

**MARCIO ZILIO**

**CRESCIMENTO E PARTIÇÃO DE BIOMASSA DE  
CULTIVARES DE SOJA SUBMETIDA À RESTRIÇÃO  
HÍDRICA EM DIFERENTES ESTÁDIOS FENOLÓGICOS**

Tese apresentada ao Curso de  
Doutorado em Produção Vegetal,  
da Universidade do Estado de  
Santa Catarina, como requisito  
parcial para obtenção do título de  
Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Clovis Arruda de  
Souza

**LAGES/SC  
2014**

Z69c

Zilio, Marcio

Crescimento e partição de biomassa de cultivares de soja submetida à restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos / Marcio Zilio. - Lages, 2014.

193 p.: il.; 21 cm

Orientador: Clovis Arruda de Souza

Bibliografia: p. 177-181

Tese (doutorado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Lages, 2014.

1. *Glycine max* L. 2. Deficiência hídrica. 3. Estádios fenológicos. 4. Relação fonte/dreno. 5. Raiz. I. Zilio, Marcio. II. Souza, Clovis Arruda de. III. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal. IV. Título

CDD: 633.34 - 20.ed.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Setorial do  
CAV/ UDESC

**MARCIO ZILIO**

**CRESCIMENTO E PARTIÇÃO DE BIOMASSA DE  
CULTIVARES DE SOJA SUBMETIDA À RESTRIÇÃO  
HÍDRICA EM DIFERENTES ESTÁDIOS FENOLÓGICOS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Produção Vegetal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

**Banca Examinadora**

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Clovis Arruda de Souza  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro: \_\_\_\_\_  
Prof. Ph.D. Luís Sangoi  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Leonardo Bianco de Carvalho  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Samuel Luiz Fioreze  
Universidade do Federal de Santa Catarina – UFSC

Membro: \_\_\_\_\_  
Prof. Ph.D. Christian Bredemeier  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

**Lages, 14/08/2014.**



Para Kamila Maciel Dias



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que iluminou e orientou meus passos nesta busca por um futuro digno. Também agradeço a Ele por dar-me saúde e força para superar as dificuldades encontradas no caminho até aqui. Aos meus pais, Valdemar e Dulce, que me educaram. Agradeço a eles pelo exemplo de vida, que sempre lutaram com dignidade e respeito, não medindo esforços para que eu pudesse concretizar meus objetivos. As minhas irmãs, Andréia, Adriana e Alessandra pelo carinho, amor e dedicação, aos meus sobrinhos Yasmin e Nicolas, pela alegria da vida e a toda minha família. A minha namorada Kamila Maciel Dias, que sempre esteve junto comigo nos momentos difíceis. Agradeço a ela pelo amor, pela cumplicidade, por compartilhar a sua vida comigo e tornar a minha completa. Agradeço a todos os meus amigos que me ajudaram nos momentos difíceis e pelo auxílio inestimável nas análises de campo e laboratório. A meu orientador Clovis Arruda de Souza, pela orientação, amizade, conhecimento e dedicação por tantos anos. Meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para que eu pudesse concretizar mais esse sonho. OBRIGADO!



## RESUMO

ZILIO, Marcio. **Crescimento e partição de biomassa de cultivares de soja submetida à restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos**. 2014. 193 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal – Área: Fisiologia e Manejo de Plantas) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Lages, 2014.

Os efeitos da restrição hídrica no crescimento e na partição de biomassa das plantas dependem da intensidade e duração do período de restrição hídrica e do momento em que ocorre no ciclo da cultura. Além disso, o manejo adotado na cultura pode influenciar nas respostas da planta sob condições de baixa disponibilidade hídrica. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da restrição hídrica no crescimento e partição de biomassa da soja em diferentes estádios de desenvolvimento. Para isso, foram realizados quatro experimentos conduzidos em casa de vegetação. O primeiro trabalho avaliou as alterações no crescimento da soja submetida à restrição hídrica nos estádios reprodutivos do desenvolvimento. Este experimento foi realizado com a cultivar NS 4823 RR submetida à restrição hídrica imposta por 10 dias (sem irrigação) iniciando-se sempre em cada um dos estádios fenológicos reprodutivos desde R1 ao R7. No período final de formação de vagens e no enchimento de grãos das plantas em restrição hídrica o conteúdo relativo de água na folha não foi mantido e as taxas de crescimento de estatura, área foliar e número de nós foram reduzidos. A menor sensibilidade nos estádios iniciais do desenvolvimento reprodutivo a restrição hídrica foi relacionada à capacidade de manter o conteúdo relativo de água nas folhas e aumentar a



