral Content of Glyphosate-Resistant Soybeans (*Glycine max*). **Agricultural and Food Chemistry**, v.60, p.6764-6771, 2012.

EGLI, D.B.; BRUENING, W.P. Water stress, photosynthesis, seed sucrose levels and seed growth in soybean. **Journal of Agricultural Science**, v.142, p.1-8, 2004.

EKER, S.; OZTURK, L.; YAZICI, A.; ERENOGLU, B.; ROMHELD, V.; CAKMAK, I. Foliar-Applied Glyphosate Substantially Reduced Uptake and Transport of Iron and Manganese in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.54, p.10019-10025, 2006.

EL-HATTAB, A.H.; HASSAN, E.A.; SHABAN, SH.A.; ABO-EL SUOUD, M.R. Effect of some growth factors and glyphosate herbicide on pigments and protein in Faba Beans (*Vicia faba* L.). **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.158, p.250-258, 1987.

ELMORE, R.W.; ROETH, F.W.; KLEIN, R.N.; KNEZEVIC, S.Z.; MARTIN, A.; NELSON, L.A.; SHAPIRO, C.A. Glyphosate-Resistant Soybean Cultivar Response to Glyphosate. **Agronomy Journal**, v.93, p.404-407, 2001a.

ELMORE, R.W.; ROETH, F.W.; NELSON, L.A.; SHAPIRO, C.A.; KLEIN, R.N. Glyphosate-Resistant Soybean Cultivar Yields Compared with Sister Lines. **Agronomy Journal**, v.93, p.408-412, 2001b.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Ecofisiologia da Soja**. Londrina: **Embrapa Soja**, 2007, 9p. (Circular Técnica 48).

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Glifosato e a soja transgênica**. Londrina: **Embrapa Soja**, 2008, 4p. (Circular Técnica 60).

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: State University of Science and Technology, 1977. 11p. (Special report, 80).

FERRONATO, A. **Caracterização do crescimento, da eficiência no uso da água e da radiação da cultivar de soja TMG 115 RR sob tratamento com glifosato**. 125 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, UFMT, Mato Grosso, 2010.

FINKELSTEIN, R.R.; GAMPALA, S.S.L.; ROCK, C.D. Abscisic Acid Signaling in Seeds and Seedlings. **The Plant Cell**, v.14, S15-S45, 2002.

FIRMANO, R.S.; KUWAHARA, F.A.; SOUZA, G.M. Relação entre adubação fosfatada e deficiência hídrica em soja. **Ciência Rural**, v.39, n.7, p.1967-1973, 2009.

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.1-11, 2004.

FRANCO, D.A.S.; ALMEIDA, S.D.B.; CERDEIRA, A.L.; DUKE, S.O.; MORAES, R.M.; LACERDA, A.L.S.; MATALLO, M.B. Avaliação do uso de glyphosate em soja geneticamente modificada e sua relação com o ácido chiquímico. **Planta Daninha**, v.30, n.3, p.659-666, 2012.

FUNDAÇÃO MATO GROSSO. **Boletim de pesquisa de soja 2010**. Rondonópolis: Fundação MT, 2010. 418p.

HERNANDEZ, A.; GARCIA-PLAZAOLA, J.I.; BECERRIL, J.M. Glyphosate effects on phenolic metabolism of nodulated soybean (*Glycine max* L. Merr.). **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v.47, p.2920-2925, 1999.

HERNANDEZ, F.B.T.; SOUSA, S.A.V.; ZOCOLER, J.L.; FRIZZONE, J.A. Simulação e efeito de veranicos em culturas desenvolvidas na região de Palmeira d'Oeste, estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, v.23, n.1, p.21-30, 2003.

HERNANDO, F.; ROYUELA, M.; MUÑOZ-RUEDA, A.; GONZALEZ-MURUA, C. Effect of glyphosate on the greening process and photosynthetic metabolism in *Chlorella pyrenoidosa*. **Journal of Plant Physiology**, v.134, p.26-31, 1989.

HOFER, J.M.; PETERSON, D.E.; GORDON W.B.; STAGGENBORG, S.A.; FJELL, D.L. Yield potential and response of glyphosate-resistant soybean varieties to imidazolinone herbicides. In: PROC. NORTH CENTRAL WEED SCIENCE SOCIETY. **Anais...** North Central Cap Sci. Soc., Champaign, IL., 1998. p. 25–26.

JOHNSON, B.F.; BAILEY, W.A.; WILSON, H.P.; HOLSHOUSER, D.L.; HERBERT JR, D.A.; HINES, T.E. Herbicide effects on visible injury, leaf area, and yield of glyphosate-resistant soybean (*Glycine max*). **Weed Technology**, v.16, p.554-566, 2002.

JOHNSON, M.P.; HAVAUX, M.; Christian TRIANTAPHYLIDES, C.; KASAS, B.; PASCAL, A.A.; ROBERT, B.; DAVISON, P.A.; RUBAN, A.V.; HORTON, P. Elevated zeaxanthin bound to oligomeric LHCII enhances the resistance of *Arabidopsis* to photooxidative stress by a lipid-protective, antioxidant mechanism. **Journal of Biological Chemistry**, v.282, p.22605-22618, 2007.

KASUMI, K.; HIROTSUKA, S.; KUMAMARU, T.; IBA, K. Increased leaf photosynthesis caused by elevated stomatal conductance in a rice mutant deficient in SLAC1, a guard cell anion channel protein. **Journal of Experimental Botany**, v.63, n.15, p.5635-5644, 2012.

KIM, J.S.; YUN, B.W.; CHOI, J.S.; KIM, T.J.; KWAK, S.S.; CHO, K.W. Death mechanisms caused by carotenoid biosynthesis inhibitors in green and in undeveloped plant tissues. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.78, n.3, p.127-139, 2004.

KIM, T-H.; BÖHMER, M.; HU, H.; NISHIMURA, N.; SCHROEDER, J.I. Guard cell signal transduction network: advances in understanding abscisic acid, CO₂, and Ca²⁺ signaling. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p.561-591, 2010.

KING, C.A.; PURCELL, L.C.; VORIES, E.D. Plant growth and nitrogenase activity of glyphosate-tolerant soybean in response to foliar glyphosate applications. **Agronomy Journal**, v.93, p.179-186, 2001.

KITCHEN, L.M.; WITT, W.W.; RIECK, C.E. Inhibition of chlorophyll accumulation by glyphosate. **Weed Science**, v.29, p.513-516, 1981.

KLAHOLD, C.A.; GUIMARÃES, V.F.; ECHER, M.M.; KLAHOLD, A.; CONTIERO, R.L.; BECKER, A. Resposta da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) à ação de bioestimulante. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, n.2, p.179-185, 2006.

KRON, A.P.; SOUZA, G.M.; RIBEIRO, R.V. Water deficiency at different developmental stages of *Glycine max* can improve drought tolerance. **Bragantia**, v.67, n.1, p.43-49, 2008.

KU, Y.S.; YEUNG, W.K.A.; YUNG, Y.L.; LI, M.W.; WEN, C.Q.; LIU, X.; LAM, H.M. Drought Stress and Tolerance in Soybean. In: BOARD, J.E. (Ed.). **A Comprehensive Survey of International Soybean Research - Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships**. Rijeka, Croácia, 2013, p. 209-237.

LEI, W.; TONG, Z.; SHENGYAN, D. Effect of drought and rewatering on photosynthetic physioecological characteristics of soybean. **Acta Ecologica Sinica**, v.26, n.7, p.2073-2078, 2006.

LEITE, P.R.S.C.; MENDES, F.R.; PEREIRA, M.L.R.; LACERDA, M.J.R. Limitações da utilização da soja integral e farelo de soja na nutrição de frangos de corte. **Enciclopédia Biosfera**, v.8, n.15, p. 1138-1157, 2012.

LEMOES, J.P.; GALVÃO, J.C.C.; SILVA, A.A.; FONTANETTI, A.; CORRÊA, M.L.P.; CECON, P.R. Morfofisiologia de plantas de milho em competição com Picão-preto e Trapoeraba submetidas a roçada. **Planta Daninha**, v.30, n.3, p.487-496, 2012.

LI, S.G.; EUGSTER, W.; ASANUMA, J.; KOTANI, A.; DAVAA, G.; OYUNBAATAR, D.; SUGITA, M. Energy partitioning and its biophysical

controls above a grazing steppe in central Mongolia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.137, p.89-106, 2006.

LIU, L.; JENSEN, C.R.; ANDERSEN, M.N. Pod Set Related to Photosynthetic Rate and Endogenous ABA in Soybeans Subjected to Different Water Regimes and Exogenous ABA and BA at Early Reproductive Stages. **Annals of Botany**, v.94, p.405-411, 2004.

LIU, F.; ANDERSEN, M.N.; JACOBSEN, S.E.; JENSEN, C.R. Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during progressive soil drying. **Environmental and Experimental Botany**, v.54, p.33-40, 2005.

LIKOSWE, A.A.; LAWN, R.J. Response to terminal water deficit stress of cowpea, pigeonpea and soybean in pure stand and in competition. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.59, p.27-37, 2008.

MARTINS, J.D.; CARLESSO, R.; KNIES, A.E.; OLIVEIRA, Z.B.; BROETTO, T.; ROGRIGUES, G.J. Potencial hídrico foliar em milho submetido ao déficit hídrico, **Irriga**, v.15, n.3, p.324-334, 2010

MASOUMI, H.; DARVISH, F.; DANESHIAN, J.; NOURMOHAMMADI, G.; HABIBI, D. Chemical and biochemical responses of soybean (*Glycine max* L.) cultivars to water deficit stress. **Australian Journal of Crop Science**, v.5, n.5, p.544-553, 2011.

MESCHEDE, D.K.; VELINI, E.D.; CARBONARI, C.A.; SILVA, J.R.M. Alteração fisiológica da cana-de-açúcar pela aplicação de glyphosate e sulfometuron-methyl. **Planta Daninha**, v.29, n.2, p.413-419, 2011.

MELO JÚNIOR, H.B.; CAMARGO, R.; WENDLING, B. Sistema de plantio direto na conservação do solo e água e recuperação de áreas degradadas. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, n.12, p.1-17, 2011.

MILBORROW, B.V. The pathway of biosynthesis of abscisic acid in vascular plants: a review of the present state of knowledge of ABA biosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, v.52, p.1145-1164, 2001.

MUNÓZ-RUEDA, A.; GONZALES-MURUA, C.; BECERRIL, J.M.; SÁNCHEZ-DÍAZ, M.F. Effects of glyphosate [*N*-(phosphonomethyl)glycine] on photosynthetic pigments, stomatal response and photosynthetic electron transport in *Medicago sativa* and *Trifolium pretense*. **Physiologia Plantarum**, v.66, p.63-68, 1986.

NELSON, K.A.; RENNER, K.A. Weed management in wide and narrow-row glyphosate resistant soybean. **Journal of Production Agriculture**, v.12, p.460-465, 1999.

OHASHI, Y.; NAKAYAMA, N.; SANEOKA, H.; MOHAPATRA, P.K.; FUJITA, K. Differences in the responses of stem diameter and pod thickness to drought stress during the grain filling stage in soybean plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.31, p.271-277, 2009.

OLIVEIRA JR., R.S.; DVORANEN, E.C.; CONSTANTIN, CAVALIERI, S.D.; FRANCHINI, L.H.M.; RIOS, F.A.; BLAINSKI, E. Influência do glyphosate sobre a nodulação e o crescimento de cultivares de soja resistente ao glyphosate. **Planta Daninha**, v.26, n.4, p.831-843, 2008.

PAIVA, A.S.; FERNANDES, E.J.; RODRIGUES, T.J.D.; TURCO, J.E.P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.161-169, 2005.

PLINE, W.A.; WU, J.; HATZIOS, K. Effects of temperature and chemical additives on the response of transgenic herbicide-resistant soybeans to glufosinate and glyphosate applications. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.65, p.119-131, 1999.

PROCÓPIO, S.O.; PIRES, F.R.; MENEZES, C.C.E.; BARROSO, A.L.L.; MORAES, R.V.; SILVA, M.V.V.; QUEIROZ, R.G.; CARMO, M.L. Efeitos de dessecantes no controle de plantas daninhas na cultura da soja. **Planta Daninha**, v.24, n.1, p.193-197, 2006.

RAMEL, F.; BIRTIC, S.; GINIESD, C.; SOUBIGOU-TACONNAT, L.; TRIANTAPHYLIDÈS, C.; HAVAUX, M. Carotenoid oxidation products are stress signals that mediate gene responses to singlet oxygen in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.109, p.5535-5540, 2012a.

RAMEL, F.; BIRTIC, S.; CUINÉ, S.; TRIANTAPHYLIDÈS, C.; RAVANAT, J.-L.; HAVAUX, M. Chemical quenching of singlet oxygen by carotenoids in plants. **Plant Physiology**, v.158, p.1267-1278, 2012b.

RAMEL, F.; MIALOUNDAMA, A.S.; HAVAUX, M. Nonenzymic carotenoid oxidation and photooxidative stress signalling in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.64, p.799-805, 2013.

REDDY, K.N.; HOAGLAND, R.E.; ZABLOTOWICZ, R.M. Effect of glyphosate on growth, chlorophyll, and nodulation in glyphosate resistant and susceptible soybean (*Glycine max*) varieties. **Journal of New Seeds**, v.2, n.3, p.37-52, 2000.

REDDY, K.N.; ZABLOTOWICZ, R.M. Glyphosate-resistant soybean response to various salts of glyphosate and glyphosate accumulation in soybean nodules. **Weed Science**, v. 51, p.496-502, 2003.

REDDY, K.N.; RIMANDO, A.M.; DUKE, S.O. Aminomethylphosphonic Acid,

a Metabolite of Glyphosate, Causes Injury in Glyphosate-Treated, Glyphosate-Resistant Soybean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.52, p.5139-5143, 2004.

RONCHI, C.P.; DAMATTA, F.M.; BATISTA, K.D.; MORAES, G.A.; LOUREIRO, M.E.; DUCATTI, C. Growth and photosynthetic down-regulation in *Coffea arabica* in response to restricting root volume. **Functional Plant Biology**, v.33, p.1013-1023, 2006.

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

SANTOS, J.B.; JACQUES, R.J.S.; PROCÓPIO, S.O.; KASUYA, M.C.M.; SILVA, A.A.; SANTOS, E.A. Efeitos de diferentes formulações comerciais de glyphosate sobre estirpes de *Bradyrhizobium*. **Planta Daninha**, v.22, n.2, p.293-299, 2004.

SANTOS, J.B.; FERREIRA, E.A.; REIS, M.R.; SILVA, A.A.; FIALHO, C.M.T.; FREITAS, M.A.M. Avaliação de Formulações de Glyphosate sobre Soja Roundup Ready. **Planta Daninha**, v.25, n.1, p.165-171, 2007.

SAUSEN, T.L.; ROSA, L.M.G. Growth and carbon assimilation limitations in *Ricinus communis* (Euphorbiaceae) under soil water stress conditions. **Acta Botanica Brasilica**, v.24, n.3, p.648-654, 2010.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; HEMMINGSEN, E.A.; BRADSTREET, E.D. Sap pressure in vascular plants. **Science**, v.148, p.339-346, 1965.

SERRAJ, R.; BONA, S.; PURCELL, L.C.; SINCLAIR, T.R. Nitrogen accumulation and nodule activity of field-grown 'Jacson' soybean in response to water deficits. **Field Crops Research**, v.52, p.109-116, 1997.

SERRAJ, R.; SINCLAIR, T.R.; ALLEN, L.H. Soybean nodulation and N₂ fixation response to drought under carbon dioxide enrichment. **Plant, Cell and Environment**, v.21, p.491-500, 1998.

SETIYONO, T.D.; WEISS, A.; SPECHT, J.; CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A. Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions. **Field Crops Research**, v.118, p.82-92, 2008.

SIQUEIRA, S.C.; MOREIRA, M.A.; MOSQUIM, P.R.; JOSÉ, I.C.; FERREIRA, F.A.; SEDIYAMA, C.S. Simulação da soja geneticamente modificada tolerante ao glifosato por meio do cultivo de explantes. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.11, n.1, p.13-20, 1999.

TAIZ, L.; ZEIGER E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954p.

- TALLMAN, G.; ZHU, J.; MARHON, B.T.; AMODEO, G.; NOUHI, Z.; LEVY, K.; ZEIGER, E. Induction of CAM in *Mesembryanthemum crystallinum* abolishes the stomatal response to blue light and light-dependent zeaxanthin formation in guard cell chloroplasts. **Plant Cell Physiology**, v.38, p.236-242, 1997.
- VELINI, E.D.; DUKE, S.O.; TRINDADE, M.L.B.; MESCHEDE, D.K.; CARBONARI, C.A. Modo de ação do glyphosate. In: VELINI, E.D.; MESCHELE, D.K.; CARBONARI, C.A.; TRINDADE, M.L.B. **Glyphosate**. Botucatu: Fepaf, p.299-308, 2009.
- VIEIRA JUNIOR, P.A.; DOURADO NETO, D.; OLIVEIRA, R.F.; PEREZ, L.E.P.; MARTIN, T.N.; MANFRON, P.A.; BONNECARRERE, R.A.G. Relações entre o potencial e a temperatura da folha de plantas de milho e sorgo submetidas a estresse hídrico. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v.29, n. 4, p. 555-561, 2007.
- VILLANUEVA, M.J.C.; MUÑIZ, B.F.; TAMES, S. Effects of Glyphosate on Growth and the Chlorophyll and Carotenoid Levels of Yellow Nutsedge (*Cyperus esculentus*). **Weed Science**, v.33, n.6, p.751-754, 1985.
- VYN, T.J.; XIA, Y.; CAMBERATO, J. **Manganese management in glyphosate-resistant soybean cropping systems**. Agronomy Department, Purdue University, 2008, 9p.
- YAMADA, T.; CASTRO, P.R.C. Efeitos do glifosato nas plantas: implicações fisiológicas e agronômicas. International plant nutrition institute. Piracicaba: **Informações Agronômicas**, 2007. 24p. (Boletim Técnico 119).
- YANNICCARI, M.; TAMBUSSI, E.; ISTILART, C.; CASTRO, A.M. Glyphosate effects on gas exchange and chlorophyll fluorescence responses of two *Lolium perenne* L. biotypes with differential herbicide sensitivity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.57, p.210-217, 2012.
- YIN, X.; GOUDRIAAN, J.; LANTINGA, E.A.; VOS, J.; SPERTZ, H.J. A flexible sigmoid function of determinate growth. **Annals of Botany**, v.91, p.361-371, 2003.
- YOUNG, B.G.; YOUNG, J.M.; MATTHERH, J.L.; OWEN, M.D.K.; ZELAYA, I.A.; HARTZLER, R.G.; WAX, L.M.; ROREM, K.W.; BOLLERO, G.A. Soybean Development and Yield as Affected by Three Postemergence Herbicides. **Agronomy Journal**, v.95, p.1152-1156, 2003.
- WANG, W.H.; YI, X.Q.; HAN, A.D.; LIU, T.W.; CHEN, J.; WU, F.H.; DONG, X.J.; HE, J.X.; PEI, Z.M.; ZHENG, H.L. Calcium-sensing receptor regulates stomatal closure through hydrogen peroxide and nitric oxide in response to extracellular calcium in *Arabidopsis*. **Journal of Experimental Botany**, v.63, n.1, p.177-190, 2012.

ZABLOTOWICZ, R.M.; REDDY, K.N. Impact of glyphosate on the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean : a minireview. **Journal of Environmental Quality**, v.33, n.3, p.825-831, 2004.

ZABLOTOWICZ, R.M.; REDDY, K.N. Nitrogenase activity, nitrogen content, and yield responses to glyphosate in glyphosate-resistant soybean. **Crop Protection**, n.26, p.370-376, 2007.

ZEIGER, E.; ZHU, J. Role of zeaxanthin in blue light photoreception and the modulation of light-CO₂ interactions in guard cells. **Journal of Experimental Botany**, v.49, p.433-442, 1998.

ZEIGER, E.; TALBOTT, L.D.; FRECHILLA, S.; SRIVASTAVA, A.; ZHU, J. The guard cell chloroplast: a perspective for the twenty-first century. **New Phytologist**, v.153, p.415-424, 2002.

ZHOU, J.; BERMAN, K.H.; BREEZE, M.L.; NEMETH, M.A.; OLIVEIRA, W.S.; BRAGA, D.P.V.; BERGER, G.U.; HARRIGAN, G.G. Compositional Variability in Conventional and Glyphosate-Tolerant Soybean (*Glycine max* L.) Varieties Grown in Different Regions in Brazil. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v.59, p.11652-11656, 2011.

ZOBIOLE, L.H.S.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; KREMER, R.J.; CONSTANTIN, J.; BONATO, C.M.; MUNIZ, A.S. Water use efficiency and photosynthesis of glyphosate-resistant soybean as affected by glyphosate. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.97, p.182-193, 2010a.

ZOBIOLE, L.H.S.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; HUBER, D.M.; CONSTANTIN, J.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F.A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Glyphosate reduces shoot concentrations of mineral nutrients in glyphosate-resistant soybeans. **Plant and Soil**, v.328, p.57-69, 2010b.

ZOBIOLE, L.H.S.; OLIVEIRA JR, R.S.; KREMER, R.J.; CONSTANTIN, J.; YAMADA, T.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F.A.; OLIVEIRA JR, A. Effect of glyphosate on symbiotic N₂ fixation and nickel concentration in glyphosate-resistant soybeans. **Applied Soil Ecology**, v.44, p.176-180, 2010c.

ZOBIOLE, Z.H.S.; KREMER, R.J.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; CONSTANTIN, J. Glyphosate affects photosynthesis in first and second generation of glyphosate-resistant soybean. **Plant Soil**, v.336 p.251-265, 2010d.

ZOBIOLE, Z.H.S.; KREMER, R.J.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; CONSTANTIN, J. Glyphosate affects chlorophyll, nodulation and nutrient accumulation of "second generation" glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.99, p.53-60, 2011.

ZOBIOLE, Z.H.S.; KREMER, R.J.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; CONSTANTIN, J. Glyphosate effects on photosynthesis, nutrient accumulation, and nodulation in glyphosate-resistant soybean. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.175, p.319-330, 2012.

3 PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS, NODULAÇÃO, NUTRIENTES E PARÂMETROS FOTOSSINTÉTICOS DE SOJA ROUNDUP READY EM RESPOSTA AO GLYPHOSATE E À RESTRIÇÃO HÍDRICA EM CAMPO

RESUMO – O déficit hídrico constitui o evento mais importante à limitação da produção agrícola mundial. Portanto, conhecer os efeitos que o glyphosate possa causar na fisiologia da soja transgênica resistente ao glyphosate (soja RR) em condições de restrição hídrica é de suma importância, visto que praticamente inexistem trabalhos a respeito desse assunto e os poucos que existem trazem muita contradição e incertezas. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do herbicida glyphosate e da restrição hídrica na fisiologia da soja RR, em condições de campo. Para isso, foi conduzido um experimento de campo, com a cultivar de soja TMG 115 RR, em blocos casualizados, com três repetições, e esquema fatorial (2x2), sendo controle de plantas daninhas (C) feito com aplicação de glyphosate ou capina manual e o regime hídrico (W), com ou sem interrupção da irrigação, totalizando quatro tratamentos. Foram avaliados o número e o peso de nódulos, a área foliar específica, o teor de pigmentos fotossintéticos, a concentração foliar de macro e micronutrientes e a capacidade fotossintética pela realização das curvas A/C_c e $A/DFFA$. O glyphosate provocou redução no número e tendência para a redução na matéria seca de nódulos, independentemente do regime hídrico adotado. Em geral, não houve alteração na concentração de pigmentos fotossintéticos a não ser decréscimo no teor do pigmento carotenoide em condições de restrição hídrica e aplicação de glyphosate. Não foram observadas reduções relevantes nos teores foliares dos macro e micronutrientes, porém, alguns elementos, tais como N, Ca, Fe e Mn, exibiram tendência a menores concentrações no tecido foliar, principalmente quando sob efeito do herbicida e na ausência de irrigação. A soja RR apresentou tendência de acréscimos na capacidade fotossintética com aplicação do glyphosate e

irrigação adequada, embora não tenha diferido do tratamento capinado. Em contrapartida, observou-se efeito deletério provocado pela restrição hídrica na fisiologia da planta sob aplicação de glyphosate, como consequência da redução na eficiência dos parâmetros da fotossíntese A_{max} , V_{cmax} , J_{max} e A_{sat} , tornando a soja RR mais sensível nessa condição ambiental e nesse manejo de plantas daninhas.

Palavras-chave: curvas A/C_c e $A/DFFA$, fixação biológica de nitrogênio, *Glycine max* L., manejo de plantas daninhas, veranicos.

**PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS, NODULATION, NUTRIENTS AND
PHOTOSYNTHETIC PARAMETERS OF ROUNDUP READY SOYBEAN IN
RESPONSE TO GLYPHOSATE AND WATER RESTRICTION ON FIELD**

ABSTRACT – Drought is the most important event of the global agricultural production limitation. Therefore, knowing the effects that glyphosate can cause on the physiology of glyphosate resistant soybean (GRS) under water restriction conditions is very important, since practically there are no works on this subject. Thus, the aim of this study was to evaluate the effect of the herbicide glyphosate and water restriction on the GRS physiology in field conditions. For this purpose, a field experiment was carried out, with the TMG 115 RR soybean cultivar, in a randomized blocks with three replications and factorial design (2x2), the method of weed control (C) with glyphosate application or manual capping, and the hydrological regime (W), with or without interruption of irrigation, totaling four treatments. The number and the weight of nodules, specific leaf area, photosynthetic pigments content, leaf concentration of macro and micronutrients and photosynthetic capacity by A/C_c and $A/PPFD$ curves were evaluated. Glyphosate caused reduction on the number and a trend towards reduction in dry weight of nodules, regardless of the water regime adopted. There was no change in the of photosynthetic pigments content. However, there was a decrease in the content of carotenoid pigment in conditions of water restriction and glyphosate application. There were no significant reductions in leaf concentrations of macro and micronutrients, however, some elements, such as N, Ca, Fe and Mn exhibited tendency to lower concentrations in the leaf tissue especially when under the effect of the herbicide in the absence of irrigation. GRS showed tendency of increases in photosynthetic capacity with glyphosate application and proper irrigation, although not differing from manual capping. In contrast, it was observed deleterious effect caused by water restriction in plant physiology under glyphosate application, as a

consequence of the reduction in the efficiency of photosynthetic parameters A_{max} , V_{cmax} , J_{max} and A_{sat} , making GRS more sensitive under this environmental condition and this weed management.

Key-words: A/C_c and $A/PPFD$ curves, biological nitrogen fixation, *Glycine max* L., water stress, weed management.

3.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de cultivares resistentes a herbicidas tem sido considerado uma importante alternativa para o controle de plantas daninhas em culturas agrícolas (Zonetti et al., 2011). Neste sentido, os avanços na biotecnologia resultaram no desenvolvimento da soja transgênica resistentes ao herbicida glyphosate (soja RR) (King et al., 2001), que passou a ser comercializada em 1996 nos Estados Unidos (EUA) e autorizado o plantio no Brasil no ano de 2003 (James, 2009; Agelet et al., 2013).

Mesmo dominando o comércio mundial de herbicidas após a sua introdução em 1974 (Orcaray et al., 2012), sendo largamente utilizado no manejo de dessecação (Procópio et al., 2006; Constantin et al., 2008), a frequência de aplicação do glyphosate aumentou ainda mais com a adoção das culturas resistentes a este herbicida (Reddy et al., 2010). Para se ter uma ideia desse volume, mais de 90% de toda área de produção de soja nos EUA e de 85% no Brasil é composta por soja RR, como reflexo na facilidade do manejo de áreas infestadas com plantas daninhas (Lima et al., 2011; Carvalho et al., 2012).

O glyphosate é um herbicida não seletivo usado para o controle de plantas daninhas antes da semeadura e em aplicações de pós-emergência em soja RR (Yao et al., 2012) e em outras culturas transgênicas resistente a este produto. Pertence ao grupo químico dos inibidores da síntese de aminoácidos aromáticos e contém o N-fosfometil glicina como ingrediente ativo (Santos et al., 2007). Após sua absorção pelas plantas, ele é prontamente translocado, juntamente com fotossintatos, dos pontos de aplicação situados nas folhas até drenos distantes (James e Rahman, 2005; Cerdeira e Duke, 2010).

Em plantas sensíveis, o glyphosate atua na etapa pré-corismato da rota do chiquimato, inibindo a atividade da enzima plastídica 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPs), responsável pela reação que condensa chiquimato-3-fosfato e fosfoenolpiruvato em 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato (EPSP) e fosfato inorgânico (Pi) (Shaner e

Bridges, 2003; Marchiosi et al., 2009), com conseqüente declínio na síntese de aminoácidos aromáticos e compostos secundários (Gomez et al., 2009). É na rota do chiquimato que aproximadamente 20% de todo o fluxo de carbono nas plantas é processado (Cedergreen e Olsen, 2010), podendo ter uma participação ainda mais significativa devido aos intrincados sistemas de controle da rota (Velini et al., 2012).

Alguns trabalhos relatam o efeito estimulante de herbicidas, inclusive o glyphosate, no crescimento de plantas (Cedergreen et al., 2007; Cedergreen, 2008; Velini et al., 2008), pela aplicação de subdoses desse produto, num fenômeno conhecido como “hormesis” (Velini et al., 2010). Porém, em condições normais de condução de lavoura, há evidências que sugerem que a produção possa ser negativamente afetada pela adição do gene que dá resistência ao herbicida, por ter modificado os processos fisiológicos na soja RR (Gordon, 2007).

Alterações nas taxas transpiratória e fotossintética (Zobiole et al., 2010a), na produção de matéria seca do sistema radicular (King et al., 2001; Oliveira Junior et al., 2008), na fixação biológica de nitrogênio (Zablotowicz e Reddy, 2007; Figueiredo et al., 2009), nas concentrações de pigmentos fotossintéticos (Zablotowicz e Reddy, 2007) de alguns nutrientes (Cakmak et al., 2009) e na eficiência do uso da água (Ferronato, 2010) são alguns exemplos de distúrbios fisiológicos na soja RR provocados por esse herbicida.

Segundo Zablotowicz e Reddy (2007), o efeito do glyphosate na fisiologia da planta de soja RR pode ser agravado em condições desfavoráveis ao desenvolvimento da cultura, como restrição hídrica no solo, que pode ser muito comum nas principais regiões produtoras de soja no Brasil, principalmente em solos arenosos e em plantios fora da época adequada.

Sabe-se que a seca é um dos mais importantes fatores ambientais que inibem a fotossíntese e reduzem o crescimento e a produtividade das plantas (Zlatev e Lidon, 2012), sendo que a frequência e a intensidade do

déficit hídrico constituem os eventos mais importantes à limitação da produção agrícola mundial (Santos e Carlesso, 1998).

Portanto, conhecer os efeitos como o glyphosate e a restrição hídrica possam interferir na fotossíntese e demais processos fisiológicos da soja RR é importante para compreender o desenvolvimento da planta nessas condições e buscar uma melhor forma de manejo da cultura. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do herbicida glyphosate e da restrição hídrica no número e peso de nódulos, no teor de pigmentos fotossintéticos, na concentração foliar de macro e micronutrientes e na capacidade fotossintética da soja transgênica resistente ao glyphosate, em condições de campo.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Localização e características gerais do experimento

O experimento foi conduzido no campo experimental do UNIVAG - Centro Universitário de Várzea Grande, em Várzea Grande, MT (latitude 15° 38,65' S; longitude 56° 05,92' W; altitude 192 m), com a cultivar de soja TMG 115 RR, durante o período de julho a dezembro de 2011, em um ARGISSOLO Vermelho-Aarelo Distrófico de textura arenosa/média, com perfil profundo (> 2,0 m) (Ferronato, 2010).

Em uma área de 1250 m², dotada de irrigação por gotejamento, foi cultivada a soja em população final de 267.000 plantas ha⁻¹ e feitos todos os tratos culturais e fitossanitários de acordo com a necessidade da cultura. Para isso, foi utilizado um pulverizador costal elétrico de vazão constante, capacidade de 16 L, marca Flopi, modelo ESR-16A, equipado com uma barra com seis bicos com pontas de pulverização da Teejet, modelo XR110015, trabalhando a 1,5 bar de pressão, com volume de aplicação de 200 L ha⁻¹.

No estágio V7 da cultura, parte da soja foi submetida a um período de restrição hídrica de oito dias, com posterior retomada da irrigação ao final

desse período. Em cada regime hídrico, foram aplicados 3,0 L ha⁻¹ de Roundup Original, produto à base de glyphosate (360 g L⁻¹ do equivalente ácido) ou foi feita a capina manual. O experimento foi conduzido em esquema fatorial (2x2), sendo o método de controle de plantas daninhas (C) feito com aplicação de glyphosate ou com capina manual, e o regime hídrico (W), com ou sem a interrupção da irrigação, totalizando quatro tratamentos: T1 – sem interrupção da irrigação e aplicação de glyphosate (Gly); T2 – sem interrupção da irrigação e com capina manual (Cap); T3 – com interrupção da irrigação e aplicação de glyphosate (Gly+RH); e T4 – com interrupção da irrigação e capina manual (Cap+RH), utilizando-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com três repetições.

3.2.2 Número e peso total de nódulos

A partir do 17º dia após a emergência (DAE) da soja, em intervalos de 15 dias, foi amostrado o sistema radicular de três plantas de soja por repetição, com o intuito de avaliar a quantidade e o peso final dos nódulos. Para isso, após a coleta das raízes, procedeu-se à lavagem e secagem do material na temperatura de 70°C por 72 h. Posteriormente, os nódulos foram removidos cuidadosamente das raízes, contados e pesados em uma balança de precisão modelo AG 200 (Indústria e Comércio Eletro Eletrônica Gehaka, Ltda., São Paulo, SP, Brasil) e relativizados por metro quadrado.

Com base nos dados obtidos, foi utilizada a função de crescimento beta (Yin et al., 2003) para descrever o número de nódulos (NN) e a matéria seca dos nódulos (MSN) no decorrer do tempo (t), conforme as equações (7) e (8).

$$NN = NN_{\max} \left(1 + \frac{te - t}{te - tm} \right) \left(\frac{t}{te} \right)^{\frac{te}{te - tm}} \quad (7)$$

$$MSN = MSN_{\max} \cdot \left(1 + \frac{te - t}{te - tm}\right) \cdot \left(\frac{t}{te}\right)^{\frac{te}{te - tm}} \quad (8)$$

NN_{\max} é o valor máximo de nódulos por m^2 e MSN_{\max} , a matéria seca máxima por m^2 , que é alcançada no tempo te , e tm é o ponto de inflexão em que ocorre a máxima taxa de crescimento que é obtida pela equação (9) ou (10), sendo Cm a máxima taxa de crescimento.

$$Cm = \frac{2 \cdot te - tm}{te \cdot (te - tm)} \cdot \left(\frac{tm}{te}\right)^{\frac{tm}{te - tm}} \cdot NN_{\max} \quad (9)$$

$$Cm = \frac{2 \cdot te - tm}{te \cdot (te - tm)} \cdot \left(\frac{tm}{te}\right)^{\frac{tm}{te - tm}} \cdot MSN_{\max} \quad (10)$$

3.2.3 Curvas de resposta da fotossíntese a diferentes concentrações de CO_2 (Curva A/C_c)

As respostas da taxa de assimilação líquida de carbono (A) à concentração parcial de CO_2 no cloroplasto (curva A/C_c) foram determinadas utilizando um sistema portátil de medição da fotossíntese, modelo LI-6400 (LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA), no trifólio central da última folha totalmente expandida, que não apresentasse sinais de injúria, herbivoria ou ataque de patógenos, em três momentos distintos, durante o dia anterior à aplicação dos tratamentos (32 DAE), após o período de restrição hídrica (40 DAE) e após a retomada da irrigação (50 DAE), tendo sido feita uma medida em cada unidade experimental, totalizando três repetições por tratamento.

Para isso, o equipamento foi ajustado para fornecer uma densidade saturante de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos ($DFFA$) de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, temperatura do bloco de 28°C e umidade relativa do ar de referência próxima de 60%. Após um período de 10 minutos de aclimação da folha a

estas condições, o equipamento foi ajustado para variar a concentração de CO₂ na câmara na seguinte ordem: 400, 300, 250, 200, 150, 100, 50, 400, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 1000 e 1200 μmol mol⁻¹, sendo os valores de fotossíntese gravados somente quando o coeficiente de variação geral se apresentasse menor que 0,3%.

Para calcular os parâmetros da curva A/C_c foi utilizado o modelo proposto por Farquhar et al. (1980), que expressa a dependência da taxa líquida da assimilação de carbono A (μmol m⁻² s⁻¹) em função da pressão parcial de CO₂ no cloroplasto (C_c , Pa). As curvas A/C_c foram usadas em vez de curvas A/C_i com o intuito de minimizar as diferenças entre C_i e C_c , visto que estas desconsideram as limitações pela condutância mesofílica (g_m), e acabam subestimando V_{cmax} , o que é comum em ajustes de curva A/C_i (Epron et al., 1995; Manter e Kerrigan, 2004). Para expressar a C_i , a C_c e a C_a , originalmente dadas em μmol mol⁻¹ em unidades de pressão (Pa), bastou multiplicá-las pela pressão atmosférica local (em kPa) e pelo fator de correção dimensional para ajuste de unidades de 10⁻³.

De acordo com o modelo proposto por Farquhar et al. (1980), a curva A/C_c é modelada pelo menor valor que se pode obter entre três taxas limitantes.

$$A = \min\{A_c, A_j, A_p\} - R_d \quad (11)$$

A é a taxa fotossintética líquida (μmol m⁻² s⁻¹) e o $\min \{ \}$ indica “o mínimo de”. A_c , A_j e A_p são a assimilação líquida de CO₂ limitada pela atividade da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), pela taxa de regeneração de ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP) e pela utilização das trioses fosfato, respectivamente. R_d é a taxa de respiração no claro, dada em μmol m⁻² s⁻¹.

A limitação fotossintética pela Rubisco pode ser expressa por

$$A_c = \frac{V_{cmax} (C_c - \Gamma^*)}{C_c + K_c (1 + O/K_o)} \quad (12)$$

V_{cmax} é a velocidade máxima de carboxilação da Rubisco ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); C_c é a pressão parcial de CO_2 no cloroplasto (Pa); O é a pressão parcial de O_2 no cloroplasto; Γ^* é o ponto de compensação de CO_2 na ausência de respiração mitocondrial (Pa); e K_c e K_o são os coeficientes de Michaelis-Menten da atividade da Rubisco para o CO_2 e O_2 , respectivamente (Pa).

O Γ^* pode ser expresso pela equação (13).

$$\Gamma^* = \frac{0,5 \cdot O}{\tau} \quad (13)$$

O é a concentração de O_2 (mmol mol^{-1}) e τ é a especificidade da Rubisco para CO_2 comparada com O_2 , sendo considerada relativamente constante entre as espécies C3 (von Caemmerer, 2000).

A limitação fotossintética pela taxa de regeneração da RuBP foi determinada utilizando a equação (14).

$$A_j = \frac{J(C_c - \Gamma^*)}{4C_c + 8\Gamma^*} \quad (14)$$

Nesta equação, J representa a taxa potencial de transporte de elétrons ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), que está relacionada com taxa de transporte de elétrons em luz saturada (J_{max}) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) por meio de uma relação empírica (Farquhar e Wong, 1984), conforme a equação (15).

$$\theta J^2 - (\alpha D D F A + J_{max}) J + \alpha D F F A J_{max} = 0 \quad (15)$$

Nesta equação, $D F F A$ representa a densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos, θ é a convexidade da curva de resposta à luz, (valor fixo de 0,90), J_{max} é a taxa de transporte de elétrons em luz saturada e α é a luz útil absorvida pelo PSII, dada pela equação (16).

$$\alpha = abs \frac{(1 - f)}{2} \quad (16)$$

Nesta equação, *abs* é a absorptância das folhas para a radiação fotossinteticamente ativa (aproximadamente igual a 0,85) e *f* é a correção para a qualidade espectral da luz (aproximadamente 0,15) (Evans, 1987).

A limitação fotossintética pela utilização da triose fosfato pode ser expressa pela equação (17).

$$A = 3TPU \quad (17)$$

Nesta equação, *TPU* é a taxa de utilização da triose fosfato ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Considerando que C_c está relacionado com C_i , *A* e a condutância mesofílica (g_m , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$), pode-se obter o valor de g_m a partir dos dados da curva A/C_i , sendo considerado como mais um parâmetro para ajuste das curvas A/C_c (Equação 18).

$$C_c = C_i - \frac{A}{g_m} \quad (18)$$

Para a correção dos parâmetros da curva A/C_c para a temperatura de 25°C, foram utilizados os coeficientes descritos por Harley et al. (1992) e Sharkey et al. (2007), sendo os valores de A_{max} , V_{cmax} e J_{max} estimados por base de área a partir das curvas A/C_c .