relação raiz parte aérea. O segundo experimento determinou as respostas na morfologia e na partição dos assimilados na soja submetida à restrição hídrica nos estádios reprodutivos. O experimento foi realizado com duas cultivares, BMX Magna e BMX Potência RR, submetidas à restrição hídrica imposta por 10 dias (sem irrigação) nos estádios fenológicos de R1 a R7. A restrição de água no período final de formação de vagens e enchimento de grãos reduz a força de dreno, pois reduz o número de vagens e de grãos, e reduz a força de fonte devido à redução da massa seca de parte aérea. O terceiro experimento teve com o objetivo determinar se o uso do gesso seria efetivo na redução dos efeitos da deficiência hídrica no enchimento de grãos. O experimento foi realizado com a cultivar NA 5909 RR submetida a restrição hídrica e as doses de gesso  $0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ,  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  na superfície e  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  incorporado. Em solos com baixa concentração de alumínio o gesso foi efetivo na redução da deficiência hídrica no estádio R5, pois promove o crescimento radicular em subsuperfície através do incremento nas concentrações de cálcio e redução no alumínio. O quarto experimento objetivou determinar se o K seria efetivo na mitigação da restrição hídrica no início do desenvolvimento vegetativo. O experimento foi realizado com a cultivar BMX Turbo RR submetida à restrição hídrica por 12 dias e a doses de  $0 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $30 \text{ mg dm}^{-3}$  e  $60 \text{ mg dm}^{-3}$  de K. A suplementação precoce de K no desenvolvimento da soja aumentou a tolerância à restrição hídrica, através do aumento da densidade de comprimento de raiz e do peso específico de raiz.

**Palavras-chave:** *Glycine max* L. Deficiência hídrica. Estádios fenológicos. Relação fonte/dreno. Raiz.



## ABSTRACT

ZILIO, Marcio. **Growth and biomass partition of soybean cultivars subjected to drought stress at different phenological stages.** 2014. 193 p Thesis (Doctorate in Plant Production - Area: Physiology and Plant Management) - Santa Catarina State University. Post Graduate Program in Plant Production, Lages, 2014.

The effects of drought stress on growth and biomass partitioning of plants depend on the intensity and duration of drought stress and when it occurs in the crop cycle. Besides, plant management adopted can influence the plant responses under conditions of low water availability. The aim of this study was to evaluate the effects of drought stress on the growth and biomass partitioning of soybean in different growth stages. Four experiments were carried in greenhouse conditions. The first work evaluated changes in growth of soybean subjected to drought stress during reproductive development stages. This experiment was performed with NS 4823 cultivar subjected to drought stress for 10 days (without water) during R1 to R7 reproductive phenologic stages. In the end period of pea formation and grain filling of plants in drought stress the relative water content wasn't kept and stature growth rates, leaf area and node numbers were reduced. The lower sensitivity to drought stress in reproductive stage was related to the ability to maintain the relative water content in leaves and to increase root/shoot ratio. The second experiment determined the responses in morphology and partition of assimilate in soybean subjected to drought stress during reproductive stages. This work was conducted with two cultivars, BMX Magna and BMX Potência RR, subjected to



drought stress for 10 days (without water) during R1 to R7 phenologic stages. The drought stress in the end of reproductive stages, such as pod formation and grain filling, reduces the sink strength because reduces pod and grain numbers, and reduces the source strength due to reduced shoot dry mass. The aim of third experiment was to evaluate if the use of gypsum would be effective to reduce drought stress effects in grain filling. This experiment was conducted with NA 5909 RR cultivar subjected to drought stress and gypsum doses of 0 and 6 Mg ha<sup>-1</sup> on surface and 6 Mg ha<sup>-1</sup> incorporated. In soils with low aluminum concentration the gypsum was effective to reduce drought stress in R5 stage of soybean, because promotes root growth on subsurface through increasing in calcium and decreasing in aluminum concentrations. The aim of fourth experiment was evaluate if K would be effective in drought stress mitigation during begging vegetative development. This experiment was conducted with BMX Turbo RR cultivar subjected to drought stress for 12 days and K doses of 0, 30 and 60 mg dm<sup>-3</sup>. Early K supplementation on soybean developmental stages increased drought stress tolerance through increasing in root length density and root specific mass.

**Key words:** *Glycine max* L. Drought stress. Phenological stages. Source/sink ratio. Root.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Teor de umidade do solo após o início da restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivo da soja R1 – R7..... 59
- Figura 2- Estatura em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c) e R4 (d). ..... 60
- Figura 3- Número de nós na haste principal em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios fenológicos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e). ..... 63
- Figura 4- Número de folíolos por planta em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e). ..... 66
- Figura 5- Área foliar do trifólio em expansão em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e). ..... 69
- Figura 6- Conteúdo relativo de água na folha (CRAF) em plantas de soja submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos. .... 72
- Figura 7- Matéria seca de parte aérea (a) e raiz (b) e relação raiz/parte aérea (c) em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica, aos 10 dias após o início da restrição hídrica, nos fenológicos R1, R2, R3, R4, R5 e R6..... 73



- Figura 8- Número de vagens por planta (a), grãos por planta (b), peso de 100 grãos (c) e peso de grãos por planta (d) em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios fenológicos R1, a R7. .... 76
- Figura 9- Relação entre taxas de crescimento e CRAF em plantas de soja submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos. .... 81
- Figura 10- Taxa relativa de expansão foliar do trifólio em desenvolvimento de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios de desenvolvimento reprodutivo R1 a R6..... 96
- Figura 11- Taxa relativa de emissão de folhas de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R6.. 98
- Figura 12- Taxa relativa de crescimento em estatura de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R6..... 99
- Figura 13- Taxa relativa de emissão de nós por planta (a) e nos ramos (b) da cultivar BMX Potência RR submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R6. .... 101



- Figura 14- Área foliar específica de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R6.  
..... 103
- Figura 15- Biomassa reprodutiva (flor + vagem + grão) de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R7..... 105
- Figura 16- Relação raiz/parte aérea de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R7.  
..... 107
- Figura 17- Relação biomassa reprodutiva/parte aérea de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R7..... 108
- Figura 18- Relação biomassa reprodutiva/raiz de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R7.  
..... 110
- Figura 19- Relação entre área foliar específica e o efeito relativo da restrição hídrica na biomassa reprodutiva (a) e com a biomassa reprodutiva/parte aérea (b) submetidas à restrição hídrica..... 114



- Figura 20- Crescimento radicular ( $\text{g planta}^{-1}$ ) em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso. .... 133
- Figura 21- Crescimento de parte aérea ( $\text{g planta}^{-1}$ ) em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso. .... 136
- Figura 22- Relação raiz/parte aérea em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso..... 138
- Figura 23- Número de folhas em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso. .... 139
- Figura 24- Teor de umidade do solo em função da suplementação de K com 0 (a); 30 (b) e 60 (c)  $\text{mg dm}^{-3}$  em soja no início do desenvolvimento vegetativo..... 158
- Figura 25- Suplementação de K no crescimento da biomassa radicular de soja no estágio V2..... 160
- Figura 26- Suplementação de K no padrão de distribuição relativa de raiz de soja no estágio V2. .... 161
- Figura 27- Suplementação de K na densidade de comprimento de raiz de soja no estágio V2. .... 162
- Figura 28- Suplementação de K no peso específico de raiz de soja no estágio V2..... 163



Figura 29- Suplementação de K na biomassa radicular (a),  
biomassa de parte aérea (b), relação raiz/parte aérea  
(c) e área foliar (d) em soja no estágio V2..... 164



## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1- Efeito relativo da restrição hídrica de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) nos estádios de desenvolvimento reprodutivo R1 a R7..... 117
- Tabela 2- Concentração de cálcio, enxofre, magnésio e alumínio nos diferentes perfis do solo, considerando a aplicação de gesso..... 131
- Tabela 3- Crescimento radicular ( $\text{g planta}^{-1}$ ) por perfil do solo em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso..... 135
- Tabela 4- Concentração de nutrientes nas folhas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso..... 141



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>35</b>
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	36
1.2 HIPÓTESES.....	44
1.3 OBJETIVOS.....	45
<b>1.3.1 Objetivos Gerais.....</b>	<b>45</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>46</b>
<b>2 CRESCIMENTO DE PLANTAS DE SOJA SUBMETIDAS À RESTRIÇÃO HÍDRICA NO PERÍODO REPRODUTIVO.....</b>	<b>54</b>
2.1 RESUMO .....	54
2.2 INTRODUÇÃO .....	55
2.3 MATERIAL E MÉTODOS .....	57
2.4 RESULTADOS.....	59
<b>2.4.1 Teor de água no solo.....</b>	<b>59</b>
<b>2.4.2 Estatura.....</b>	<b>59</b>
<b>2.4.3 Número de nós e internódios.....</b>	<b>62</b>
<b>2.4.4 Área foliar.....</b>	<b>65</b>
<b>2.4.5 Conteúdo relativo de água na folha.....</b>	<b>71</b>
<b>2.4.6 Biomassa.....</b>	<b>72</b>
<b>2.4.7 Componentes do rendimento.....</b>	<b>75</b>
2.5 DISCUSSÃO.....	78
2.6 CONCLUSÃO .....	83
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>
<b>3 MORFOLOGIA E PARTIÇÃO DE BIOMASSA EM CULTIVARES DE SOJA SUBMETIDAS À RESTRIÇÃO HÍDRICA NO PERÍODO REPRODUTIVO .....</b>	<b>90</b>
3.1 RESUMO .....	90
3.2 INTRODUÇÃO .....	91
3.3 MATERIAL E MÉTODOS .....	93
<b>3.3.1 Experimento 1.....</b>	<b>93</b>
<b>3.3.2 Experimento 2.....</b>	<b>94</b>
3.4 RESULTADOS.....	95
<b>3.4.1 Experimento 1.....</b>	<b>95</b>



3.4.1.1 Área foliar .....	95
3.4.1.2 Estatura de planta .....	99
3.4.1.3 Número de nós .....	100
3.4.2 Experimento 2.....	102
3.4.2.1 Área foliar específica.....	102
3.4.2.2 Biomassa.....	104
3.4.2.3 Relação raiz/parte aérea .....	106
3.4.2.4 Relação biomassa reprodutiva/parte aérea.....	108
3.4.2.5 Relação biomassa reprodutiva/raiz .....	109
3.5 DISCUSSÃO .....	111
3.6 CONCLUSÃO .....	118
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>119</b>
<b>4 CRESCIMENTO RADICULAR EM SOJA SUBMETIDA À RESTRIÇÃO HÍDRICA E APLICAÇÃO DE GESSO .....</b>	<b>124</b>
4.1 RESUMO .....	124
4.2 INTRODUÇÃO .....	125
4.3 MATERIAL E MÉTODOS .....	127
4.4 RESULTADOS.....	129
4.4.1 Concentrações de cálcio, magnésio, enxofre e alumínio no solo.....	129
4.4.2 Biomassa radicular.....	132
4.4.3 Biomassa de parte aérea .....	136
4.4.4 Relação raiz/parte aérea .....	137
4.4.5 Número de folhas.....	138
4.4.6 Concentração de nutrientes nas folhas de soja .....	140
4.5 DISCUSSÃO.....	141
4.6 CONCLUSÃO .....	147
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>148</b>
<b>5 EFEITO DA RESTRIÇÃO HÍDRICA E DO POTÁSSIO NO CRESCIMENTO RADICULAR DE PLANTAS DE SOJA.....</b>	<b>153</b>
5.1 RESUMO .....	153
5.2 INTRODUÇÃO .....	154
5.3 MATERIAL E MÉTODOS .....	156