Na mesma folha em que foram feitas as curvas A/C_c e as curvas $A/DFFA$, foi medida a área foliar específica (*AFE*), determinadas a concentração de pigmentos fotossintéticos e a concentração de nutrientes, obedecendo aos mesmos momentos de medição e número de repetição por tratamento.

3.2.4 Curvas de resposta da fotossíntese a diferentes densidades de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (Curva $A/DFFA$)

No mesmo trifólio utilizado para a construção da curva A/C_c , foram feitas as medidas para a construção da curva $A/DFFA$, sendo o LI-6400 ajustado para fornecer uma concentração de CO_2 de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$, temperatura de 28°C e umidade relativa de 60%. Após um período de 10 minutos de aclimação da folha a essas condições, variou-se a $DFFA$ na seguinte ordem: 2000, 1500, 1250, 1000, 800, 500, 250, 100, 50, 25, e $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Os valores de A foram registrados após o coeficiente de variação geral se apresentar menor ou igual a 0,3%, para cada variação de $DFFA$.

O ajuste das curvas $A/DFFA$ foi feito pelo modelo da hipérbole não retangular, descrito por Long e Hallgren (1993), conforme a equação (19).

$$A = \frac{\phi \cdot DFFA + A_{maxB} - \sqrt{(\phi \cdot DFFA + A_{maxB})^2 - 4\phi \cdot A_{maxB} \cdot \theta}}{2\theta} - R_e \quad (19)$$

Em que A corresponde à taxa fotossintética líquida ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ϕ à eficiência quântica aparente ($\mu\text{mol } \mu\text{mol}^{-1}$); $DFFA$, à densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); A_{maxB} , à taxa fotossintética bruta em condições de saturação de luz ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); θ à convexidade da curva (adimensional) e R_e corresponde à taxa de respiração no escuro ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

3.2.5 Área foliar específica

A área foliar específica (AFE) foi determinada utilizando um medidor portátil de área foliar, modelo CI-202 (CID Bio-Science, Inc., Camas, WA, EUA), previamente calibrado, que mediu a área foliar fresca dos trifólios da última folha totalmente expandida, que foram levados à estufa de ventilação forçada por 72 h a 70°C , sendo posteriormente pesados em balança de

precisão, modelo AG 200 (Indústria e Comércio Eletro Eletrônica Gehaka, Ltda., São Paulo, SP, Brasil), para obtenção do peso seco da folha. Com isso, a *AFE* foi obtida pela razão entre a área foliar fresca e o peso seco da folha.

3.2.6 Extração de pigmentos fotossintéticos

A extração dos pigmentos fotossintéticos foi feita utilizando o solvente orgânico dimetil sulfóxido (DMSO) saturado com carbonato de cálcio (5%), conforme metodologia proposta por Porra et al. (1989). Para tanto, três discos foliares com 0,5 cm de diâmetro, provenientes do trifólio central da última folha totalmente expandida utilizada para medir a *AFE*, foram imersos em 3 mL de DMSO. A solução extratora juntamente com o material vegetal foram acondicionados em tubos de ensaio recobertos por papel alumínio para evitar a degradação dos pigmentos pela ação da luz durante o processo de extração. O material permaneceu sob extração por um período de 6 horas em temperatura ambiente, tempo esse obtido por uma curva de extração feita previamente para a obtenção da maior quantidade possível dos pigmentos. Após este período, procedeu-se à leitura da absorbância do branco e das amostras em espectrofotômetro, modelo Varian Cary 50 UV-Vis (VARIAN, Inc., Cary, NC, EUA), com resolução de 0,5 nm no espectro de 190 a 1100 nm, em sala escura, nos comprimentos de onda de 480 nm, 649 nm e 665 nm, utilizando-se a média de quatro repetições para cada leitura.

Para a estimativa da concentração das clorofilas a (*Chl a*) e b (*Chl b*) e dos pigmentos carotenoides (C_{x+c}) a partir dos valores de absorbância, foram utilizadas as seguintes equações propostas por Wellburn (1994).

$$Chl\ a = 12,47A_{665} - 3,62A_{649} \quad (20)$$

$$Chl\ b = 25,06A_{649} - 6,5A_{665} \quad (21)$$

$$C_{x+c} = 1000A_{480} - 1,29Chl\ a - 53,78Chl\ b/220 \quad (22)$$

Como as equações forneceram a concentração dos pigmentos por 1,0 mL de extrato e, sendo a extração feita utilizando três discos foliares imersos em 3,0 mL de DMSO, houve a necessidade de transformar as unidades obtidas pelas equações, multiplicando os valores por 3,0 mL e dividindo-os pela área foliar dos três discos ($0,58875 \text{ cm}^2$), para relativizar o conteúdo dos pigmentos pela área foliar.

3.2.7 Determinação da concentração de nutrientes

Após a retirada dos discos foliares para a determinação dos pigmentos fotossintéticos, os trifólios da última folha totalmente expandida foram secos a 70°C por 72 h e moídos em moinho tipo Wyllei, sendo a determinação da concentração de macro e micronutrientes feita pelo laboratório de análise Plante Certo®, localizado em Cuiabá-MT, conforme metodologia da Embrapa (2009).

3.2.8 Análise estatística

Os dados relativos às curvas das funções de crescimento beta para *NN* e *MSN* foram submetidos ao teste de normalidade e avaliados por ANOVA pelo teste *F* ($p < 0,05$). Foi feito um teste de hipótese randômico pela metodologia da reamostragem por Monte Carlo, com 10.000 reamostragens de 20 pontos ao longo da curva, para verificar a equivalência dos parâmetros.

As curvas A/C_c foram analisadas utilizando uma planilha desenvolvida em Matlab (V7.3, Matworks Inc., Natick, MA, EUA) disponibilizada por Su et al. (2009), sendo os parâmetros V_{cmax} , J_{max} , TPU , R_d , e g_m , estimados por meio de um algoritmo genético, que permite também ajustar de forma aleatória esses parâmetros a uma curva inteira, sendo o melhor ajuste identificado pelo menor valor de soma do quadrado dos erros, minimizando erros subjetivos que possam ocorrer quando essas estimativas são feitas por

funções ajustadas individualmente para estimar cada parâmetro (Dalmagro et al., 2013).

Foi feita a análise das curvas *A/DFFA* utilizando uma rotina implementada em planilha de Excel, desenvolvida por Lobo et al. (2013), ajustando os dados ao modelo de hipérbole não retangular, sendo o grau de ajuste dos dados ao modelo avaliado com base no menor valor da soma dos quadrados dos erros e maior valor de R^2 .

Os parâmetros das curvas *A/C_c* e das curvas *A/DFFA*, bem como da *AFE*, das variáveis dos pigmentos fotossintéticos e de macro e micro nutrientes, foram submetidos ao teste de normalidade e ANOVA com medidas repetidas no tempo. Foram considerados fatores dependentes *C* e *W*, e como fator independente o tempo (*t*). Para aqueles tratamentos ou interações que foram significativos ($p < 0,05$) pelo teste *F*, foram feitos testes de médias por Tukey a 5% de probabilidade. No caso de não significância entre os fatores, os dados foram agrupados.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Número e peso total de nódulos

Com base nas curvas de crescimento beta para a variável número de nódulos (NM) (Figura 8), é possível observar diferença significativa entre os tratamentos avaliados, com destaque para os maiores valores, durante quase todo o período de avaliação, para a soja RR ausente de glyphosate, independentemente do regime hídrico adotado.

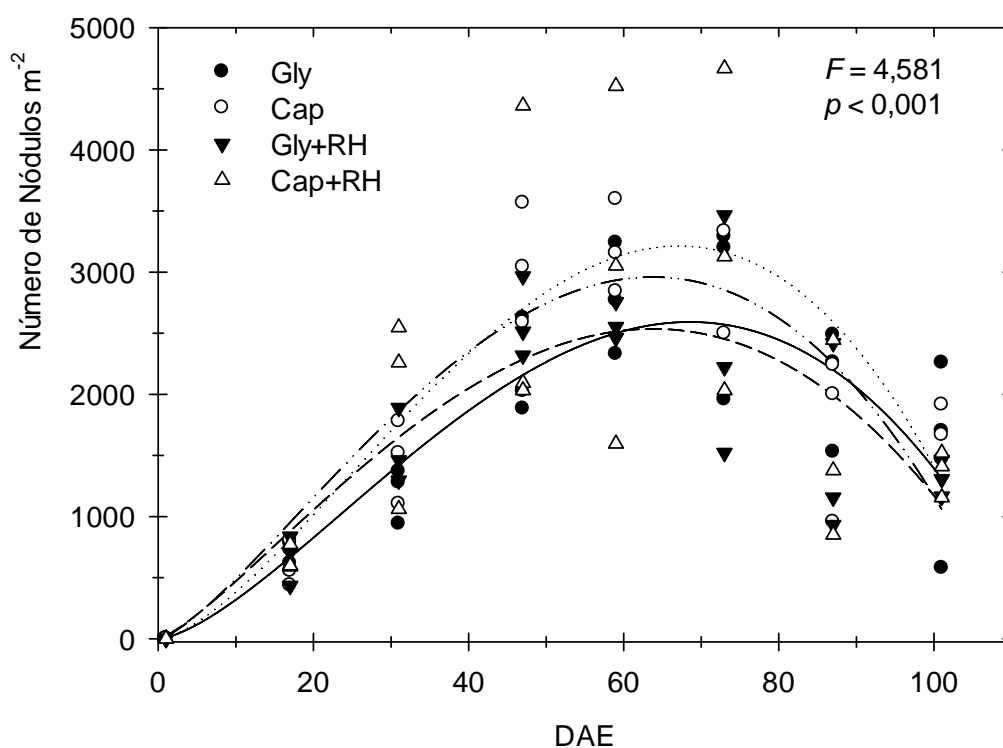


FIGURA 8. Ajuste da função de crescimento beta aos dados observados do número de nódulos (NM) da soja TMG 115 RR para os tratamentos Gly (—●—), Cap (—○—), Gly+RH (—▼—) e Cap+RH (—△—).

Mesmo com a imposição de oito dias de restrição hídrica durante a fase vegetativa da cultura, os parâmetros das curvas de crescimento beta

para ajuste do NN se mantiveram similares entre os tratamentos com capina e, de maneira geral, as plantas submetidas ao controle com glyphosate apresentaram menores valores de NN (Tabela 7).

TABELA 7. Valores estimados dos parâmetros da função de crescimento beta (intervalo de confiança entre parênteses a 95%) para o número de nódulos (NN) da soja TMG 115 RR nos diferentes tratamentos, Várzea Grande-MT, 2011.

Parâmetro	Tratamento*			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
NN_{max}	2592 bc	3214 a	2535 c	2960 ab
(nº nódulos m ⁻²)	(2338;2830)	(2941;3517)	(2373;2646)	(2737;3172)
tm_{-NN}	32,4 ab	24,2 a	15,1 b	17,8 ab
(dias)	(16,0;31,7)	(19,4;30,1)	(10,7;15,1)	(12,9;20,6)
te_{-NN}	68,5 a	67,1 ab	63,7 b	63,7 b
(dias)	(64,3;71,7)	(65,0;67,0)	(61,9;64,7)	(61,5;65,5)
Cm_{-NN}	61,1 b	74,2 a	63,5, b	71,3 a
(nº m ⁻² dia ⁻¹)	(59,9;62,3)	(72,5,6;76,0)	(62,8;64,1)	(66,1;76,1)

* Médias seguidas da mesma letra, em cada linha, não diferem entre si segundo metodologia de reamostragem de Monte Carlo.

Em média, quando somados, os tratamentos com glyphosate tiveram uma redução de 20% em relação aos tratamentos capinados para a variável número máximo de nódulos (NN_{max}) e de 16,7% para a máxima taxa de crescimento de nódulos (Cm_{-NN}) (Tabela 7), sendo que não houve diferença entre as variáveis, dentro de cada regime hídrico, para o ponto de inflexão em que ocorre Cm para NN (tm_{-NN}) e para o tempo para alcançar NN_{max} (te_{-NN}).

Embora apresentassem diferenças entre as curvas crescimento beta em relação aos dados observados da matéria seca de nódulos por m² (MSN), pela metodologia de reamostragem de Monte Carlo (Figura 9), elas se mostraram com uma menor variabilidade dos dados de MSN do que o

observado na Figura 8, na variação do número de nódulos por m^2 (NN), entre os tratamentos. Destacam-se os maiores valores da MSN de Cap, principalmente em relação à Gly, durante o desenvolvimento da soja RR ao longo do tempo.

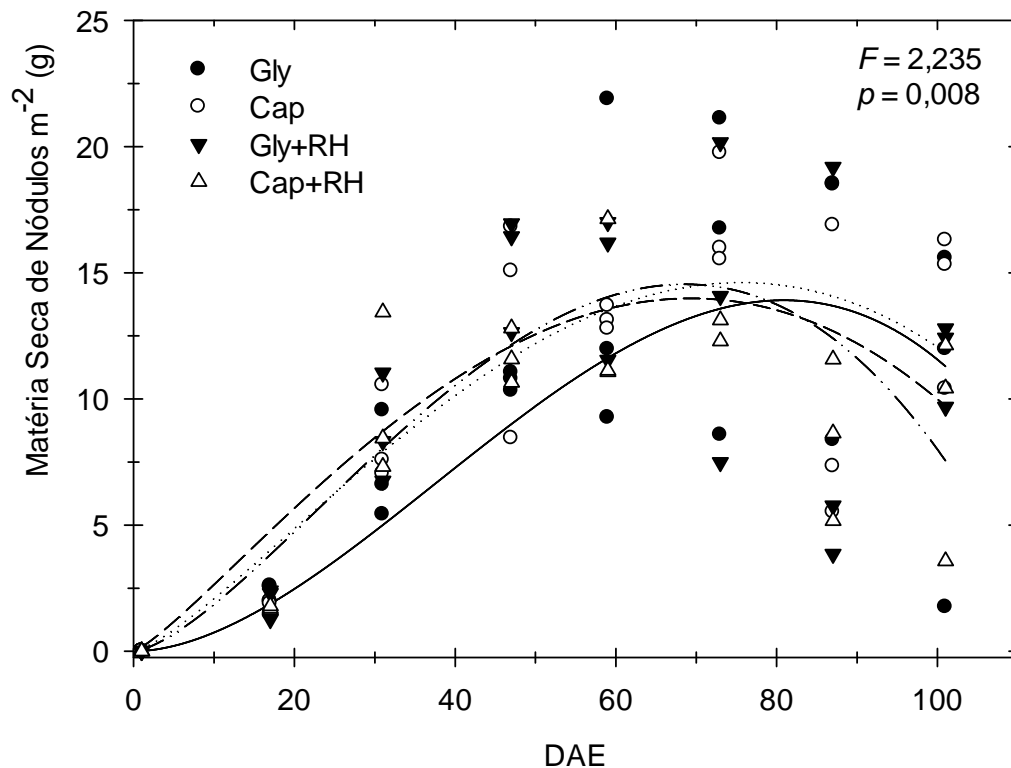


FIGURA 9. Ajuste da função de crescimento beta aos dados observados da matéria seca de nódulos (MSN) da soja TMG 115 RR para os tratamentos Gly (—), Cap (⋯⋯⋯), Gly+RH (— —) e Cap+RH (— · — ·).

A Tabela 8 mostra que o valor máximo de matéria seca de nódulos (MSN_{max}) ainda é superior nos tratamentos capinados, porém, apenas 5% em relação aos tratamentos com aplicação de glyphosate, o que pode estar relacionado ao aumento nas máximas taxas de crescimento para MSN (Cm_{-MSN}) (Tabela 8), em média, 33% superiores aos valores dos tratamentos capinados quando em tm_{-MSN} (ponto de inflexão em que ocorre Cm para MSN), com o intuito de compensar o menor NN (Tabela 7 e Figura 8).

TABELA 8. Valores estimados dos parâmetros da função de crescimento beta (intervalo de confiança entre parênteses a 95%) para a matéria seca de nódulos (*MSN*) da soja TMG 115 RR nos diferentes tratamentos, Várzea Grande-MT, 2011.

Parâmetro	Tratamento*			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
<i>MSN</i> _{max}	13,78 a	14,61 a	13,99 a	14,54 a
(g m ⁻²)	(10,80;15,48)	(13,43;15,69)	(12,68;15,10)	(13,39;15,93)
<i>tm</i> _{-MSN}	27,76 ab	19,35 ab	13,18 b	22,80 a
(dias)	(13,19;45,98)	(12,66;28,97)	(6,92;20,27)	(16,90;29,47)
<i>te</i> _{-MSN}	76,02 ab	75,61 a	69,33 bc	68,55 c
(dias)	(52,06;82,53)	(70,54;81,25)	(66,27;72,51)	(66,51;71,03)
<i>Cm</i> _{-MSN}	0,37 a	0,29 c	0,35 ab	0,32 bc
(g m ⁻² dia ⁻¹)	(0,35;0,39)	(0,28;0,30)	(0,33;0,37)	(0,29;0,34)

* Médias seguidas da mesma letra, em cada linha, não diferem entre si segundo metodologia de reamostragem de Monte Carlo.

Diversos trabalhos relatam reduções em *NN* e *MSN* com a aplicação de glyphosate, embora tenham sido feitos em vasos e em casa de vegetação (King et al., 2001; Zablotowicz e Reddy, 2004). Dvoranen et al. (2008), em aplicação única de glyphosate na dose de 0,72 kg ha⁻¹ aos 20 DAE, observaram diminuição nos valores de *NN* e *MSN* da ordem de 24% e 27%, respectivamente, em comparação com o tratamento sem aplicação. Zobiolo et al. (2010b) encontraram que variedades de todos os grupos de maturação também tiveram os valores de *NN* e *MSN* reduzidos significativamente pelo efeito da aplicação de glyphosate.

Sabe-se que a forma sensível da enzima EPSPs está presente em muitos microrganismos e protozoários (Druille et al., 2013b), sendo que alguns deles desempenham papéis fundamentais na ciclagem de nutrientes no solo (Zablotowicz e Reddy, 2004) e na fixação biológica de N na cultura da soja (Bohm et al., 2009). Neste caso, o efeito tóxico do herbicida pode ser

atribuído à incapacidade dos organismos para sintetizar os aminoácidos aromáticos (Zobiolo et al., 2010b), causando, conseqüentemente, redução em *NN* e *MSN* observados neste trabalho.

Serra et al. (2011), avaliando a influência do glyphosate na eficiência nutricional de soja RR, observaram número máximo de nódulos na ausência de glyphosate. Segundo os autores, a redução do número de nódulos nas plantas tratadas deve-se à ação inibitória do glyphosate na EPSPs presente no *Bradyrhizobium* sp., com conseqüente redução do conteúdo total de N na planta. De María et al. (2005) concluíram que o glyphosate causa alteração no metabolismo nodular devido à limitação do fornecimento de carboidrato das folhas e caules para os nódulos. Ainda, Zobiolo et al. (2010b), verificaram que o herbicida pode levar à redução do Ni, que é um elemento essencial aos microrganismos fixadores de N e, dessa forma, reduzir a fixação simbiótica desse elemento.

Embora o glyphosate seja rapidamente adsorvido nas partículas do solo, onde sua atividade é limitada, e o restante seja degradado por microrganismos, ele pode ser acumulado e permanecer ativo na raiz das plantas ou ser exsudado na rizosfera, podendo afetar a colonização das raízes pelos microrganismos simbiotes (Feng et al., 2005; Kremer et al., 2005; Powel et al., 2009).

Mesmo que a sorção do solo e a degradação do glyphosate apresentem grande variação, dependendo da composição e das propriedades do solo, bem como das condições climáticas (Druille et al., 2013a), algumas práticas de manejo, como a adubação fosfatada, também podem afetar negativamente a fixação biológica de nitrogênio (FBN) ao gerar uma remobilização dos resíduos de glyphosate em solos, visto que o P compete por sítios de adsorção (Bott et al., 2011).

Segundo Dvoranen et al. (2008), as diferenças entre os tratamentos para as variáveis *NN* e *MSN* poderiam ter sido maiores do que o observado neste trabalho caso a aplicação do glyphosate tivesse sido feita de forma sequencial, visto que, neste caso, o grau de injúria nas plantas é maior nas

aplicações sequenciais em relação à aplicação única, o que pode ser aplicado também aos resultados obtidos na FBN.