5.4 RESULTADOS .....	158
5.4.1 Teor de umidade do solo.....	158
5.4.2 Biomassa radicular.....	160
5.4.3 Distribuição relativa da raiz.....	161
5.4.4 Densidade de comprimento de raiz.....	162
5.4.5 Peso específico de raiz .....	163
5.4.6 Biomassa de raiz e parte aérea, relação raiz/parte aérea e área foliar .....	164
5.5 DISCUSSÃO.....	167
5.6 CONCLUSÃO .....	171
REFERÊNCIAS .....	172
6 CONCLUSÃO GERAL .....	177
APÊNDICES.....	178
ANEXOS .....	192



## 1 INTRODUÇÃO

As plantas são submetidas a diversos agentes de estresse abióticos e bióticos que podem causar redução no seu crescimento, desenvolvimento e produtividade. Entre os agentes abióticos que causam estresse, a deficiência hídrica é o que mais afeta o crescimento e a produtividade das plantas (ARAUS et al., 2002; CHAVES, 2002; REDDY et al., 2004). Perdas por restrição hídrica causam em média redução de 70% da produção de soja na região sul do Brasil, e 50% das perdas mundiais, enquanto que os prejuízos causados por estresse bióticos reduzem em média de 10 a 20% da produtividade da cultura (ASSAD et al., 2007). Além do déficit hídrico que já acomete algumas regiões e períodos do ano há também preocupações com as previsões ambientais de aquecimento global que estimam um grande aumento das áreas com escassez de água (STOKSTAD, 2004).

O conhecimento do crescimento e desenvolvimento da planta é essencial para a compreensão do comportamento das plantas em condições de restrição hídrica. As alterações no padrão de crescimento de parte aérea e raiz são importantes componentes da adaptação das plantas ao ambiente. Os efeitos da restrição hídrica no crescimento das plantas dependem não somente das características de intensidade e duração do período de restrição hídrica, mas também do momento em que ocorre no ciclo da cultura (DESCLAUX; ROUMET, 1996). De fato, quando se descreve o ambiente no qual a planta está submetido, o aspecto mais relevante é conhecer em que momento específico à planta sofreu a restrição hídrica do que apenas saber que a restrição ocorreu (DESCLAUX et al., 2000). O conhecimento das interações da restrição hídrica com os estádios de desenvolvimento da soja é fundamental para o estabelecimento de estratégias adequadas de manejo, visto que, em vários estádios de desenvolvimento da cultura ocorrem

eventos morfológicos e fisiológicos responsáveis pela definição do potencial de produção.

Como é difícil prever exatamente quando a planta vai enfrentar déficits hídricos durante o seu período de cultivo, principalmente nos períodos mais críticos para a obtenção de elevadas produtividades, interpretar as mudanças no padrão de crescimento nas plantas de soja é de fundamental importância. Compreender como a soja responde à restrição hídrica e os mecanismos de tolerância são fundamentais para prever os impactos na produção da cultura. Segundo Shao et al. (2007), os estudos sobre mudanças no padrão de crescimento de plantas em condições de seca estão aumentando e ganhando atenção em todo mundo, principalmente devido às mudanças climáticas globais.

Nesse sentido, o conhecimento das características de crescimento do sistema radicular das plantas é de grande importância, já que a distribuição das raízes determina a quantidade de água e nutrientes absorvidos, determinando o crescimento e desenvolvimento da planta. No entanto, são poucas as pesquisas que visam à caracterização do crescimento radicular, principalmente em condições de restrição hídrica e de diferentes manejos voltados para a melhoria do desempenho radicular com reflexos em minimizar os efeitos negativos deste tipo de estresse sobre os componentes do rendimento de grãos.

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A água é a substância mais abundante dos tecidos vegetais, constitui aproximadamente 90% da massa da planta, atuando em, praticamente, todos os processos fisiológicos e bioquímicos. Desempenha a função de solvente, através do qual, gases, íons inorgânicos e orgânicos são transportados. Tem, ainda, papel importante na manutenção e na distribuição do calor, pelo processo da transpiração (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A deficiência hídrica pode ser definida como todo o conteúdo de água de um tecido ou célula que está abaixo do conteúdo de água mais alto exibido no estado maior de hidratação. Portanto, a deficiência hídrica determina um desvio significativo das condições ótimas para a planta, induzindo a mudanças e respostas em todos os níveis funcionais do organismo, as quais podem ser reversíveis, em princípio, mas podem se tornar permanentes em situações drásticas. Mesmo se uma condição de deficiência hídrica apresentar caráter temporário, o crescimento da planta pode se tornar cada vez menor conforme a duração do estado de deficiência (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A deficiência hídrica pode ser causada pela escassez de água disponível para as plantas devido ao reduzido volume de chuvas, solos pouco profundos com baixa capacidade de retenção de água ou com impedimentos para a penetração da raiz. Além disso, a deficiência hídrica pode ocorrer por causa da alta demanda evaporativa da atmosfera, relacionada com altas temperaturas e radiação, baixa umidade relativa do ar e ventos. Em muitos casos a deficiência hídrica é resultado da combinação da disponibilidade de água reduzida e demanda evaporativa elevada (ANDRADE; SANDRAS, 2009).

A deficiência hídrica é o mais importante estresse abiótico limitante para o crescimento das plantas e para a produtividade das culturas. O desenvolvimento de genótipos tolerantes a restrição hídrica está se intensificando, devido ao menor suprimento de água para a irrigação, em adição com o estresse imposto pela mudança climática global, como o aumento de temperaturas, mudanças nos padrões de distribuição de chuvas e o aumento das áreas áridas e semiáridas (WHITE et al., 2004). A base para a tolerância à restrição hídrica é complexa e envolve diversos mecanismos adaptativos os quais são geralmente controlados por vários genes. As respostas da planta à restrição hídrica são influenciadas pela duração, intensidade, período e frequência a

restrição, como também pelas diversas interações entre solo – planta – atmosfera (PIERRE et al., 2012).

Em resposta à restrição hídrica, as plantas podem desenvolver mecanismos fisiológicos e morfológicos tanto para retardar (manutenção da hidratação do tecido) como para tolerar a desidratação (manter o metabolismo ativo enquanto desidratada) (TAIZ; ZEIGER, 2004). Mecanismos para retardar a desidratação pode ser resultado da diminuição da perda de água causado pelo fechamento estomático, desenvolvimento de tricomas, redução da área foliar e senescência de folhas velhas para diminuir a transpiração, além de mudanças no tamanho, orientação e enrolamento das folhas para minimizar a superfície exposta à luz (SADRAS; MILROY, 1996; LIZANA et al., 2006; NAGASUGA et al., 2013), ou maximização da absorção de água através do aumento do crescimento radicular (JONGRUNGKLANG et al., 2013). Já os mecanismos de tolerância envolvem o ajustamento osmótico e eficiência na remoção de espécies reativas de oxigênio (KAMELI; LÖSEL, 1995; IANNUCCI et al., 2002; AROCA et al., 2012).

Sobre as características das plantas em resposta à restrição hídrica são importantes algumas considerações: parece não haver nenhuma característica única nas plantas que confira tolerância à seca, mas uma resposta conjunta de diversas características; algumas mudanças morfológicas e fisiológicas que ajudam a melhorar o desempenho das plantas ao estresse são constitutivas (sempre presentes), enquanto outras são adaptativas, ou seja, será expressa apenas sob um dado conjunto de estímulos ambientais; desempenho da planta é uma resposta conjunta das características constitutivas e adaptativas; a planta pode dependendo da duração, intensidade e momento do estresse sofrer aclimação (ACEVEDO, 1987).

A diminuição da biomassa nos cultivos submetidos à restrição hídrica pode ocorrer devido a uma redução na interceptação da radiação e/ou a uma diminuição da eficiência

de conversão da radiação interceptada em biomassa. A redução da radiação interceptada é consequência da menor taxa de expansão de folhas ou da maior senescência foliar. Por outro lado, a menor eficiência de conversão da radiação em biomassa se deve a uma redução na taxa fotossintética por unidade de área foliar (ANDRADE; SANDRAS, 2009). A expansão dos tecidos é muito mais sensível a déficits hídricos do que a fotossíntese (SADRAS; MILROY, 1996).

Na soja, em caso de déficit hídrico, a redução na expansão foliar e aceleração da senescência das folhas fisiologicamente mais velhas é uma tentativa da planta em reduzir o uso da água para uso em períodos posteriores. Apesar de o aumento da taxa de abscisão foliar ser uma estratégia de escape à seca, reduções drásticas na área fotossinteticamente ativa da planta podem acarretar em redução no acúmulo de biomassa (O'TOOLE et al., 1977). Segundo Lawn e Likoswe (2008), quando o déficit hídrico é severo, observa-se a morte progressiva de folhas, iniciando-se pelas mais velhas e seguindo para as mais novas, quando a planta não consegue manter seu status hídrico acima do conteúdo relativo de água crítico.

De acordo com Flexas e Medrano (2002), a disponibilidade de água afeta o crescimento das plantas, por controlar a abertura dos estômatos e, conseqüentemente, a produção de biomassa. O decréscimo de água no solo diminui o potencial de água na folha e sua condutância estomática, promovendo o fechamento dos estômatos. Esse fechamento bloqueia o fluxo de  $\text{CO}_2$  para as folhas, afetando o acúmulo de fotoassimilados, o que pode reduzir o crescimento. A limitação de assimilação de  $\text{CO}_2$  imposta pelo fechamento estomático reduz a concentração intracelular de  $\text{CO}_2$  nas folhas e causa um desequilíbrio na atividade do fotossistema II (PSII) e conseqüente aumento da suscetibilidade há danos fotoquímicos.