Outro fator que dever ser citado é o tipo de formulação do herbicida glyphosate utilizado na aplicação. O produto formulado à base de sal de isopropilamina foi o mais prejudicial às plantas de soja RR, reduzindo o número de nódulos radiculares e o rendimento de grãos, além de promover maior efeito negativo sobre a microbiota do solo (Santos et al., 2007), caso das formulações Roundup Transorb® e Roundup Ready®. Considerando a maior velocidade de absorção e translocação do Roundup Transorb®, e levando-se em conta a sensibilidade do rizóbio da soja a esse herbicida, é possível que compostos presentes no produto comercial venham a promover impacto negativo sobre o total de nódulos formados (Santos et al., 2005; Albrecht e Ávila, 2010). Reddy e Zablotowicz (2003) observaram que o sal de isopropilamina se acumulou nos nódulos radiculares em concentrações bem acima das observadas para o sal trimetilsulfônico e diamônio.

Ademais, o ácido aminometilfosfônico (AMPA), o primeiro produto da degradação do glyphosate, tem uma maior persistência ambiental e mobilidade no solo que o herbicida (Druille et al., 2013b). Este metabólito é uma fitotoxina conhecida e é fitotóxico para a soja RR (Reddy et al., 2004b), resultando em efeito negativo na nodulação (Zablotowicz e Reddy, 2007).

Alguns autores ainda consideram que a sensibilidade da EPSPs de microorganismos ao glyphosate poderia oferecer um benefício adicional em culturas RR, no controle de doenças, como a ferrugem no trigo e a ferrugem asiática na soja, causadas pelos fungos *Puccinia triticina* e *Puccinia striiformis* sp. *tritici* e *Phakopsora pachyrhizi*, respectivamente (Feng et al., 2005).

3.3.2 Área foliar específica

Não houve alteração significativa na área foliar específica (AFE) entre os tratamentos estudados, para os três períodos de avaliação e para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W) e

interações (Tabela 9), embora as folhas de soja RR do tratamento Gly+RH apresentassem os menores valores de *AFE* ($316,3 \pm 9,2 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$), sendo 3,6% menor que Gly, com $328,3 \pm 11,4 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Para os tratamentos cujo controle de plantas daninhas foi feito por capina, a diferença da *AFE* foi mínima, visto que os valores para Cap foram de $335,1 \pm 8,4 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ e para Cap+RH, de $335,2 \pm 9,2 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ (Tabela 9). Sendo assim, a *AFE* dos tratamentos capinados foi, em média, 3,8% superior aos que receberam aplicação de glyphosate.

TABELA 9. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo da área foliar específica (*AFE*) para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.

Causas de variação*	<i>AFE</i>	
	<i>F</i>	<i>p</i>
R. hídrico (W)	0,54 ^{ns}	0,576
Controle (C)	2,56 ^{ns}	0,148
Tempo (t)	1,59 ^{ns}	0,239
W x C	0,88 ^{ns}	0,374
W x t	0,15 ^{ns}	0,866
C x t	1,12 ^{ns}	0,354
W x C x t	1,83 ^{ns}	0,197

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
<i>AFE</i> ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$)	328,3 ($\pm 11,4$)	335,1 ($\pm 8,4$)	316,3 ($\pm 9,2$)	335,2 ($\pm 9,2$)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

Considerado um importante fator do ponto de vista fisiológico por descrever a alocação da biomassa da folha por unidade de área (Scalon e Franco, 2007), um maior valor da *AFE* pode ser reflexo de cutículas e epidermes mais delgadas, menor espessura de mesofilo e menor proporção

de parênquima paliçádico, de tecidos condutores e de sustentação, maior proporção de espaços intercelulares e menor densidade estomática (Gobbi et al., 2011). Assim, um aumento na espessura da folha, especialmente pela adição de células paliçádicas e, conseqüentemente, maiores valores de massa foliar, pode levar a uma taxa fotossintética foliar mais elevada (Taiz e Zeiger, 2013). Neste contexto, o glyphosate parece promover um aumento na massa foliar como forma de compensar as maiores taxas de fotossíntese em detrimento do aumento na condutância estomática (Tabela 5).

Outro fator que pode influenciar a *AFE* é a restrição hídrica. A área foliar, como importante fator de produção, determina o uso de água pelas plantas, sendo seu potencial severamente inibido em resposta ao déficit hídrico (Silva e Nogueira, 2003).

3.3.3 Pigmentos fotossintéticos

Por meio da análise de pigmentos fotossintéticos, a não ser devido ao efeito do tempo sobre os teores de carotenoides (C_{x+c}), todos os demais fatores e interações não foram significativos para todos os pigmentos cloroplastídicos analisados (Tabela 10).

TABELA 10. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo da concentração de pigmentos fotossintéticos para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.

Causas de variação *	C_{x+c}		<i>Chl b</i>		<i>Chl a</i>	
	F	p	F	p	F	p
R. hídrico (W)	0,07 ^{ns}	0,792	4,07 ^{ns}	0,078	0,72 ^{ns}	0,421
Controle (C)	2,27 ^{ns}	0,170	1,78 ^{ns}	0,219	1,30 ^{ns}	0,288
Tempo (t)	4,84	0,023	2,08 ^{ns}	0,157	2,49 ^{ns}	0,114
W x C	0,15 ^{ns}	0,706	1,41 ^{ns}	0,269	0,06 ^{ns}	0,814
W x t	0,18 ^{ns}	0,835	0,79 ^{ns}	0,471	0,29 ^{ns}	0,755
C x t	0,39 ^{ns}	0,683	0,04 ^{ns}	0,959	0,31 ^{ns}	0,739
W x C x t	0,89 ^{ns}	0,429	1,49 ^{ns}	0,254	0,36 ^{ns}	0,705

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
C_{x+c} ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	11,80 ($\pm 0,31$)	12,14 ($\pm 0,24$)	11,57 ($\pm 0,29$)	12,13 ($\pm 0,31$)
<i>Chl b</i> ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	21,26 ($\pm 0,44$)	21,43 ($\pm 0,59$)	19,79 ($\pm 1,13$)	20,74 ($\pm 0,61$)
<i>Chl a</i> ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	24,33 ($\pm 0,46$)	24,64 ($\pm 0,54$)	23,97 ($\pm 0,64$)	24,75 ($\pm 0,39$)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

Observa-se uma tendência de redução 2,6% dos teores de *Chl b*, 2,2% para *Chl a* e de 3,7% para C_{x+c} dos tratamentos com glyphosate com relação aos capinados (Tabela 10). Quando se analisa a variação de C_{x+c} para os três períodos avaliados (32, 40 e 50 DAE), verifica-se uma queda acentuada de 8,5% entre o primeiro e o segundo período para o tratamento Gly+RH, com posterior recuperação na última avaliação (Tabela 11).

Embora com a aplicação de glyphosate, praticamente não houve alteração nos valores de C_{x+c} para Gly, em comparação aos tratamentos capinados (Tabela 11). Mesmo sob restrição hídrica de oito dias, os valores desse pigmento fotossintético pouco variaram dentro do método de controle

por capina, não respondendo Cap+RH da mesma forma à falta de água, conforme observado em Gly+RH (Tabela 11).

TABELA 11. Médias (\pm EP) dos tratamentos para a variável pigmento carotenoide (C_{x+c}), dadas em $\mu\text{g cm}^{-2}$, para os três períodos avaliados (32, 40 e 50 DAE).

Tratamento	Período de avaliação		
	32 (DAE)	40 (DAE)	50 (DAE)
Gly	11,475 (\pm 0,495)	11,607 (\pm 0,632)	12,555 (\pm 0,206)
Cap	12,018 (\pm 0,561)	11,809 (\pm 0,355)	12,739 (\pm 0,402)
Gly+RH	11,878 (\pm 0,554)	10,872 (\pm 0,192)	12,300 (\pm 0,364)
Cap+RH	11,880 (\pm 1,021)	12,181 (\pm 0,299)	12,594 (\pm 0,720)

Na pesquisa, os resultados quanto ao efeito do glyphosate nos teores das clorofilas em soja RR são bem contraditórios. Alguns autores evidenciaram significativa redução nos teores das clorofilas (Zobiole et al., 2011), podendo estar relacionada com a imobilização do Mg e Mn requeridos para sua produção (Cakmak et al., 2009), com os níveis do metabólito fitotóxico AMPA (Reddy et al., 2004b; Ding et al., 2011) e pela redução no número e massa de nódulos (Bohm et al., 2009), com consequente redução do conteúdo de N necessários para a síntese de clorofila (Serra et al., 2011).

Há relatos também sobre o efeito negativo do glyphosate na síntese de ácido aminolevulínico (ALA) (Kitchen et al., 1981), um precursor na biossíntese de clorofila (Skrebsky et al., 2008), que poderia estar associado à redução da formação de pigmentos cloroplastídicos (Alves et al., 2012).

Por outro lado, Reddy et al. (2000), em estudos em casa de vegetação, observaram que o tratamento da soja resistente ao glyphosate com aplicação do herbicida na dose de 1120 g i.a. ha^{-1} tinha pouco ou nenhum efeito sobre o teor de clorofila, e reduções significativas só foram encontradas para a dose de 2240 g i.a. ha^{-1} . Reddy e Zablutowicz (2003),

avaliando a resposta de soja RR a diferentes formulações do glyphosate, também não verificaram redução no conteúdo de clorofila, indicando uma recuperação desse pigmento na soja RR após a aplicação do herbicida, o que está em consonância com resultados deste trabalho. Da mesma forma, Moldes et al. (2008), estudando as respostas bioquímicas de soja convencional e RR ao glyphosate, verificaram decréscimo no conteúdo de clorofila apenas na soja não resistente ao herbicida.

Embora o efeito negativo da seca no conteúdo total de pigmentos cloroplastídicos seja bem conhecido, tanto em soja (Masoumi et al., 2010), quanto em outras espécies de plantas (Chutia e Borah, 2012; Oraki et al., 2012), neste estudo, a restrição hídrica não foi suficiente para uma redução significativa, porém, foi observada tendência de queda nos valores (Tabela 11).

Um fator que pode ter amenizado a variação dos teores dos pigmentos cloroplastídicos é sua capacidade de recuperação em condições de reidratação (Beltrano et al., 2006). Segundo Aidar et al. (2010), a ressíntese da clorofila parece começar logo após a reidratação total da folha, podendo se iniciar de 2 a 10 horas após o estabelecimento do turgor foliar e do conteúdo máximo de água.

Para os carotenoides, poucas são as informações sobre o efeito do glyphosate na concentração desses pigmentos acessórios, principalmente para a cultura da soja RR. Abu-Ilmaileh e Jordan (1978) e Vilanueva et al. (1985) observaram redução significativa de carotenoide para tiririca roxa (*Cyperus rotundus*) e tiririca amarela (*Cyperus esculentus*), respectivamente. Meschede et al. (2011) também verificaram decréscimo nos teores de carotenoides para a cana-de-açúcar, assim como Alves et al. (2012) para a cambre (*Cambre abyssinica* H.). Muñoz-Rueda et al. (1986) vão além ao afirmar que a redução nos teores de clorofila pode ser causada pela perda de carotenoides, induzida pelo herbicida glyphosate.

Segundo Meschede et al. (2011), a rota de síntese de carotenoides em plantas ocorre a partir do ácido mevalônico e fornece os componentes necessários à produção de vários reguladores do crescimento vegetal,

destacando-se citocininas, giberelinas e ácido abscísico. As transformações de geranyl-pirofosfato em farnesil-pirofosfato e em geranyl-geranyl-pirofosfato, com participação das enzimas prenil-transferase e farnesil transferase e, posteriormente, a transformação do fitoeno em fitoflueno, correspondem a passos metabólicos que alteram os teores de carotenoides na planta. No entanto, na passagem do fitoeno para fitoflueno, são necessários elétrons cedidos pela plastoquinona, que é produzida na rota do ácido chiquímico, alvo direto do herbicida glyphosate (Carvalho et al., 2013).

Como neste trabalho, Meschede et al. (2011) também observaram que os teores de carotenoides na folha foram mais sensíveis à aplicação de glyphosate que no caso da clorofila a e b (Tabela 10). Os autores acrescentam que, por serem moléculas altamente insaturadas, os carotenoides são suscetíveis à isomerização e oxidação, que geralmente ocorre no metabolismo da planta em função da aplicação de herbicidas. O calor, a luz e o pH promovem a isomerização dos carotenoides *trans*, como são normalmente encontrados na natureza, para a forma *cis*, com ligeira perda de cor e atividade biológica. A oxidação, principal causa de degradação dos carotenoides, depende da disponibilidade de oxigênio, do tipo de carotenoide e de seu estado físico, sendo estimulada pela luz, calor, metais, enzimas oxidativas e peróxidos e inibida por antioxidantes.

Outro indicativo do efeito deletério do glyphosate em carotenoides é que, em casos de seca contínua, as plantas aumentam a concentração desses pigmentos para fornecer maior proteção ao aparato fotossintético (Voytena, 2012), conforme observado para o tratamento Cap+RH, mas não para Gly+RH (Tabela 11). Como consequência disso, pode ocorrer redução da síntese de ácido abscísico, associado à menor tolerância a estresse hídrico em plantas (Waterland et al., 2010).

3.3.4 Teor de nutrientes

Para os teores foliares de macronutrientes não foi observada diferença significativa entre os tratamentos estudados, tanto para os fatores

métodos de controle e regime hídrico (Tabela 12). No entanto, da mesma forma que se verificou uma tendência de redução dos pigmentos fotossintéticos nos tratamentos com glyphosate em relação aos capinados, alguns elementos, como nitrogênio (N) e cálcio (Ca), também apresentaram essa disposição.

TABELA 12. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo da concentração de macronutrientes para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.

Causas de variação *	N		P		K		Ca		Mg	
	F	p	F	p	F	p	F	P	F	p
R. hídrico (W)	0,78 ^{ns}	0,403	0,13 ^{ns}	0,726	0,00 ^{ns}	0,956	3,76 ^{ns}	0,088	0,94 ^{ns}	0,362
Controle (C)	0,23 ^{ns}	0,642	0,04 ^{ns}	0,855	0,02 ^{ns}	0,878	0,87 ^{ns}	0,380	1,64 ^{ns}	0,236
Tempo (t)	1,58 ^{ns}	0,241	0,71 ^{ns}	0,508	7,08	0,008	8,22	0,004	0,37 ^{ns}	0,698
W x C	0,06 ^{ns}	0,809	0,23 ^{ns}	0,644	1,61 ^{ns}	0,239	3,08 ^{ns}	0,117	1,97 ^{ns}	0,198
W x t	0,42 ^{ns}	0,668	1,21 ^{ns}	0,328	4,97	0,025	15,29	<0,01	0,76 ^{ns}	0,487
C x t	0,55 ^{ns}	0,587	1,74 ^{ns}	0,211	0,64 ^{ns}	0,545	1,57 ^{ns}	0,242	0,34 ^{ns}	0,719
W x C x t	0,04 ^{ns}	0,959	4,96	0,023	3,30 ^{ns}	0,069	0,98 ^{ns}	0,398	0,59 ^{ns}	0,566

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
N (g kg ⁻¹)	50,00 (\pm 1,32)	50,75 (\pm 1,35)	48,11 (\pm 0,67)	49,50 (\pm 1,39)
P (g kg ⁻¹)	4,10 (\pm 0,13)	4,19 (\pm 0,12)	4,12 (\pm 0,10)	4,01 (\pm 0,16)
K (g kg ⁻¹)	20,29 (\pm 0,81)	21,68 (\pm 1,58)	21,84 (\pm 0,78)	20,46 (\pm 0,79)
Ca (g kg ⁻¹)	9,02 (\pm 0,64)	8,88 (\pm 0,52)	7,36 (\pm 0,25)	8,53 (\pm 0,32)
Mg (g kg ⁻¹)	4,48 (\pm 0,17)	4,45 (\pm 0,20)	4,38 (\pm 0,20)	4,91 (\pm 0,41)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

Quando comparados os tratamentos com glyphosate em relação aos capinados, a redução encontrada foi de 2,1% para N e de 5,9% para Ca. Essa redução parece ser mais acentuada no tratamento Gly+RH, visto que,

ao se analisar essa mesma diferença para com Cap+RH, a diminuição nos valores alcança 2,8% para N e 13,7% para Ca (Tabela 12), como se a condição de restrição hídrica agravasse a tendência de efeito deletério do herbicida em alguns nutrientes na planta.

Para enxofre e micronutrientes, o resultado se assemelha ao apresentado pelos macronutrientes na Tabela 12, não tendo ocorrido diferença significativa, apenas uma tendência de redução dos valores para alguns nutrientes sob o efeito do glyphosate (Tabela 13), principalmente em condição de restrição hídrica.

TABELA 13. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo da concentração de enxofre e de micronutrientes para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.

Causas de variação*	S		Zn		Cu		Fe		Mn	
	F	p	F	p	F	p	F	P	F	p
R. hídrico (W)	0,57 ^{ns}	0,470	1,55 ^{ns}	0,248	0,03 ^{ns}	0,874	2,31 ^{ns}	0,167	0,01 ^{ns}	0,917
Controle (C)	0,93 ^{ns}	0,362	0,09 ^{ns}	0,766	0,01 ^{ns}	0,944	2,26 ^{ns}	0,171	0,06 ^{ns}	0,820
Tempo (t)	4,66	0,028	1,91 ^{ns}	0,185	2,02 ^{ns}	0,183	41,62	<0,01	1,63 ^{ns}	0,255
W x C	0,71 ^{ns}	0,425	0,01 ^{ns}	0,908	0,00 ^{ns}	0,965	0,60 ^{ns}	0,461	0,11 ^{ns}	0,743
W x t	2,60 ^{ns}	0,109	0,72 ^{ns}	0,502	1,68 ^{ns}	0,236	3,57 ^{ns}	0,056	9,15	0,008
C x t	0,57 ^{ns}	0,580	0,09 ^{ns}	0,912	0,89 ^{ns}	0,442	2,44 ^{ns}	0,123	1,70 ^{ns}	0,243
W x C x t	0,48 ^{ns}	0,624	0,78 ^{ns}	0,476	0,17 ^{ns}	0,850	0,57 ^{ns}	0,580	0,61 ^{ns}	0,568

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
S (g kg ⁻¹)	2,17 (\pm 0,12)	2,21 (\pm 0,12)	2,16 (\pm 0,14)	2,38 (\pm 0,19)
Zn (mg kg ⁻¹)	42,52 (\pm 1,15)	44,24 (\pm 2,32)	47,13 (\pm 2,69)	48,05 (\pm 3,07)
Cu (mg kg ⁻¹)	11,03 (\pm 1,96)	10,88 (\pm 0,70)	10,65 (\pm 1,54)	10,68 (\pm 0,50)
Fe (mg kg ⁻¹)	130,00 (\pm 5,41)	129,13 (\pm 6,70)	122,67 (\pm 5,76)	127,13 (\pm 6,19)
Mn (mg kg ⁻¹)	33,86 (\pm 1,75)	35,26 (\pm 1,76)	33,65 (\pm 2,14)	35,12 (\pm 3,09)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

Essa tendência de redução na concentração de nutrientes nos tecidos foliares para os tratamentos com glyphosate em relação aos capinados foi de 5,7; 2,9; 1,4 e 4,1% para os nutrientes enxofre (S), zinco (Zn), ferro (Fe) e manganês (Mn), respectivamente. Quando são comparados apenas os tratamentos sob restrição hídrica, esses valores se alteram para 9,2; 1,9; 3,5 e 4,2% em plantas sob supressão da irrigação em relação às irrigadas (Tabela 13).

As plantas de soja, sob condições de restrição hídrica, irão se defender da perda excessiva de água pelo fechamento dos estômatos (Gilbert et al., 2011). Ao fechá-los, o fluxo de água através da planta é reduzido drasticamente, e, conseqüentemente, é diminuída a absorção de nutrientes vindos da solução do solo antes absorvidos pelas raízes (Nahar e Gretzmacher, 2002; Akinci e Losel, 2012). Uma vez que a absorção de nutrientes é reduzida pela planta, as concentrações nos tecidos foliares tendem a diminuir e, em alguns casos, as deficiências podem aparecer. Além disso, Singh e Singh (2004) acrescentam que a disponibilidade de alguns nutrientes diminui com a redução da umidade do solo, e os níveis dos elementos K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} e Mn^{2+} decrescem no solo cerca de 24%, 6%, 12%, 15%, 25% e 18%, respectivamente.