Plantas tem desenvolvido ampla diversidade de mecanismos de tolerância à restrição hídrica. Um dos mecanismos que envolvem a adaptação da planta é a relação entre a massa de raiz e parte aérea. Restrição hídrica reduz tanto a massa de raiz e de parte aérea, porém o crescimento da parte aérea mostra-se mais suscetível (LIU; STÜTZEL, 2004). A resposta diferenciada entre o crescimento de raiz e parte aérea em condições de baixo potencial hídrico, é considerada uma adaptação das plantas para manter a absorção de água do solo. Numerosas possibilidades têm sido relatadas para justificar a elevada sensibilidade da elongação celular para baixos potenciais hídricos, incluindo o colapso do gradiente de potencial hídrico e redução da pressão de turgor que promove a força necessária para a expansão celular. A base da tolerância do crescimento radicular em comparação com o crescimento da parte aérea em baixo potencial hídrico pode ser explicada pelo ajustamento osmótico que mantém a pressão de turgor (WU; COSGROVE, 2000).

Compreender os processos de assimilação e alocação de carbono em condições de baixa disponibilidade hídrica é passo fundamental na identificação de cultivares tolerantes à seca. Partição de assimilados entre os vários drenos determina a taxa e o padrão de crescimento das plantas. O aumento da partição do carbono para o crescimento de raiz pode aumentar a capacidade das plantas para tolerar a ocorrência regular de baixa disponibilidade hídrica (GEIGER et al., 1996). Creelman et al. (1990), observaram que diferentes partes da planta de soja sob deficiência hídrica responderam de forma distinta embora os tecidos tenham apresentado similar déficit hídrico e todos tenham níveis de ácido abscísico 5 a 10 vezes maior do que as plantas controle. Crescimento de raiz foi menos afetado ou promovido enquanto o crescimento do hipocótilo e da parte aérea foi reduzido. O aumento da relação raiz/parte aérea resulta da diferente sensibilidade genética ou metabólica dos tecidos ao ácido abscísico.

Os efeitos da restrição hídrica nos componentes do rendimento podem variar de acordo com o estágio de crescimento e o tempo de exposição ao período de baixa disponibilidade hídrica. Restrição hídrica reduziu o número de vagens e o tamanho dos grãos quando foi imposta na floração, número de grãos por vagem quando aplicado do final da floração até o início da formação de vagens e o tamanho dos grãos quando aplicado no final do período de enchimento de grãos (OYA et al., 2004).

A disponibilidade adequada de água no florescimento reduz o aborto de flores e abscisão de vagens e proporciona um incremento no potencial de rendimento de grãos por possibilitar uma maior massa de grãos e número de grãos por vagem. A falta de água durante o enchimento de grãos reduz o tamanho e a massa de grãos, devido à diminuição do suprimento de fotoassimilados produzidos pela planta e/ou inibição do metabolismo do próprio grão (MAEHLER et al., 2003). Portanto, a sensibilidade da soja às restrições hídricas, considerando o rendimento de grãos, tende a aumentar à medida que a cultura avança no seu ciclo, apresentando uma máxima sensibilidade durante o período reprodutivo, principalmente na formação de vagens e enchimento de grãos (KRON et al., 2008).

A produtividade das culturas em condições de baixa disponibilidade hídrica também está correlacionada com a taxa de crescimento da planta e com crescimento das raízes no solo. A taxa de crescimento é função da taxa de assimilação líquida, a qual é um índice da capacidade fotossintética da planta por unidade de área foliar e da taxa de área foliar. A absorção de água e conseqüente transpiração podem ser limitadas pela quantidade de raízes nas camadas de solo e, portanto, afetar a taxa de crescimento (KUSAKA et al., 2005).

A distribuição do sistema radicular tem sido reportada como fator determinante para disponibilidade hídrica, essencialmente porque a posição das raízes estabelece a

extensão da exploração do solo e define um limite superior para o volume de água potencialmente acessível. O nível de detalhes necessários para relacionar o volume de água no solo e a distribuição radicular depende da espécie vegetal, padrão de semeadura e propriedades hidráulicas do solo. O perfil vertical da densidade de raiz é normalmente suficiente para culturas semeadas em altas densidades e em solos com elevada condutividade. A absorção de água pelas raízes é também influenciada pela distribuição e quantidade de água disponível no solo. Como o potencial matricial e a condutividade hidráulica do solo diminuem com o conteúdo de água do solo, solos com baixa disponibilidade hídrica contribuem marginalmente para a absorção de água (LOBET et al., 2014). Nesse sentido, plantas com maior densidade de comprimento de raiz em subsuperfície são mais resistentes à seca, pois apresentam a habilidade de explorar água retida nos perfis mais profundos do solo (ASCH et al., 2005).

Benjamin e Nielsen (2006), avaliando o efeito da restrição hídrica submetida durante a floração e formação das vagens sobre o parâmetro de crescimento radicular da soja, observou que não houve alteração na massa das raízes quando comparado aos tratamentos irrigados e não irrigados nos diferentes estádios de desenvolvimento. No entanto, houve incremento na superfície radicular a maiores profundidades do perfil do solo. A superfície radicular dobrou entre a floração e o enchimento de grãos nos tratamentos não irrigados e triplicou nos tratamentos irrigados. Esses resultados indicam que ocorreu a formação de raízes finas entre as épocas avaliadas.

A busca por práticas de manejo que possibilitem o maior crescimento e melhor distribuição do sistema radicular no perfil do solo, principalmente em regiões ou épocas onde há baixa disponibilidade de água para a cultura, é fundamental como mecanismo de retardar a deficiência hídrica. Nesse sentido, a aplicação de gesso e potássio agrícola pode

promover o aumento do crescimento radicular em subsuperfície evitando a deficiência hídrica.

A aplicação de gesso na superfície seguida por lixiviação para subsolos ácidos resulta em melhor desenvolvimento radicular e maior absorção de água e nutrientes pelas raízes das plantas. Isso pode ocorrer em decorrência do aumento da concentração de cálcio, da formação de espécies menos tóxicas de Al ( $\text{AlSO}_4^+$ ) e da precipitação de  $\text{Al}^{3+}$ , bem como minimizar os efeitos negativos do  $\text{H}^+$  (próton) que em casos de solos com concentração muito baixa de Al (solos orgânicos), mas com baixa concentração de Ca, o suprimento de  $\text{Ca}^{2+}$  é o principal fator responsável pelo melhor desenvolvimento do sistema radicular. Porém, ainda há dúvidas, sobre as condições em que se podem esperar efeitos favoráveis do gesso no crescimento das plantas e quanto ao método de recomendação do produto (CARVALHO; RAIJ, 1997).

A aplicação de gesso no solo leva a modificações químicas no perfil que podem influenciar o crescimento de raízes das culturas anuais. Em cevada, Caires et al. (2001), observaram melhor distribuição relativa de raízes em profundidade quando foi aplicado gesso associado a calagem. Porém, em milho, Caires et al. (2004), mostraram que o aumento da produção na ordem de 17% não foi ocasionado por alterações no crescimento do sistema radicular e esteve relacionado com o aumento da saturação por  $\text{Ca}^{2+}$  nas camadas superficiais do solo.

Também tem sido relatado o efeito do potássio (K) no status hídrico da planta e na superação da deficiência hídrica, através do crescimento radicular. Sangakkara et al. (1996), observaram efeito positivo do K na redução da restrição hídrica em feijão, através do crescimento de raiz. Walker et al. (1998), encontraram que o K estimulou o crescimento da raiz ( $\text{mg planta}^{-1}$ ) e a taxa de alongação ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em plântulas de cevada. Segundo Sangakkara et al. (2001), o K ajuda a mitigar

os efeitos da restrição hídrica em feijão caupi (*Vigna radiata* e *Vigna unguiculata*). De acordo com os autores o K reduziu o potencial hídrico nas folhas, aumentou a taxa fotossintética, a massa seca de parte aérea e a partição de carboidratos para a raiz. Fernández et al. (2011), conclui que área foliar, massa seca, crescimento radicular, nodulação e relação entre raiz e parte aérea, respondeu mais a baixa disponibilidade hídrica do que a doses de K, e que, portanto, adequada disponibilidade hídrica é fundamental para maximizar os benefícios da adubação potássica. A restrição hídrica induz o fechamento estomático reduzindo absorção de K pelas raízes e transporte para a parte aérea. A redução na absorção de K é devido à baixa mobilidade do K em solos secos (ANSCHÜTZ et al., 2014).

## 1.2 HIPÓTESES

(i) Nos estádios iniciais reprodutivos há restrição hídrica não causa deficiência hídrica nas plantas de soja, pois não reduz o conteúdo relativo de água na folha. A soja é responsiva a retomada de água após a restrição hídrica no período de formação de vagens. A soja não responde a aplicação de água após a restrição hídrica no enchimento de grãos.

(ii) A restrição hídrica nos estádios iniciais reprodutivos limita a produção de fonte, no entanto a soja responde a retomada da irrigação. Nos estádios mais avançados da cultura a limitação ocorre no dreno e a soja não responde a retomada de água após a restrição hídrica.

(iii) O gesso promove incremento na biomassa radicular em condições de baixa disponibilidade hídrica.

(iv) O potássio proporciona maior incremento no crescimento radicular em condições de baixa disponibilidade hídrica.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da restrição hídrica em diferentes estádios de desenvolvimento da soja quanto ao crescimento e partição de biomassa.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

(i) Avaliar as alterações no crescimento e componentes do rendimento da soja, submetida à restrição hídrica, imposta nos estádios reprodutivos da cultura, e determinar os fatores responsáveis por estas alterações.

(ii) Determinar as alterações na morfologia e na partição de biomassa de plantas de soja, submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivo.

(iii) Determinar o efeito do gesso no crescimento radicular de plantas de soja, submetidas à restrição hídrica no período de enchimento de grãos.

(iv) Avaliar o efeito do potássio no crescimento radicular de plantas de soja, submetidas à restrição hídrica no período inicial do desenvolvimento vegetativo.

**REFERÊNCIAS**

ANDRADE, F. H.; SANDRAS, V. O. **Bases para el Manejo del Maíz, el Girasol y la Soja**. 3 ed. Balcarce: INTA, 2009.

ANSCHÜTZ, U.; BECKER, D.; SHABALA, S. Going beyond nutrition: Regulation of potassium homeostasis as a common denominator of plant adaptive responses to environment.

**Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 9, p. 670-687, 2014.

Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161714000340> >. Acesso em: 5 jun. 2014.

ARAUS, J. L. et al. Plant breeding and drought in C3 cereals: what should we breed for? **Annals of Botany**, v. 89, n. 7, p. 925-940, 2002. Disponível em: <

<http://aob.oxfordjournals.org/content/89/7/925.abstract> >.

Acesso em: 18 abr. 2013.

AROCA, R.; PORCEL, R.; RUIZ-LOZANO, J. M. Regulation of root water uptake under abiotic stress conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 1, p. 43-57, 2012. Disponível em: <

<http://jxb.oxfordjournals.org/content/63/1/43.abstract> >.