O que pode acentuar o efeito negativo da restrição hídrica sobre a absorção e distribuição de nutrientes na planta (Bing-Song et al., 2006) é a ação quelante do glyphosate (Coutinho e Mazo, 2005), capaz de imobilizar macro e micronutrientes, principalmente cátions divalentes (Cakmak et al., 2009). Esse comportamento do herbicida na planta poderia ajudar a explicar os resultados apresentados nas Tabelas 12 e 13, principalmente para o tratamento Gly+RH.

Segundo Eker et al. (2006), nutrientes catiônicos, como Ca, Mg, Mn e Fe, se ligam facilmente à molécula de glyphosate via grupos carboxílicos e fosfonados, formando complexos poucos solúveis ou muito estáveis. Por conta disso, vários são os relatos do decréscimo da concentração desses nutrientes minerais (Santos et al., 2007; Bellaloui et al., 2009; Zobiolo et al.,

2011), tão importantes no desempenho de diversas funções fisiológicas na planta (Taiz e Zeiger, 2013).

Gordon (2007) demonstrou que a concentração de Mn nos tecidos foliares da soja RR sob efeito do glyphosate é menor que as convencionais, sendo assim, acabam necessitando de aplicações foliares de Mn para alcançarem altos rendimentos. Da mesma forma, Serra et al., 2011, ao avaliarem a eficiência nutricional em soja RR, concluíram que a aplicação de glyphosate interferiu de forma negativa na eficiência nutricional da planta e nos teores totais de N, Mn, Cu, Zn e Fe.

Mesmo com os decréscimos ocorridos na concentração de alguns nutrientes na folha da soja TMG 115 RR, todos os valores para macro e micronutrientes apresentados neste trabalho estão dentro do nível adequado para a cultura da soja (Tabelas 12 e 13), em condições de cerrado (Souza e Lobato, 2004). Resultado semelhante para soja RR foi observado por Bott et al. (2008), que concluíram que, embora o glyphosate possa formar complexos estáveis com cátions e induzir deficiência interna nutricional, as concentrações foliares de alguns micronutrientes permaneceram em níveis adequados, levando-se em consideração as diferentes condições de solo e sistemas de cultivo.

Por exemplo, no caso do N, mesmo quando a aplicação de glyphosate inibiu a formação de nódulos (Tabelas 6 e 7), este fato poderia estar estimulando a planta a acumular o N do solo para compensar a redução do número e do peso dos nódulos (Bohm et al., 2009). Outro importante fator que ameniza a deficiência nutricional é a reidratação do solo. Segundo Xu et al. (2010), processos como a recuperação do crescimento e da fotossíntese, dependentes da absorção de água e nutrientes, reaparecem novamente após a reabertura dos estômatos, crescimento de novas partes da planta e decréscimos na peroxidação, consequência da retomada do estado hídrico adequado do solo.

3.3.5 Curvas de resposta da fotossíntese a diferentes concentrações de CO₂ (Curva A/C_c)

A Figura 10 mostra os dados da variação da fotossíntese líquida (A) em função de diferentes concentrações de CO₂ (C_c) ajustados ao modelo de Farquhar et al. (1980), assim como a soma dos quadrados dos erros (SQE) do modelo para cada tratamento nas três épocas de avaliação (32, 40 e 50 DAE). As curvas A/C_c geradas por esse modelo ajudam a entender os mecanismos e as variáveis que contribuem para o importante processo da fotossíntese (Yin et al., 2004).

Por meio da análise dos dados, bem como das análises visuais dos gráficos, verifica-se que em nenhum momento houve limitação da atividade fotossintética pela utilização da triose fosfato (TPU). De acordo com Long e Bernacchi (2003), frequentemente a TPU não é uma limitação em nenhuma das concentrações de CO₂ e, sendo assim, somente duas fases podem ser visualizadas (Figura 10), especialmente em experimentos conduzidos em campo (Adam et al., 2000; Pimentel et al., 2007).

Em geral, não foram observadas grandes diferenças entre as curvas feitas aos 32 e 50 DAE, que coincidem com as avaliações antes da submissão dos tratamentos e após o período de retomada da irrigação, respectivamente. As maiores disparidades estão relacionadas com as medidas em 40 DAE, ou seja, oito dias após a aplicação dos tratamentos (Figura 10). Nesta situação, a curva A/C_c de Gly (Figura 10B) apresentou valores de saturação da fotossíntese levemente superiores à de Cap (Figura 10E) e, de forma oposta, Gly+RH (Figura 10H) apresentou valores inferiores aos de Cap+RH (Figura 10K).

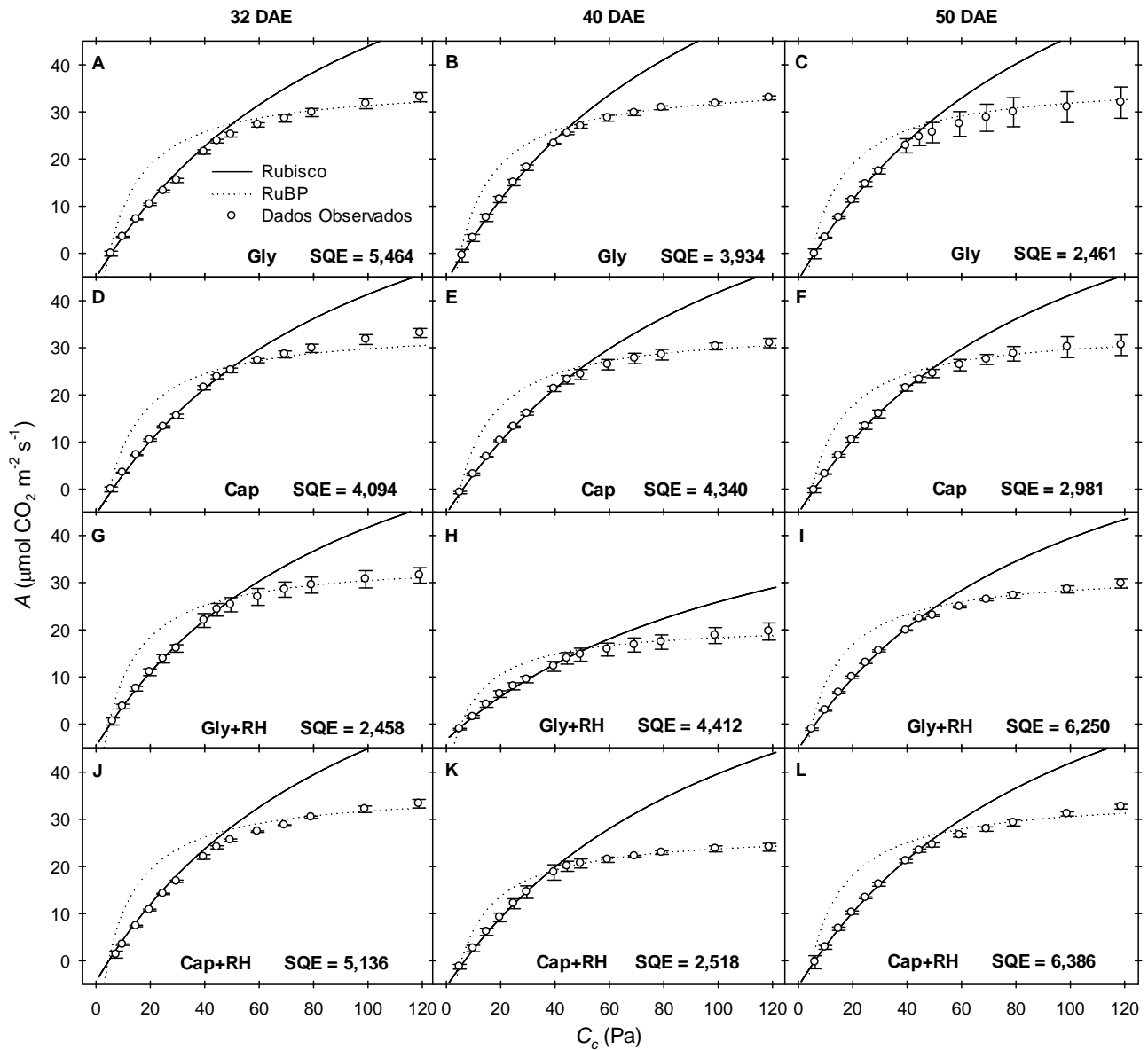


FIGURA 10. Médias (\pm EP; $n = 3$ plantas por tratamento) da resposta da fotossíntese da folha (A) em função da pressão parcial de CO_2 no cloroplasto (C_c) da soja TMG 115 RR para os diferentes tratamentos, em três períodos de avaliação (32, 40 e 50 DAE). São mostradas as funções dos modelos de Farquhar et al. (1980) para limitações de A pela Rubisco (linhas contínuas), e pela regeneração da RuBP (linhas pontilhadas), bem como a soma dos quadrados dos erros (SQE) do modelo.

Pôde-se observar, também, que a limitação da atividade da Rubisco ocorreu em valores próximos de C_c em 50 Pa. Apenas quando as curvas foram feitas em condições de restrição hídrica, esses valores foram reduzidos para 40 Pa.

Pelos resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo, verificou-se efeito significativo da interação $W \times C$ sobre as variáveis taxa máxima de fotossíntese (A_{max}) e taxa de transporte de elétrons em luz saturada (J_{max}) apenas do regime hídrico para a velocidade máxima de carboxilação da Rubisco (V_{cmax}); não foi observado efeito significativo dos tratamentos e interações para a razão entre a taxa máxima de transporte de elétrons e a máxima de carboxilação (J_{max}/V_{cmax}) (Tabela 14).

TABELA 14. Resultados da ANOVA com medidas repetidas no tempo dos parâmetros derivados das curvas A/C_c para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.

Causas de variação *	A_{max}		V_{cmax}		J_{max}		J_{max}/V_{cmax}	
	F	p	F	p	F	p	F	p
R. hídrico (W)	19,60	<0,01	5,46	0,048	30,99	<0,01	0,03 ^{ns}	0,872
Controle (C)	3,97 ^{ns}	0,081	0,06 ^{ns}	0,819	1,95 ^{ns}	0,200	1,29 ^{ns}	0,289
Tempo (t)	9,29	<0,01	2,31 ^{ns}	0,132	9,47	<0,01	1,04 ^{ns}	0,376
$W \times C$	8,89	0,017	2,94 ^{ns}	0,125	6,79	0,031	1,20 ^{ns}	0,305
$W \times t$	13,53	<0,01	3,40 ^{ns}	0,058	16,22	<0,01	0,33 ^{ns}	0,721
$C \times t$	0,60 ^{ns}	0,562	0,28 ^{ns}	0,761	0,17 ^{ns}	0,846	0,05 ^{ns}	0,947
$W \times C \times t$	0,29 ^{ns}	0,752	0,11 ^{ns}	0,892	1,41 ^{ns}	0,271	0,70 ^{ns}	0,509

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
A_{max} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	32,75 (\pm 1,02)	31,91 (\pm 0,76)	26,43 (\pm 1,83)	30,67 (\pm 1,28)
V_{cmax} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	74,47 (\pm 4,35)	65,02 (\pm 4,60)	54,84 (\pm 4,53)	62,01 (\pm 4,46)
J_{max} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	113,26 (\pm 2,63)	109,90 (\pm 2,32)	90,54 (\pm 8,30)	101,66 (\pm 5,12)
J_{max}/V_{cmax}	1,559 (\pm 0,089)	1,745 (\pm 0,102)	1,664 (\pm 0,110)	1,667 (\pm 0,073)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

Embora A_{max} de Gly tenha apresentado o maior valor ($32,75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 2,6% acima de Cap, quando analisado entre os métodos de controle de plantas daninhas (C), os tratamentos com glyphosate mostraram ser 5,4% inferiores ao capinado, em função do menor valor apresentado por Gly+RH ($26,43 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) entre todos os tratamentos. As mesmas observações podem ser feitas para V_{cmax} e J_{max} , sendo que Cap e Cap+RH sempre mostram valores médios relativamente próximos e Gly e Gly+RH apresentam os extremos das variáveis (Tabela 14).

Com relação à razão J_{max}/V_{cmax} , os maiores valores foram observados para o tratamento Cap (1,745) e, também, para Cap+RH (1,667). De forma contrária, Gly, com 1,559, apresentou o menor valor entre os tratamentos, como reflexo do elevado valor V_{cmax} encontrado neste trabalho (Tabela 14).

A A_{max} , à qual corresponde o valor máximo da fotossíntese em altas concentrações de CO_2 , é um parâmetro que varia principalmente em função do transporte de elétrons na fotossíntese, da regeneração da RuBP e pela atividade da Rubisco (Centritto e Jarvis, 1998). Por conta disso, podem ser atribuídos ao baixo desempenho apresentado pela A_{max} de Gly+RH os menores valores encontrados em J_{max} e V_{cmax} desse tratamento em relação aos demais (Tabela 14 e Figura 11).

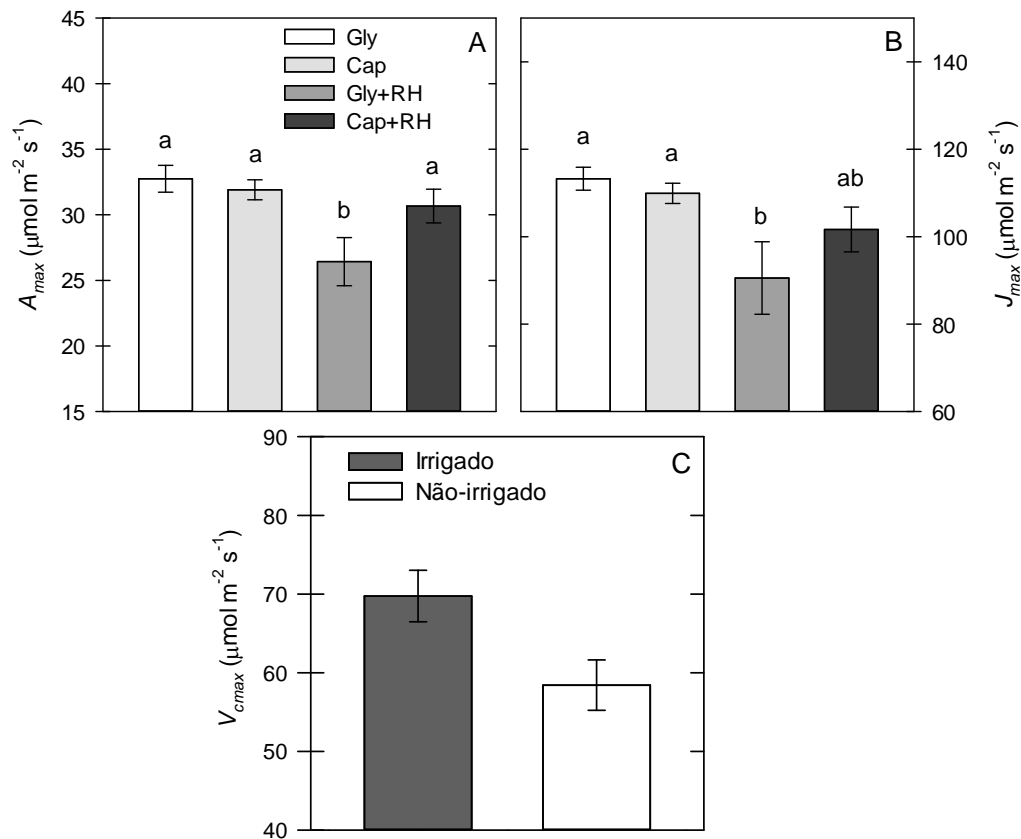


FIGURA 11. Média dos três períodos de avaliação das curvas A/C_c para a taxa máxima de fotossíntese (A_{max}) (A) e taxa de transporte elétrons em luz saturada (J_{max}) (B) (\pm EP; $n = 9$ plantas por tratamento), e da velocidade máxima de carboxilação da Rubisco (V_{cmax}) (C) (\pm EP; $n = 18$ plantas por tratamento) da soja TMG 115 RR. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Como a diferença entre os tratamentos sob restrição hídrica (Gly+RH e Cap+RH) se refere apenas à aplicação de glyphosate durante todo o ciclo da cultura, é possível que o herbicida tenha provocado alterações ou maximizado o efeito da restrição hídrica no metabolismo fotossintético da soja RR, com conseqüente redução nos parâmetros das curvas A/C_c .

Em estudos conduzidos por Yannicari et al. (2012), as menores taxas observadas em J_{max} evidenciaram uma limitação fotossintética na

regeneração da RuBP causada pela aplicação de glyphosate. Sob condições limitantes na regeneração da RuBP, a enzima Rubisco utiliza mais rapidamente a RuBP do que esta última possa ser sintetizada. Sendo assim, a taxa fotossintética (A) não responde mais à elevação de C_i (von Caemmerer e Farquhar, 1981), conforme pode ser visualizado nas Figuras 10H e 11B, nas condições do tratamento Gly+RH.

As reduções observadas em J_{max} também podem ser originadas por outros fatores ligados ao efeito do glyphosate, como redução nas proteínas solúveis e também na concentração de pigmentos fotossintéticos na folha (Evans, 1989), assim como redução do conteúdo total de N na folha, com consequência negativa na regeneração da RuBP (Sudo et al., 2003) pela queda na taxa de transporte de elétrons (Evans e Terashima, 1987).

Ainda, as reduzidas taxas em A , com consequentes menores valores em A_{max} , podem ser relacionadas com uma limitação pela Rubisco, como reflexo nos decréscimos em V_{cmax} (Tabela 14). Sabe-se que a redução na fotossíntese, em condição de restrição hídrica (Figura 11C), pode estar condicionada pela limitação na atividade da Rubisco (Parry et al., 2002), em razão de fatores de inibição ligados às enzimas (Catuchi et al., 2012), assim como pela limitação da síntese de RuBP (Kim e van Iersel, 2011), por meio da redução da taxa de transporte de elétrons fotossintéticos, que influencia a capacidade de regeneração da RuBP (Flexas e Medrano, 2002), dependente do ATP (Lawlor, 2002).

Reduções em V_{cmax} também são atribuídas a decréscimos na quantidade de Rubisco e (Reddy et al., 2004a), às vezes, ao baixo estado de ativação da enzima (Onoda et al., 2005). Como a Rubisco compõe cerca de $\frac{1}{4}$ do N foliar e mais da metade das proteínas solúveis em folhas de plantas C3, uma forte correlação entre o conteúdo de N e a quantidade de Rubisco nas folhas pode ser utilizada para a estimativa no cálculo dessa enzima (Vicente et al., 2011). Neste trabalho, embora não significativo, uma tendência de redução no teor de N foliar foi observada para Gly+RH (Tabela 12), podendo estar relacionada com decréscimos na concentração de Rubisco e, conseqüentemente, redução nos valores de V_{cmax} . Para agravar

essa situação, o conteúdo de proteínas na folha relacionadas à atividade da Rubisco também sofre redução causada pela restrição hídrica (Bota et al., 2004).

Da mesma forma, uma mudança visível na assimilação de CO₂ em resposta a baixas concentrações de C_c, caso da curva A/C_c de Gly+RH (Figura 10H), também indica mudança no comportamento da atividade da Rubisco, que pode ter sido causada pela ação do glyphosate na fotossíntese da planta (Yannicari et al., 2012). Catuchi et al. (2012) concluíram que o decréscimo em A em plantas de soja pode ter sido causado por fatores bioquímicos, como a redução da taxa máxima de carboxilação da Rubisco e o uso das trioses fosfato, quando da não redução significativa em C_i, conforme observado para Gly+RH na Tabela 5 e Figura 5.

O glyphosate também pode ter influenciado negativamente o desempenho da atividade da V_{cmax} em condições de restrição hídrica, ao diminuir o estado hídrico das folhas de soja via potencial hídrico foliar (Tabela 4 e Figura 4), pelo aumento da taxa transpiratória e redução na eficiência instantânea no uso da água (A/E) (Tabela 5 e Figura 5), uma vez que a capacidade de dissipação de calor latente diminui (Maricle et al., 2007), podendo aumentar a temperatura da folha e reduzir a atividade da V_{cmax}, com conseqüente diminuição da assimilação de CO₂ pelas plantas (Catuchi et al., 2012).

Para a razão J_{max}/V_{cmax}, embora não significativa, vale ressaltar o menor valor em Gly entre os demais tratamentos, provavelmente em função da maior condutância estomática (g_s) provocada pelo glyphosate, com reflexo positivo na concentração intercelular de CO₂ (C_i) e na relação entre a concentração interna e a concentração ambiente de CO₂ (C_i/C_a) (Tabela 5; Figuras 5 e 6). Deste modo, as maiores concentrações de CO₂ estariam atuando nas propriedades cinéticas da Rubisco para as reações de carboxilação (Taiz e Zeiger, 2013) e, conseqüentemente, aumentando o desempenho da atividade da V_{cmax} (Nascimento e Marengo, 2013) (Tabela 14). Cedergreen e Olsen (2010), avaliando o efeito do glyphosate como estímulo à fotossíntese em cevada, observaram que, em altas

concentrações internas de CO₂, as plantas tratadas com o herbicida mantiveram taxas fotossintéticas superiores às não tratadas, mesmo considerando que as causas por trás desse crescimento ainda continue não compreendidas e necessite de mais estudos.

De forma contrária, a redução da razão J_{max}/V_{cmax} em Gly+RH pode ser causada por um aumento de temperatura, uma vez que a atividade da Rubisco e a regeneração de RuBP têm diferentes sensibilidades de aclimação à temperatura (Bernacchi et al., 2001), assim como ao estresse hídrico, devido à maior sensibilidade da capacidade de regeneração da RuBP do que da capacidade de carboxilação ao baixo potencial de água na folha (Medrano et al., 2002).

Mesmo que tenham sido observadas diferenças nos parâmetros derivados das curvas A/C_c , como a taxa máxima de fotossíntese (A_{max}) e a taxa de transporte de elétrons em luz saturada (J_{max}) (Tabela 14), não foram observadas alterações significativas nos valores da taxa de respiração no claro (R_d), do ponto de compensação de CO₂ na ausência de respiração mitocondrial (Γ^*) e da condutância mesofílica (g_m), conforme pode ser observado na Tabela 15.

Para R_d , embora não significativo, o tratamento Gly (0,834 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) mostrou-se 13,7% superior ao Cap (0,720 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e, de forma contrária, Gly+RH (0,654 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foi 12,6% inferior ao Cap+RH (0,748 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Tabela 15). O Γ^* foi praticamente o mesmo dentro de cada regime hídrico e levemente superior (1,2%) nos tratamentos sob restrição hídrica em relação aos irrigados. Gly apresentou o menor valor para g_m (8,843 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$), porém, muito próximo ao de Cap (9,283 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$). No entanto, Gly+RH foi 24,2% inferior à Cap+RH, com valores de g_m de 10,61 e 13,99 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$, respectivamente (Tabela 15).

TABELA 15. Resultado da ANOVA com medidas repetidas no tempo da taxa de respiração no claro (R_d), do ponto de compensação de CO_2 na ausência de respiração mitocondrial (Γ^*) e da condutância mesofílica (g_m), derivados das curvas A/C_c , para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações. Também são apresentadas as médias (\pm EP) para cada tratamento.

Causas de variação *	R_d		Γ^*		g_m	
	F	p	F	p	F	p
R. Hídrico (W)	0,19 ^{ns}	0,671	0,46 ^{ns}	0,459	1,48 ^{ns}	0,259
Controle (C)	0,01 ^{ns}	0,958	0,98 ^{ns}	0,982	0,51 ^{ns}	0,493
Tempo (t)	4,68	0,025	0,25 ^{ns}	0,251	1,34 ^{ns}	0,290
W x C	0,36 ^{ns}	0,564	0,95 ^{ns}	0,945	0,30 ^{ns}	0,597
W x t	0,63 ^{ns}	0,544	0,28 ^{ns}	0,273	0,03 ^{ns}	0,974
C x t	0,22 ^{ns}	0,802	0,97 ^{ns}	0,967	0,19 ^{ns}	0,829
.W x C x t	0,33 ^{ns}	0,724	0,29 ^{ns}	0,288	1,98 ^{ns}	0,170

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
R_d ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	0,834 (\pm 0,243)	0,720 (\pm 0,105)	0,654 (\pm 0,134)	0,748 (\pm 0,131)
Γ^* (Pa)	4,465 (\pm 0,044)	4,459 (\pm 0,040)	4,517 (\pm 0,097)	4,519 (\pm 0,081)
g_m ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$)	8,843 (\pm 3,119)	9,283 (\pm 2,688)	10,61 (\pm 3,132)	13,99 (\pm 3,185)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

Vários trabalhos relatam aumento do Γ^* em condições de restrição hídrica (Janoudi et al., 1993; Bota et al., 2002; Warren et al., 2004), conforme observado neste trabalho (Tabela 15), porém, não sendo estatisticamente significativo. Este fato se reflete na diferença não significativa de R_d entre os tratamentos estudados, uma vez que maiores Γ^* implicam taxas respiratórias mais elevadas (Smith et al., 1976).

Segundo Flexas et al. (2012), a g_m é a medida da facilidade de difusão do CO_2 das cavidades subestomáticas para os sítios de carboxilação no cloroplasto, permitindo uma estimativa mais real da atividade da Rubisco (Long e Bernacchi, 2003). É também uma variável que depende tanto das

condições ambientais quanto da estrutura e da anatomia foliar. De acordo com Flexas et al. (2004), em situações de restrição hídrica a g_m tende a decrescer, o que pode ser acentuado quando as folhas apresentam uma estrutura mais robusta em relação à massa (Flexas et al., 2008), o que poderia explicar a diferença observada na g_m dos tratamentos sob restrição hídrica (Tabelas 9 e 15). Além disso, Flexas et al. (2006) sugerem que as aquoporinas podem estar envolvidas na regulação da g_m , particularmente sob estresse hídrico (Miyazawa et al., 2008), ao facilitar a difusão de CO_2 dentro das folhas por aumentar a permeabilidade das membranas a esse gás (Uehlein et al., 2003).

3.3.6 Curvas de resposta da fotossíntese a diferentes densidades de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (Curva $A/DFFA$)

Os dados da curva $A/DFFA$ estão bem ajustados ao modelo da hipérbole não retangular, com valores do coeficiente de determinação (r^2) entre 0,86 a 0,99. De forma geral, diferenças podem ser observadas principalmente na disposição das curvas $A/DFFA$ obtidas no período de avaliação de 40 DAE, tanto entre os regimes hídricos como dentro de cada um deles (Figura 12), de forma semelhante às curvas A/C_c .

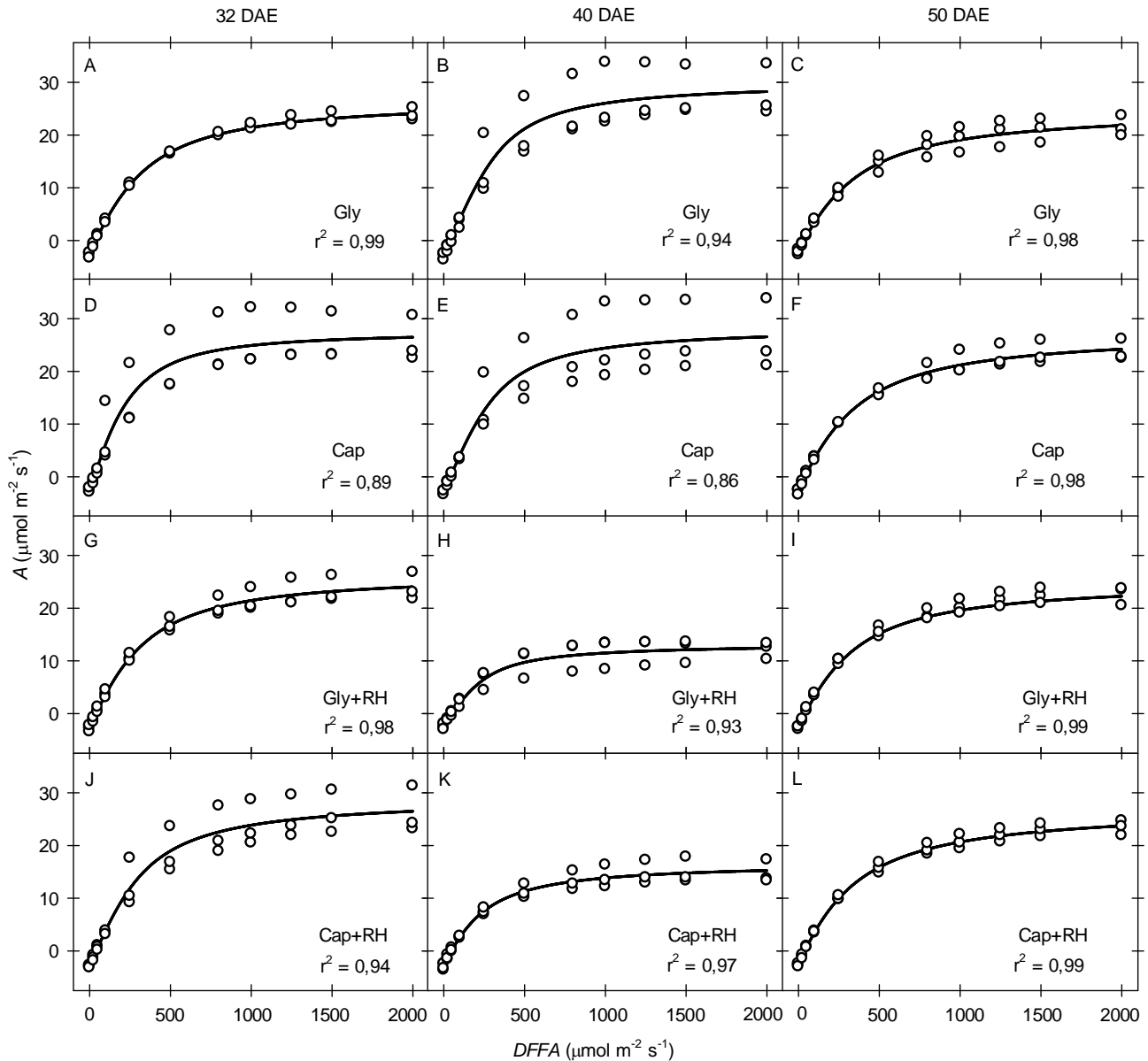


FIGURA 12. Resposta da taxa de fotossíntese líquida (A) à densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos ($DFFA$) da soja TMG 115 RR para os diferentes tratamentos, em três períodos de avaliação (32, 40 e 50 DAE). São apresentados os valores médios (\pm EP; $n = 3$ plantas por tratamento) bem como os valores de r^2 .

Para o parâmetro da curva $A/DFFA$ taxa máxima de fotossíntese em luz saturante (A_{sat}), verificou-se efeito significativo apenas para o fator

regime hídrico. Todavia, vale ressaltar que a interação $W \times C$ foi significativa, mas ao nível de $p = 0,055$ (Tabela 16).

TABELA 16. Resultado da ANOVA com medidas repetidas no tempo da taxa máxima de fotossíntese em luz saturante (A_{sat}), da eficiência quântica aparente (\emptyset) e da convexidade da curva (θ), derivados das curvas $A/DFFA$, para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações. Também são apresentadas as médias ($\pm EP$) para cada tratamento.

Causas de variação *	A_{sat}		\emptyset		θ	
	F	p	F	p	F	p
R. Hídrico (W)	20,31	<0,01	0,14 ^{ns}	0,717	1,10 ^{ns}	0,325
Controle (C)	0,09 ^{ns}	0,768	0,85 ^{ns}	0,382	0,02 ^{ns}	0,903
Tempo (t)	10,39	<0,01	0,90 ^{ns}	0,429	1,07 ^{ns}	0,371
$W \times C$	5,06 ^{ns}	0,055	4,03 ^{ns}	0,079	0,13 ^{ns}	0,723
$W \times t$	19,75	<0,01	3,98	0,045	0,37 ^{ns}	0,697
$C \times t$	0,59 ^{ns}	0,567	0,28 ^{ns}	0,763	1,17 ^{ns}	0,339
$W \times C \times t$	1,78 ^{ns}	0,207	1,64 ^{ns}	0,231	0,82 ^{ns}	0,463

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
A_{sat} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	25,15 ($\pm 1,193$)	23,45 ($\pm 0,553$)	19,38 ($\pm 1,987$)	21,42 ($\pm 1,846$)
\emptyset ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	0,072 ($\pm 0,004$)	0,069 ($\pm 0,002$)	0,065 ($\pm 0,004$)	0,073 ($\pm 0,003$)
θ	0,631 ($\pm 0,046$)	0,587 ($\pm 0,058$)	0,523 ($\pm 0,085$)	0,558 ($\pm 0,050$)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

A A_{sat} apresentou comportamento semelhante à A_{max} (Tabela 14), tendo a A_{sat} de Gly exibido o maior valor ($25,15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 6,7% superior à Cap. Porém, dentro dos métodos de controle de plantas daninhas (C), os tratamentos capinados foram, em média 1,0% superiores aos tratamentos com glyphosate, visto que, novamente, Gly+RH teve o pior desempenho entre os tratamentos, com uma A_{sat} de $19,38 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Os maiores valores de A_{sat} para os tratamentos irrigados sugerem maior capacidade de colheita de luz e maior taxa de transporte de elétrons, assim como maior atividade da enzima Rubisco (Figura 13), evidenciada por maiores valores de V_{cmax} (Figura 11), em vista de uma correlação positiva com a g_s (Barker et al., 1997). Por conta disso, o maior valor encontrado da A_{sat} dentro dos tratamentos irrigados foi para Gly.

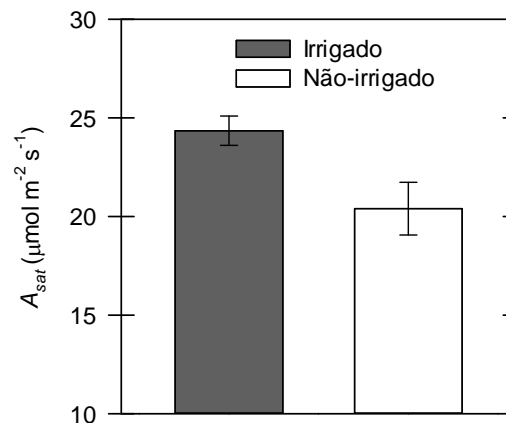


FIGURA 13. Média dos três períodos de avaliação das curvas $A/DFFA$ para a taxa máxima de fotossíntese em luz saturante (A_{sat}) (\pm EP; $n = 18$ plantas por tratamento), da soja TMG 115 RR.

Com relação à eficiência quântica aparente (Φ) e à convexidade da curva (θ), ambos os parâmetros não foram significativamente diferentes (Tabela 16). Os valores da Φ encontrados neste trabalho ficaram em torno da metade do valor teórico máximo de $0,1250 \mu\text{mol mol}^{-1}$ (Taiz e Zeiger, 2013), ou seja, oito fótons requeridos por molécula de CO_2 fixado, mas ficaram dentro do intervalo encontrado por Lobo et al. (2013), que pode estar relacionado com mudanças na eficiência na absorção de luz, fotorrespiração, fotofosforilação cíclica e fatores de estresse que podem afetar as trocas gasosas (Singsaas et al., 2001).

Também, a eficiência quântica aparente (Φ), considerada eficiência fotossintética em baixa intensidade de luz (Marshall e Biscoe, 1980), tende a

decrecer gradualmente em condições de deficiência hídrica no solo. Segundo Zhu et al. (2004), essa redução faz parte de um mecanismo de fotoproteção, que é desencadeado pela competição entre a dissipação térmica depois de receber radiação fotossinteticamente ativa e as reações fotoquímicas dentro do cloroplasto. Tal competição provoca diminuição na eficiência do uso da luz e, conseqüentemente, diminui a fotossíntese. Neste trabalho, essa diminuição ficou mais evidente no tratamento sob restrição hídrica e com a aplicação de glyphosate (Gly+RH), com reflexo negativo na taxa máxima de fotossíntese em luz saturante (A_{sat}) (Tabela 16) em relação aos demais tratamentos, mesmo com a interrupção da irrigação por oito dias consecutivos.

A respeito da convexidade da curva (θ), definida como indicação da proporção física para a resistência total à difusão de CO_2 nos cloroplastos (Akhkha, 2010), como parâmetro determinado principalmente pela capacidade relativa da Rubisco (Ogren, 1993), os efeitos da restrição hídrica e da aplicação de glyphosate na θ podem ser relacionados com os decréscimos em V_{cmax} para Gly+RH e acréscimo para Gly (Tabela 14).

Para os demais parâmetros das curvas $A/DFFA$ taxa de respiração no escuro (R_e), luz de saturação ($DFFA_{sat}$) e ponto de compensação de luz (PCL), não foram observadas diferenças significativas para os fatores W e C e para a interação $W \times C$ (Tabela 17).

TABELA 17. Resultado da ANOVA com medidas repetidas no tempo da taxa de respiração no escuro (R_e), da luz de saturação ($DFFA_{sat}$) e do ponto de compensação de luz (PCL), derivados das curvas $A/DFFA$, para os fatores método de controle de plantas daninhas (C), regime hídrico (W), tempo (t) e interações. Também são apresentadas as médias ($\pm EP$) para cada tratamento.

Causas de variação *	R_e		$DFFA_{sat}$		PCL	
	F	p	F	p	F	p
R. Hídrico (W)	1,47 ^{ns}	0,260	0,87 ^{ns}	0,379	4,41 ^{ns}	0,069
Controle (C)	0,03 ^{ns}	0,861	0,02 ^{ns}	0,892	0,45 ^{ns}	0,519
Tempo (t)	0,44 ^{ns}	0,652	2,79 ^{ns}	0,098	4,18	0,040
$W \times C$	2,95 ^{ns}	0,124	0,04 ^{ns}	0,838	0,10 ^{ns}	0,759
$W \times t$	2,33 ^{ns}	0,137	0,08 ^{ns}	0,921	0,60 ^{ns}	0,562
$C \times t$	0,35 ^{ns}	0,708	0,64 ^{ns}	0,542	0,45 ^{ns}	0,644
$W \times C \times t$	2,19 ^{ns}	0,152	0,38 ^{ns}	0,692	0,53 ^{ns}	0,598

Variáveis	Tratamentos			
	Gly	Cap	Gly+RH	Cap+RH
R_e ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	2,78 ($\pm 0,204$)	2,51 ($\pm 0,130$)	2,64 ($\pm 0,132$)	2,95 ($\pm 0,194$)
$DFFA_{sat}$ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	1816,4 ($\pm 179,0$)	1907,7 ($\pm 189,4$)	2028,2 ($\pm 318,9$)	2116,1 ($\pm 271,2$)
PCL ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	40,11 ($\pm 2,780$)	37,83 ($\pm 1,946$)	43,83 ($\pm 2,542$)	43,01 ($\pm 1,918$)

^{ns} não-significativo a 5% de probabilidade do erro.

As taxas médias de R_e apresentaram comportamento distinto entre os métodos de controle de plantas daninhas (C). Para os tratamentos com glyphosate houve decréscimo da ordem de 5,0% de Gly para Gly+RH, enquanto para os tratamentos capinados o resultado foi um aumento de 6,1% de Cap para Cap+RH (Tabela 17). Dinghui et al. (2011) salientam que a variação na R_e é atribuída à demanda por produtos respiratórios para os processos de crescimento e manutenção, portanto, relacionando as maiores R_e com altas taxas de crescimento. Essa afirmação poderia ajudar a entender o comportamento da R_e para Cap+RH como forma de superar o atraso no crescimento provocado pela restrição hídrica (Tabela 17), e ao

final do processo aproximar os valores de A_{max} e $MSTmax$ dos valores de Cap (Figura 11, Tabela 3).

Schurr et al. (2000) acrescentam que é possível não encontrar diferenças entre R_e de folhas maduras de plantas bem hidratadas e sob restrição hídrica, embora um efeito deletério nesse parâmetro seja observado em deficiências de água mais acentuadas, o que poderia estar mais relacionado com o comportamento de R_e nos tratamentos com glyphosate, em vista da menor eficiência instantânea no uso da água (A/E) e menores potenciais hídricos para o tratamento Gly+RH em relação aos capinados, conforme as Figuras 4 e 5, respectivamente. Avaliando a tolerância à deficiência hídrica entre cultivares transgênica e convencional de soja, Catuchi et al. (2011) também observaram estabilidade entre os parâmetros R_e , $DFFA_{sat}$ e PCL , mesmo após condições de estresse hídrico na soja RR.

Para o parâmetro $DFFA_{sat}$, os valores médios dos tratamentos com glyphosate foram 4,5% inferiores aos capinados, indicando que mais energia é necessária para alcançar a máxima atividade fotossintética (Ribeiro et al., 2005). De forma oposta, os valores para PCL foram 3,8% superiores na mesma comparação feita para o parâmetro $DFFA_{sat}$ (Tabela 17).

O PCL , definido como o valor de $DFFA$ em que o CO_2 assimilado pela fotossíntese está em balanço com o CO_2 emitido pela respiração na luz e fotorrespiração (Lobo et al., 2013), pode ser afetado de maneira indireta pela capacidade fotossintética, uma vez que sua redução promove redução nas taxas de respiração (R_e) e assim afeta o PCL (Lewis et al., 2000). Da mesma forma, um aumento no PCL também pode estar relacionado a um aumento da R_e , mantendo-se um rendimento quântico (Φ) estável, o qual fornece uma proporção de carbono fixado por unidade de quanta de luz absorvido (Akhkha, 2010), conforme pode ser de maneira geral neste trabalho (Tabelas 16 e 17).

Além disso, o aumento no PCL em condições de restrição hídrica indica que um maior fluxo de fótons é requerido para alcançar o equilíbrio entre o O_2 liberado na fotossíntese e o O_2 absorvido pela respiração. Uma

vez que não foram observadas diferenças significativas nos valores de R_e , indicando que o consumo de O_2 continua o mesmo, o aumento do PCL pode estar diretamente ligado à fase fotoquímica da fotossíntese. Uma tendência na redução na concentração de clorofila e nos valores de J_{max} mostra que a etapa fotoquímica sofreu com a restrição hídrica, o que implica uma interrupção do fluxo de elétrons do fotossistema II (PSII), como consequência, uma maior quantidade de fótons é requerida para promover a oxidação da água e reduzir o $ADP + P_i$ a ATP (Larcher, 2003; Delatorre et al., 2008).

3.4 CONCLUSÕES

Os resultados sugerem redução significativa no número de nódulos para os tratamentos que receberam aplicação de glyphosate, independentemente do regime hídrico adotado, sendo observada uma tendência para a redução na matéria seca de nódulos, valendo para a mesma comparação feita anteriormente.

Tanto a restrição hídrica quanto a aplicação de glyphosate não foram suficientes para alterar significativamente a área foliar específica, assim como a concentração de quase todos os pigmentos fotossintéticos na folha da soja TMG 115 RR. Porém, verificou-se decréscimo no teor de pigmento carotenoide em condições de restrição hídrica e aplicação de glyphosate, para o período entre a aplicação dos tratamentos e a retomada da irrigação.

Não foram observadas reduções relevantes nos teores foliares dos macro e micronutrientes estudados no presente trabalho. No entanto, alguns elementos, tais como nitrogênio N, Ca, Fe e Mn, exibiram disposição para menores concentrações no tecido foliar principalmente quando sob efeito do herbicida e na ausência de irrigação.

A soja RR apresentou acréscimos na capacidade fotossintética com a aplicação do glyphosate e irrigação adequada, como consequência do aumento na eficiência dos parâmetros fisiológicos A_{max} , V_{cmax} , J_{max} e A_{sat} , embora não diferindo do tratamento capinado. Em contrapartida, a redução

nos parâmetros da fotossíntese observados em Gly+RH indica aumento no efeito deletério provocado pela restrição hídrica na fisiologia da planta na presença do herbicida glyphosate, tornando seu aparato fotossintético mais sensível nessa condição ambiental e de manejo.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-IRMAILEH, B.E.; JORDAN, L.S. Some aspects of glyphosate action in Purple Nutsedge (*Cyperus rotundus*). **Weed Science**, v. 26, p.700-703, 1978.

ADAM, N.R.; WALL, G.W.; KIMBALL, B.A.; PINTER JR, P.J.; LAMORTE, R.L.; HUNSAKER, D.J.; ADAMSEN, F.J.; THOMPSON, T.; MATTHIAS, A.D.; LEAVITT, S.W.; WEBBER, A.N. Acclimation response of spring wheat in a free-air CO₂ enrichment (FACE) atmosphere with variable soil nitrogen regimes. 1. Leaf position and phenology determine acclimation response. **Photosynthesis Research**, v.66, p.65-77, 2000.

AGELET, L.E.; ARMSTRONG, P.R.; TALLADA, J.G.; HURBURGH JR., C.R. Differences between conventional and glyphosate tolerant soybeans and moisture effect in their discrimination by near infrared spectroscopy. **Food Chemistry**, v.141, p.1895-1901, 2013.

AIDAR, ST.; MEIRELLES, S.T.; POCIUS, P.; DELITTI, W.B.C.; SOUZA, G.M.; GOLÇALVES, A.N. Desiccation tolerance in *Pleurostima purpurea* (Velloziaceae). **Plant Growth Regulation**, v.62, p.193-202, 2010.

AKHKHA, A. Modelling photosynthetic light-response curve in *Calotropis procera* under salinity or water deficit stress using non-linear models. **Jornal of Taibath University for Science**, v.3, p.49-57, 2010.

AKINCI, S.; LÖSEL, D.M. Plant Water-Stress Response Mechanisms. In RAHMAN, I.M.M.; HASEGAWA, H. (Eds.), **Water Stress**, Rijeka, Croatia. In Tech, 2012, p.15-42.

ALBRECHT, L.P.; ÁVILA, M.R. Manejo de glyphosate em soja RR e qualidade das sementes. **Informativo ABRATES**, v.20, n.1,2, p.45-54, 2010.

ALVES, R.R.P.; COSTA, A.C.; MEGGUER, C.A.; SILVA, F.B.; CAMPOS, G.W.B.; MOURA, L.M.F. Efeito do herbicida glifosato no conteúdo de pigmentos cloroplastídicos de plantas de *Crambe abyssinica* H. In: I Congresso de Pesquisa e Pós-Graduação do Campus Rio Verde do IFGoiano. 06 e 07 de novembro de 2012. **Anais...** Câmpus Rio Verde – GO, 2012.

BARKER, M.G.; PRESS, M.C.; BROWN, N.D. Photosynthetic characteristics of dipterocarp seedlings in three tropical rain forest light environments: a basis for niche partitioning? **Oecologia**, v.112, p.453-463, 1997.

BERNACCHI, C.J.; SINGSAAS, E.L.; PIMENTEL, C.; PORTIS JR, A.R.; LONG, S.P. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. **Plant, Cell and Environment**, v.24, p.253-259, 2001.

BELLALLOUI, N.; REDDY, K.N.; ZABLOTOWICZ, R.M.; ABBAS, H.K.; ABEL C.A. Effects of glyphosate application on seed iron and root ferric (III) reductase in soybean cultivars. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.57, p.9569-9574, 2009.

BELTRANO, J.; RONCO, M.G.; ARANGO, M.C. Soil drying and rewatering applied at three grain developmental stages affect differentially growth and grain protein deposition in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, n.2, p.341-350, 2006.

BING-SONG, Z.; DE-AN, J.; PING, W.; XIAO-YAN, W.; QING, L.; NI-YAN, W. Relation of Root Growth of Rice Seedling with Nutrition and Water Use Efficiency Under Different Water Supply Conditions. **Rice Science**, v.12, n.4, p.291-298, 2006.

BOHM, G.M.B.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; XAVIER, G.R.; HAX, F.; ROMBALDI, C.V. Glyphosate- and imazethapyr-induced effects on yield, nodule mass and biological nitrogen fixation in field-grown glyphosate-resistant soybean. **Soil Biology & Biochemistry**, v.41, p.420-422, 2009.

BOTA, J.; FLEXAS, J.; KEYS, A.J.; LOVELAND, J.; PARRY, M.A.J.; MEDRANO, H. CO₂/O₂ specificity factor of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase in grapevines (*Vitis vinifera* L.): First *in vitro* determination and comparison to *in vivo* estimations. **Vitis**, v.41, n.4, p.163-168, 2002.

BOTA, J.; MEDRANO, H.; FLEXAS, J. Is photosynthesis limited by decreased Rubisco activity and RuBP content under progressive water stress? **New Phytologist**, v.162, p.671-681, 2004.

BOTT, S.; TEFAMARIAM, T.; CANDAN, H.; CAKMAK, I.; ROMHELD, V.; NEUMANN, G. Glyphosate-induced impairment of plant growth and micronutrient status in glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). **Plant Soil**, v.312, p.185-194, 2008.

BOTT, S.; TEFAMARIAM, T.; KANIA, A.; EMAN, B.; ASLAN, N.; ROMHELD, V.; NEUMANN, G. Phytotoxicity of glyphosate soil residues remobilized by phosphate fertilization. **Plant Soil**, v.342, p.249-263, 2011.

CAKMAK, I.; YAZICI, A.; TUTUS, Y.; OZTURK, L. Glyphosate reduced seed and leaf concentrations of calcium, manganese, magnesium, and iron in non-glyphosate resistant soybean. **European Journal of Agronomy**, v.31, p.114-119, 2009.

CARVALHO, T.C.; GRZYBORHKI, C.R.S.; OHLSON, O.C.; PANOBIANCO, M. Comparação da qualidade fisiológica de sementes de soja convencional e de sua derivada transgênica. **Revista Brasileira de Sementes**, v.34, n.1, p.164-170, 2012.

CARVALHO, F.P.; FRANÇA, A.C.; LEMOS, V.T.; FERREIRA, E.A.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A. Photosynthetic activity of coffee after application of glyphosate subdoses. **Acta Scientiarum**, v.35, n.1, p.109-115, 2013.

CATUCHI, T.A.; VÍTOLO, H.F.; BERTOLLI, S.C.; SOUZA, G.M. Tolerância à deficiência hídrica entre dois cultivares de soja: transgênico *versus* convencional. **Ciência Rural**, v.41, n.3, p.373-378, 2011.

CATUCHI, T.A.; GUIDORIZZI, F.V.C.; GUIDORIZI, K.A.; BARBOSA, A.M.; SOUZA, G.M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.4, p.519-527, 2012.

CEDERGREEN, N.; STREIBIG, J.C.; KUDSK, P.; MATHIASSEN, S.K.; DUKE, S.O. The occurrence of hormesis in plants and algae. **Dose-Response**, v.5, p.150-162, 2007.

CEDERGREEN, N. Herbicides can stimulate plant growth. **Weed Research** v.48, p.429-438, 2008.

CEDERGREEN, N.; OLESEN, C.F. Can glyphosate stimulate photosynthesis? **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.96, p.140-148, 2010.

CENTRITTO, M.; JARVIS, P.G. Long-term effects of elevated carbon dioxide concentration and provenance on four clones of Sitka spruce (*Picea sitchensis*). II. Photosynthetic capacity and nitrogen use efficiency. **Tree Physiology**, v.19, p.807-814, 1998.

CERDEIRA, A.L.; DUKE, S.O. Effects of glyphosate-resistant crop cultivation on soil and water quality. **GM Crops**, v.1, n.1, p.16-24, 2010.

CHUTIA, J.; BORAH, S.P. Water Stress Effects on Leaf Growth and Chlorophyll Content but Not the Grain Yield in Traditional Rice (*Oryza sativa* Linn.) Genotypes of Assam, India II. Protein and Proline Status in Seedlings under PEG Induced Water Stress. **American Journal of Plant Sciences**, v.3, p.971-980, 2012.

CONSTANTIN, J.; MACHADO, M.H.; CAVALIERI, S.D.; OLIVEIRA JR, R.S.; RIOS, F.A.; ROSO, A.C. Influência do glyphosate na dessecação de capim-braquiária e sobre o desenvolvimento inicial da cultura do milho. **Planta Daninha**, v.26, n.3, p.627-636, 2008.

COUTINHO, C.F.B., MAZO, L.H. Complexos metálicos com o herbicida glifosato: revisão. **Química Nova**, v.28, n.6, p1038-1045, 2005.

DALMAGRO, H.J.; LOBO, F.A.; VOURLITIS, G.; DALMOLIN, A.C.; ANTUNES JUNIOR, M.Z.A.; ORTÍZ, C.E.R.; NOGUEIRA, J.S. Photosynthetic parameters of two invasive tree species of the Brazilian Pantanal in response to seasonal flooding. **Photosynthetica**, v.51, n.2, p. 281-294, 2013.

DELATORRE, J.; PINTO, M.; CARDEMIL, L.; Effects of water stress and high temperature on photosynthetic rates of two species of *Prosopis*. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, v.92, p.67-76, 2008.

DE MARÍA, N.; FELIPE, M.R.; FERNÁNDEZ-PASCUAL, M. Alterations induced by glyphosate on lupin photosynthetic apparatus and nodule ultrastructure and some oxygen diffusion related proteins. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.43, p.985-996, 2005.

DING, W.; REDDY, K.N.; ZABLOTOWICZ, R.; BELLALLOUI, N.; BRUNS, H.A. Physiological responses of glyphosate-resistant and glyphosate-sensitive soybean to aminomethylphosphonic acid, a metabolite of glyphosate. **Chemosphere**, v.83, p593-598, 2011.

DINGHUI, Z.; KUNSHAN, G.; JIANRONG, X. Dark respiration in the light and in darkness of three marine macroalgal species grown under ambient and elevated CO₂ concentrations. **Acta Oceanologica Sinica**, v.30, n.1, 2011.

DRUILLE, M.; CABELLO, M.N.; OMACINI, M.; GOLLUSCIO, R.A. Glyphosate reduces spore viability and root colonization of arbuscular mycorrhizal fungi. **Applied Soil Ecology**, v.64, p.99-103, 2013a.

DRUILLE, M.; OMACINI, M.; GOLLUSCIO, R.A.; CABELLO, M.N. Arbuscular mycorrhizal fungi are directly and indirectly affected by glyphosate application. **Applied Soil Ecology**, v.72, p.143-149, 2013b.

DVORANEN, E.C.; OLIVEIRA JR., R.S.; CONSTANTIN, J.; CAVALIERI, S.D.; BLAINSKI, E. Nodulação e crescimento de variedades de soja RR sob aplicação de glyphosate, fluazifop-p-butyl e fomesafen. **Planta Daninha**, v.26, n.3, p.619-625, 2008.

EKER, S.; OZTURK, L.; YAZICI, A.; ERENOGLU, B.; ROMHELD, V.; CAKMAK, I. Foliar-Applied Glyphosate Substantially Reduced Uptake and

Transport of Iron and Manganese in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.54, p.10019-10025, 2006.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Embrapa Informação Tecnológica. 2. ed. Brasília, 2009, 627p.

EPRON, D.; GODDARD, D.; CORNIC, G.; GENTRY, B. Limitation of net CO₂ assimilation rate by internal resistance to CO₂ transfer in the leaves of two tree species (*Fagus sylvatica* L. and *Castanea sativa* Mill.). **Plant, Cell and Environment**, v.18, p.43-51, 1995.

EVANS, J.R. The dependence of quantum yield on wavelength and growth irradiance. **Australian Journal of Plant Physiology**, v14, p.69-79, 1987.

EVANS, J.R.; TERASHIMA, I. Effects of nitrogen nutrition on electron transport components and photosynthesis in spinach. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.14, p.59-68, 1987.

EVANS, J.R. Photosynthesis and nitrogen relationship in leaves of C₃ plants. **Oecologia**, v,79, p.9-19, 1989.

FARQUHAR, G.D.; VON CAEMMERER, S.; BERRY, J.A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. **Planta** v.149, p.78-90, 1980.

FARQUHAR G.D.; WONG, S.C. An empirical model of stomatal conductance. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.11, p.191-210, 1984.

FENG, P.C.C.; BALEY, G.J.; CLINTON, W.P.; BUNKERS, G.J.; ALIBHAI, M.F.; PAULITZ, T.C.; KIDWELL, K.K. Glyphosate inhibits rust diseases in glyphosate-resistant wheat and soybean. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.102, p.17290-17295, 2005.

FERRONATO, A. **Caracterização do crescimento, da eficiência no uso da água e da radiação da cultivar de soja TMG 115 RR sob tratamento com glifosato**. 125 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, UFMT, Mato Grosso, 2010.

FIGUEIREDO, L.A.; BOARETTO, A.E.; RIBEIRINHO, V.S.; SILVA, D.H. Estado nutricional de soja transgênica e convencional tratadas com glyphosate em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibras**, v.13, n.1, p.19-27, 2009.

FLEXAS, J.; MEDRANO, H. Drought-inhibition of photosynthesis in C₃ plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. **Annals of Botany**,

v.89, p.183-189, 2002.

FLEXAS, J.; BOTA, J.; LORETO, F.; CORNIC, G.; SHARKEY, T.D. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C_3 plants. **Plant Biology**, v.6, p.1-11, 2004.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBO, M.; HANSON, D.T.; BOTA, J.; OTTO, B.; CIFRE, J.; MCDOWELL, N.; MEDRANO, H.; KALDENHOFF, R. Tobacco aquaporin NtAQP1 is involved in mesophyll conductance to CO_2 in vivo. **The Plant Journal**, v.48, p.427-439, 2006.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBO, M.; DIAZ-ESPEJO, A.; GALMÉS, J.; MEDRANO, H. Mesophyll conductance to CO_2 : current knowledge and future prospects. **Plant, Cell and Environment**, v.31, p.602-621, 2008.

FLEXAS, J.; BARBOUR, M.M.; BRENDEL, O.; CABRERA, H.M.; CARRIQUÍ, M.; DÍAZ-ESPEJO, A.; DOUTHE, C.; DREYER, E.; FERRIO, J.P.; GAGO, J.; GALLÉ, A.; GALMÉS, J.; KODAMA, N.; MEDRANO, H.; NIINEMETS, U.; PEGUERO-PINA, J.J.; POU, A.; RIBAS-CARBÓ, M.; TOMÁS, M.; TOSENS, T.; WARREN, C.R. Mesophyll diffusion conductance to CO_2 : An unappreciated central player in photosynthesis, **Plant Science**, v.193-194, p. 70-84, 2012.

GILBERT, M.E.; ZWIENIECKI, M.A.; HOLBROOK, N.M. Independent variation in photosynthetic capacity and stomatal conductance leads to differences in intrinsic water use efficiency in 11 soybean genotypes before and during mild drought. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.8, p. 2875–2887, 2011.

GOBBI, K.F.; GARCIA, R.; VENTRELLA, M.C.; GARCEZ NETO, A.F.; ROCHA, G.C. Área foliar específica e anatomia foliar quantitativa do capim-braquiária e do amendoim-forrageiro submetidos a sombreamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.40, n.7, p.1436-1444, 2011.

GOMEZ, E.; FERRERAS, L.; LOVOTTIA, L.; FERNANDEZ, E. Impact of glyphosate application on microbial biomass and metabolic activity in a Vertic Argiudoll from Argentina. **European Journal of Soil Biology**, v.45, p.163-167, 2009.

GORDON, B. Adubação com manganês em soja convencional e soja resistente ao glyphosate. **Informe Agrônômico**, n.117, p.6-7, 2007.

HARLEY, P.C.; THOMAS, R.B.; REYNOLDS, J.F.; STRAIN, B.R. Modelling photosynthesis of cotton grown in elevated CO_2 . **Plant, Cell and Environment**, v.15, p.271-282, 1992.

JAMES, C. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2009. **ISAAA**, Ithaca, NY, n.41, 2009.

JAMES, T.K.; RAHMAN, A. Efficacy of several organic herbicides and glyphosate formulations under simulated rainfall. **New Zealand Plant Protection**, v.58, p.157-163, 2005.

JANOUDI, A.K.; WIDDERS, I.E.; FLORE, J.A. Water Deficits and Environmental Factors Affect Photosynthesis in Leaves of Cucumber (*Cucumis sativus*). **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.118, n.3, p.366-370, 1993.

KIM, J.; VAN IERSEL, M.W. Slowly developing drought stress increases photosynthetic acclimation of *Catharanthus roseus*. **Physiologia Plantarum**, v.143, p.166-177, 2011.

KING, C. A.; PURCELL, L. C.; VORIES, E. D. Plant growth and nitrogenase activity of glyphosate-tolerant soybean in response to foliar glyphosate applications. **Agronomy Journal**, v.93, p.179-186, 2001.

KITCHEN, L.M.; WITT, W.W.; RIECK, C.E. Inhibition of chlorophyll accumulation by glyphosate. **Weed Science**, v.29, n.4, p.513-516, 1981.

KREMER, R.J.; MEANS, N.E.; KIM, S. Glyphosate affects soybean root exudation and rhizosphere microorganisms. **International Journal of Analytical Environmental Chemistry**, v.85, p.1165-1174, 2005.

LARCHER, W. **Physiological plant ecology**. 4.ed. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 513p.

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, n.370, p.773-787, 2002.

LEWIS, J.D.; MCKANE, R.B.; TINGEY, D.T.; BEEDLOW, P.A. Vertical gradients in photosynthetic light response within an old-growth Douglas-fir and western hemlock canopy. **Tree Physiology**, v.20, p.447-456, 2000.

LIMA, D.B.C.; SILVA, A.G.; PROCÓPIO, S.O.; BARROSO, A.L.L.; DAN, H.A.; COSTA, E.B.; PEREIRA, A.J.B. Seleção de herbicidas para controle de plantas voluntárias de soja resistentes ao glyphosate. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.10, n.1, p.01-12, 2011.

LOBO, F. de A.; BARROS, M.P.; DALMAGRO, H.J.; DALMOLIN, A.C.; PEREIRA, W.E.; SOUZA, E.C.; VOURLITIS, G.L.; RODRIGUEZ ORTIZ, C.E.; Fitting Net Photosynthesis Light Response Curves with Microsoft 1 Excel – A Critical Look at the Models. **Photosynthetica**, n.51, n.3. p.445-456, 2013.

LONG, S.P., HÄLLGREN, J-E. Measurement of CO₂ assimilation by plants in the field and laboratory. In: HALL, D.O.; SCURLOCK, J.M.O.; BOLHAR-NORDENKAMPF, H.R.; LEEGOOD, R.C.; LONG, S.P, eds. **Photosynthesis and productivity in a changing environment: a field and laboratory manual**. London: Chapman and Hall, p.129-167, 1993.

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, n.392, p.2393-2401, 2003.

MANTER, D.K.; KERRIGAN, J. A/Ci curve analysis across a range of woody plant species: influence of regression analysis parameters and mesophyll conductance. **Journal of Experimental Botany**, v.55, p.2581-2588, 2004.

MARCHIOSI, R.; FERRARESE, M.L.L.; BONINI, E.A.; FERNANDES, N.G.; FERRO, A.P.; FERRARESE-FILHO, O. Glyphosate-induced metabolic changes in susceptible and glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.) roots. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.93, p.28-33, 2009.

MARICLE, B.R.; COBOS, D.R.; CAMPBELL, C.S. Biophysical and morphological leaf adaptations to drought and salinity in salt marsh grasses. **Environmental and Experimental Botany**, v.60, p.458-467, 2007.

MARSHALL, B.; BISCOE, P.V. A Model for C₃ Leaves Describing the Dependence of Net Photosynthesis on Irradiance. **Journal of Experimental Botany**, v.31, n.1, p.29-39, 1980.

MASOUMI, H.; MASOUMI, M.; DARVISH, F.; DANESHIAN, J.; NOURMOHAMMADI, G.; HABIBI, D. Change in several Antioxidant Enzymes Activity and Seed Yield by Water Deficit Stress in Soybean (*Glycine max* L.) Cultivars. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v.38, n.3, p.86-94, 2010.

MEDRANO, H.; ESCALONA, J.M.; BOTA, J.; GULÍAS, J.; FLEXAS, J. Regulation of photosynthesis of C₃ plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. **Annals of Botany**, v.89, p.895-905, 2002.

MESCHEDE, D.K.; VELINI, E.D.; CARBONARI, C.A.; TRINDADE, M.L.B.; GOMES, G.L.G.C. Efeitos do glyphosate nos teores de lignina, celulose e fibra em *Brachiaria decumbens*, **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.10, n.1, p.57-63, 2011.

MIYAZAWA, S-I.; YOSHIMURA, S.; SHINZAKI, Y.; MAESHIMA, M.; MIYAKE, C. Deactivation of aquaporins decreases internal conductance to CO₂ diffusion in tobacco leaves grown under long term drought. **Functional Plant Biology**, v.35, p.553-564, 2008.

MOLDES, C.A.; MEDICI, L.O.; ABRAHÃO, O.S.; TSAI, S.M.; AZEVEDO, R.A. Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.30, p.469-479, 2008.

MUNÓZ-RUEDA, A. GONZALES-MURUA, C. BECERRIL, J.M. SÁNCHEZ-DÍAZ. Effects of glyphosate [*N*-(phosphonomethyl)glycine] on photosynthetic pigments, stomatal response and photosynthetic electron transport in *Medicago sativa* and *Trifolium pretense*. **Physiologia Plantarum**, v.66, p.63-68, 1986.

NAHAR, K.; GRETZMACHER, R. Effect of water stress on nutrient uptake, yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under subtropical conditions. **Die Bodenkultur**, v.53, n.1, p.45-51, 2002.

NASCIMENTO, H.C.S.; MARENCO, R.A. Mesophyll conductance variations in response to diurnal environmental factors in *Myrcia paivae* and *Mimosa guianensis* in Central Amazonia. **Photosynthetica**, v.51, n.3, p.457-464, 2013.

OGREN, E. Convexity of the photosynthetic light-response-curve in relation to intensity and direction of light during growth. **Plant Physiology**, v.101, p.1013-1019, 1993.

OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; DVORANEN, E.C.; CONSTANTIN, J.; CAVALIERI, S.D.; FRANCHINI, L.H.M.; RIOS, F.A.; BRAINSKI, E. Influência do glyphosate sobre a nodulação e o crescimento de cultivares de soja resistente ao glyphosate. **Planta Daninha**, v.26, n.4, p.831-843, 2008.

ONODA, Y.; HIKOSAKA, K.; HIROSE, T. Seasonal change in the balance between capacities of RuBP carboxylation and RuBP regeneration affects CO₂ response of photosynthesis in *Polygonum cuspidatum*. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 412, p.755-763, 2005.

ORAKI, H.; KHAJANI, F.P.; AGHAALIKHANA, M. Effect of water deficit stress on proline contents, soluble sugars, chlorophyll and grain yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids. **African Journal of Biotechnology**, v.11, n.1, p.164-168, 2012.

ORCARAY, L.; ZULET, A.; ZABALZA, A.; ROYUELA, M. Impairment of carbon metabolism induced by the herbicide glyphosate. **Journal of Plant Physiology**, v.169, p.27-33, 2012.

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.

PIMENTEL, C.; BERNACCHI, C.; LONG, S. Limitations to photosynthesis at different temperatures in the leaves of *Citrus limon*. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, n.2, p.141-147, 2007.

PORRA, R.J.; THOMPSON, W.A.; KRIEDEMANN, P.E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: Verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.975, p.384-394, 1989.

POWELL, J.R.; CAMPBELL, R.G.; DUNFIELD, K.E.; GULDEN, R.H.; HART, M.M.; LEVY-BOOTH, D.J.; KLIRONOMOS, J.N.; PAULS, K.P.; SWANTON, C.J.; TREVORS, J.T.; ANTUNES, P.M. Effect of glyphosate on the tripartite symbiosis formed by *Glomus intraradices*, *Bradyrhizobium japonicum*, and genetically modified soybean. **Applied Soil Ecology**, v.41, p.128-136, 2009.

PROCÓPIO, S.O.; PIRES, F.R.; MENEZES, C.C.E.; BARROSO, A.L.L.; MORAES, R.V.; SILVA, M.V.V.; QUEIROZ, R.G.; CARMO, M.L. Efeitos de dessecantes no controle de plantas daninhas na cultura da soja. **Planta Daninha**, v.24, n.1, p.193-197, 2006.

REDDY, K.N.; HOAGLAND, R.E.; ZABLOTOWICZ, R.M. Effect of glyphosate on growth, chlorophyll content and nodulation in glyphosate-resistant soybeans (*Glycine max*) varieties. **J. New Seeds**, v.2, n.1, p.37-52, 2000.

REDDY, K.N.; ZABLOTOWICZ, R.M. Glyphosate-resistant soybean response to various salts of glyphosate and glyphosate accumulation in soybean nodules. **Weed Science**, v. 51, p.496-502, 2003.

REDDY, A.R.; CHAITANYA, K.V.; VIVEKANANDAN, M.V. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. **Journal of Plant Physiology**, v.161, p.189-1202, 2004a.

REDDY, K.N.; RIMANDO, A.M.; DUKE, S.O. Aminomethylphosphonic Acid, a Metabolite of Glyphosate, Causes Injury in Glyphosate-Treated, Glyphosate-Resistant Soybean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.52, p.5139-5143, 2004b.

REDDY, K.N.; BELLALOU, N.; ZABLOTOWICZ, R.M. Glyphosate effect on shikimate, nitrate reductase activity, yield, and seed composition in corn. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.58, p.3646-3650, 2010.

RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C.; OLIVEIRA, R.F. Temperature response of photosynthesis and its interaction with light intensity in sweet orange leaf discs under non-photorespiratory conditions. **Ciência e Agrotecnologia**, v.30, n4, p.670-678, 2005.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e

fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.3, p.287-294, 1998.

SANTOS, J.B.; FERREIRA, E.A.; KASUYA, M.C.M.; SILVA, A.A.; PROCÓPIO, S.O. Tolerance of *Bradyrhizobium* strains to glyphosate formulations. **Crop Protection**, v.24, p.543-547, 2005.

SANTOS, J.B.; FERREIRA, E.A.; REIS, M.R.; SILVA, A.A.; FIALHO, C.M.T.; FREITAS, M.A.M. Avaliação de Formulações de Glyphosate sobre Soja Roundup Ready. **Planta Daninha**, v.25, n.1, p.165-171, 2007.

SCALON, M.C.; FRANCO, A.C. Influência dos fatores ambientais na área foliar específica de espécies lenhosas do cerrado. In: VIII Congresso de Ecologia do Brasil, 23 a 28 de Setembro de 2007. **Anais...** Caxambu-MG, 2007.

SCHURR, U.; HECKNBERGER, U.; HERDEL, K.; WALTER, A.; FEIL, R. Leaf development in *Ricinus communis* during drought stress: dynamics of growth processes, of cellular structure and of sink-source transition. **Journal of Experimental Botany**, v.51, n.350, p.1515-1529, 2000.

SERRA, A.P.; MARCHETTI, M.E.; CANDIDO, A.C.S.; DIAS, A.C.R.; CHRISTOFFOLETI, P.J. Influência do glifosato na eficiência nutricional do nitrogênio, manganês, ferro, cobre e zinco em soja resistente ao glifosato. **Ciência Rural**, v.41, n.1, p.77-84, 2011.

SHANER, D.; BRIDGES, D. Inhibitors of aromatic amino acid biosynthesis (glyphosate). In: SHANER, D.; BRIDGES, D. Herbicide action course. **Anais...** West Lafayette: Purdue University, 2003. p. 514-529.

SHARKEY, T.D.; BERNACCHI, C.J.; FARQUHAR G.D.; SINGSAAS, E.L. Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C3 leaves. **Plant, Cell and Environment**, v.30, p.1035-1040, 2007.

SILVA, E.C.; NOGUEIRA, R.J.M.C. Crescimento de quatro espécies lenhosas cultivadas sob estresse hídrico em casa-de-vegetação. **Revista Ceres**, v.50, n.288, p.203-217, 2003.

SINGH, B.; SINGH, G. Influence of soil water regime on nutrient mobility and uptake by *Dalbergia sissoo* seedlings. **Tropical Ecology**, v.45, n.2, p.337-340, 2004.

SINGSAAS, E.L.; ORT, D.R.; DELUCIA, E.H. Variation in measured values of photosynthetic quantum yield in ecophysiological studies. **Oecologia**, v.128, p.15-23, 2001.

SKREBSKY, E.C.; TABALDI, L.A.; PEREIRA, L.B.; RAUBER, R.; MALDANER, J.; CARGNELUTTI, D.; GONÇALVES, J.F.; CASTRO, G.Y.;

SHETINGER, M.R.C.; NICOLOSO, F.T. Effecto of cadmiun on growth, micronutrient concentration, and δ -aminolevulinic acid dehydratase and acid phosphatase activities in plants of *Pfaffia glomerata*. **Brazilian Society of Plant Physiology**, v.20, n.4, p.285-294, 2008.

SMITH, E.W.; TOLBERT, N.E.; KU, H.S. Variables affecting the CO₂ compensation point. **Plant Physiology**, v.58, p.143-146, 1976.

SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2 ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SU, Y.; ZHU, G.; MIAO, Z.; FENG, Q.; CHANG, Z. Estimation of parameters of a biochemical based model of photosynthesis using a genetic algorithm. **Plant, Cell and Environment**, v.32, p. 1710-1723, 2009.

SUDO, E.; MAKINO, A.; MAE, T. Differences between rice and wheat in ribulose-1,5-bisphosphate regeneration capacity per unit of leaf-N content. **Plant, Cell and Environment**, v.26, p.255-263, 2003.

TAIZ, L.; ZEIGER E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954p.

UEHLEIN, N.; LOVISOLO, C.; SIEFRITZ, F.; KALDENHOFF, R. The tobacco aquaporin NtAQP1 is a membrane CO₂ pore with physiological functions, **Nature**, v.425, p.734-737, 2003.

VELINI, E.D.; ALVES, E.; GODOY, M.C.; MESCHEDE, D.K.; SOUZA, R.T.; DUKE, S.O. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pest Management Science**, v.64, p.489-496, 2008.

VELINI, E.D.; TRINDADE, M.L.B.; BARBERIS, L.R.; DUKE, S.O. Growth regulation and other secondary effects of herbicides. **Weed Science**, v.58, p.351-354, 2010.

VELINI, E.D.; CARBONARI, C.A.; TRINDADE, M.L.B.; GOMES, G.L.G.C.; MESCHEDE, D.K.; DUKE, S.O. Modo de ação do glyphosate. In: VELINI, E.D.; CARBONARI, C.A.; MESCHEDE, D.K.; TRINDADE, M.L.B. **Glyphosate: uso sustentável**. Botucatu: Fepaf, 39-64, 2012.

VICENTE, R.; MORCUENDE, R.; BABIANO, J. Differences in Rubisco and Chlorophyll Content among Tissues and Growth Stages in Two tomato (*Lycopersicon esculentum Mill.*) Varieties. **Agronomy Research**, v.9, p.501-507, 2011.

VILLANUEVA, M.J.C.; MUÑIZ, B.F.; TAMES, R.S. Effects of glyphosate on growth and the chlorophyll and carotenoid levels of yellow nutsedge (*Cyperus esculentus*). **Weed Science**, v.33, p.751-754, 1985.

VON CAEMMERER, S. **Biochemical Models of leaf Photosynthesis**, CSIRO Publishing, Collingwood, Vic, Australia, 2000.

VON CAEMMERER, S.; FARQUHAR, G.D. Some relationship between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. **Planta**, v.153, p376-387, 1981.

VOYTENA, A.P.L. **Estudos morfofisiológicos de uma samambaia epífita da mata atlântica tolerante à dessecação - *Pleopeltis pleopeltifolia* (Raddi) Alston (P olypodiaceae)**. 94 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal). Programa de Pós-graduação em Biologia Vegetal da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina, 2012.

XU, Z.; ZHOU, G.; SHIMIZU, H. Plant responses to drought and rewatering. **Plant Signaling & Behavior**, v.5, n.6, p.649-654, 2010.

YANNICCARI, M.; TAMBUSI, E.; ISTILART, C.; CASTRO, A.M. Glyphosate effects on gas exchange and chlorophyll fluorescence responses of two *Lolium perenne* L. biotypes with differential herbicide sensitivity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.57, p.210-217, 2012.

YAO, H.; HUANG, Y.; HRUSKA, Z.; THOMSON, S.J.; REDDY, K.N. Using vegetation index and modified derivative for early detection of soybean plant injury from glyphosate. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.89, p.145-157, 2012.

YIN, X.; GOUDRIAAN, J.; LANTINGA, E. A.; VOS, J.; SPERTZ, H. J. A flexible sigmoid function of determinate growth. **Annals of Botany**, v.91, p.361-371, 2003.

YIN, X.; OIJEN, M.V.; SCHAPENDONK, A.H.C.M. Extension of a biochemical model for the generalized stoichiometry of electron transport limited C₃ photosynthesis. **Plant, Cell and Environment**, v.27, p.1211-1222, 2004.

WARREN, C.R.; LIVINGSTON, N.J.; TURPIN, H. Water stress decreases the transfer conductance of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings. **Tree Physiology**, v.24, p.971-979, 2004.

WATERLAND, N.L.; FINER, J.J.; JONES, M.L. Abscisic Acid Applications Decrease Stomatal Conductance and Delay Wilting in Drought-stressed Chrysanthemums. **HortTechnology**, v.20, n.5, p.896-901, 2010.

WELLBURN, A.R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v.144, p.307-313, 1994.

ZABLOTOWICZ, R.M.; REDDY, K.N. Impact of glyphosate on the

Bradyrhizobium japonicum symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean : a minireview. **Journal of Environmental Quality**, v.33, n.3, p.825-831, 2004.

ZABLOTOWICZ, R.M.; REDDY, K.N. Nitrogenase activity, nitrogen content, and yield responses to glyphosate in glyphosate-resistant soybean. **Crop Protection**, v.26, p.370-376, 2007.

ZHU, X-G.; ORT, D.R.; WHITMARSH, J.; LONG, S.P. The slow reversibility of photosystem II thermal energy dissipation on transfer from high to low light may cause large losses in carbon gain by crop canopies: a theoretical analysis. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 400, 2004.

ZLATEV, Z.; LIDON, F.C. An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v.24, n.1, p.57-72, 2012.

ZOBIOLE, L.H.S.; OLIVEIRA JR, R.S.; KREMER, R.J.; CONSTANTIN, J.; BONATO, C.M.; MUNIZ, A.S. Water use efficiency and photosynthesis of glyphosate-resistant soybean as affected by glyphosate. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.92, p.182-193, 2010a.

ZOBIOLE, L.H.S.; OLIVEIRA JR, R.S.; KREMER, R.J.; CONSTANTIN, J.; YAMADA, T.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F.A.; OLIVEIRA JR, A. Effect of glyphosate on symbiotic N₂ fixation and nickel concentration in glyphosate-resistant soybeans. **Applied Soil Ecology**, v.44, p.176-180, 2010b.

ZOBIOLE, Z.H.S.; KREMER, R.J.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; CONSTANTIN, J. Glyphosate affects chlorophyll, nodulation and nutrient accumulation of "second generation" glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.99, p.53-60, 2011.

ZONETTI, P.C.; SUZUKI, LS.; BONINI, E.A.; FERRARESE, M.L.L.; FERRARESE-FILHO, O. Growth and root lignification of susceptible and glyphosate-resistant soybean. **Acta Scientiarum**, v.33, n.2, p.291-295, 2011.

4 CONCLUSÕES

Conforme esperado na hipótese deste trabalho, foram observados incrementos nas variáveis do intercâmbio gasoso e nos parâmetros fotossintéticos das curvas A/C_c e $A/DFFA$ da soja cv. TMG 115 RR, em condições de não restrição de água no solo e aplicação de glyphosate, sem alterações no índice de área foliar e na área foliar específica da cultura, mas esses incrementos não foram suficientes para produzir aumento na produtividade final de grãos e alterações significativas no potencial hídrico foliar.

Houve efeito estomático provocado pelo glyphosate, observados pelo aumento na condutância estomática, na relação entre a concentração interna e ambiente de CO_2 , nos parâmetros fotossintéticos das curvas A/C_c e $A/DFFA$ e redução na eficiência instantânea no uso da água, tendo aumentado, por conta disso, significativamente o consumo final de água pela aplicação do herbicida na soja RR.

Também houve redução significativa no número de nódulos para os tratamentos que receberam aplicação de glyphosate, independentemente do regime hídrico adotado.

Contudo, contrariando a hipótese, tanto a restrição hídrica quanto a aplicação de glyphosate não foram suficientes para alterar a concentração de pigmentos fotossintéticos na folha da soja TMG 115 RR, embora, decréscimos no teor de pigmento carotenoide em condições de restrição hídrica e aplicação de glyphosate tenham sido observados. Da mesma forma, não houve reduções relevantes nos teores foliares dos macro e micronutrientes estudados no presente trabalho.

Embora a soja RR tivesse apresentado acréscimos na capacidade fotossintética com a aplicação do glyphosate e irrigação adequada como consequência do aumento do intercâmbio gasoso e dos parâmetros fotossintéticos das curvas A/C_c e $A/DFFA$, nas condições de restrição hídrica observou-se efeito oposto ao tornar o aparato fotossintético da planta de soja RR mais sensível ao processo de desidratação.

Com base nos resultados deste trabalho, sugere-se, como manejo a ser adotado na cultura da soja RR, evitar áreas agrícolas com maior tendência à restrição hídrica, como solos arenosos e/ou com período de restrição hídrica prolongado durante o ciclo da cultura, aumentar a capacidade de retenção de água dos solos e proporcionar melhores condições de desenvolvimento do sistema radicular para tornar o ambiente de cultivo menos propício aos efeitos deletérios na fisiologia da produção da soja RR.