Acesso em: 16 abr. 2013.

ASCH, F. et al. Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice. **Field Crops Research**, v. 93, n. 2-3, p. 223-236, 2005.

Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037842900400259X> >. Acesso em: 24 abr. 2014.

ASSAD, E. D. et al. Sistema de previsão da safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 5, p. 615-625, 2007. Disponível em: <

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2007000500002&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2007000500002&nrm=iso) >. Acesso em: 18 abr. 2013.

BENJAMIN, J. G.; NIELSEN, D. C. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. **Field Crops Research**, v. 97, n. 2-3, p. 248-253, 2006. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429005002510> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, v. 60, n. 3, p. 213-223, 2001. Disponível em: <

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87052001000300009&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052001000300009&nrm=iso) >. Acesso em: 18 abr. 2013.

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 125-136, 2004. Disponível em: <

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832004000100013&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000100013&nrm=iso) >. Acesso em: 18 abr. 2013.

CARVALHO, M. C. S.; VAN RAIJ, B. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant and Soil**, v. 192, n. 1, p. 37-48, 1997. Disponível em: <

<http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1004285113189> >. Acesso em: 22 mai. 2014.

CHAVES, M. M. et al. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, v. 89, n. 7, p. 907-916, 2002. Disponível em: <  
<http://aob.oxfordjournals.org/content/89/7/907.abstract> >.  
Acesso em: 18 abr. 2013.

CREELMAN, R. A. et al. Water Deficit and Abscisic acid cause differential inhibition of shoot versus root growth in soybean seedlings: analysis of growth, sugar accumulation, and gene expression. **Plant Physiology**, v. 92, n. 1, p. 205-214, 1990. Disponível em: <  
<http://www.plantphysiol.org/content/92/1/205.abstract> >.  
Acesso em: 25 jun. 2014.

DESCLAUX, D.; HUYNH, T.-T.; ROUMET, P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. **Crop Science**, v. 40, n. 3, p. 716-722, 2000. Disponível em: <  
<https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/40/3/716> >.  
Acesso em: 16 abr. 2013.

DESCLAUX, D.; ROUMET, P. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. **Field Crops Research**, v. 46, n. 1-3, p. 61-70, 1996. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378429095000860> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

FERNÁNDEZ, F. et al. Soybean shoot and root response to localized water and potassium in a split-pot study. **Plant and Soil**, v. 344, n. 1-2, p. 197-212, 2011. Disponível em: <  
<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-011-0740-z> >. Acesso em: 18 abr. 2013.

FLEXAS, J.; MEDRANO, H. Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. **Annals of Botany**, v. 89, n. 2, p. 183-189, 2002. Disponível em: <  
<http://aob.oxfordjournals.org/content/89/2/183.abstract> >. Acesso em: 24 jan. 2013.

GEIGER, D. R.; KOCH, K. E.; SHIEH, W. J. Effect of environmental factors on whole plant assimilate partitioning and associated gene expression. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. Special Issue, p. 1229-1238, 1996. Disponível em: <  
[http://jxb.oxfordjournals.org/content/47/Special\\_Issue/1229.abstract](http://jxb.oxfordjournals.org/content/47/Special_Issue/1229.abstract) >. Acesso em: 12 jun. 2014.

IANNUCCI, A. et al. Water deficit effects on osmotic adjustment and solute accumulation in leaves of annual clovers. **European Journal of Agronomy**, v. 16, n. 2, p. 111-122, 2002. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030101001216> >. Acesso em: 19 abr. 2013.

JONGRUNGKLANG, N. et al. Drought tolerance mechanisms for yield responses to pre-flowering drought stress of peanut genotypes with different drought tolerant levels. **Field Crops Research**, v. 144, n. 1, p. 34-42, 2013. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429013000051> >. Acesso em: 27 mai. 2013.

KAMELI, A.; LÖSEL, D. M. Contribution of carbohydrates and other solutes to osmotic adjustment in wheat leaves under water stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 145, n. 3, p. 363-366, 1995. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161711819036> >. Acesso em: 19 abr. 2013.

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. Disponível em: <  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87052008000100005&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052008000100005&nrm=iso) >. Acesso em: 16 abr. 2013.

KUSAKA, M.; LALUSIN, A. G.; FUJIMURA, T. The maintenance of growth and turgor in pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] Leeke) cultivars with different root structures and osmo-regulation under drought stress. **Plant Science**, v. 168, n. 1, p. 1-14, 2005. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945204002808> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

LAWN, R. J.; LIKOSWE, A. A. Genotypic differences in leaf area maintenance contribute to differences in recovery from water stress in soybean. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 59, n. 12, p. 1075-1085, 2008. Disponível em: <  
<http://dx.doi.org/10.1071/AR08177> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. **Scientia Horticulturae**, v. 102, n. 1, p. 15-27, 2004. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423804000202> >. Acesso em: 19 abr. 2013.

LIZANA, C. et al. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress: I. Effects of drought on yield and photosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 3, p. 685-697, 2006. Disponível em: <  
<http://jxb.oxfordjournals.org/content/57/3/685.abstract> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

LOBET, G. et al. Plant water uptake in drying soils. **Plant Physiology**, v. 164, n. 4, p. 1619-1627, 2014. Disponível em: < <http://www.plantphysiol.org/content/164/4/1619.abstract> >. Acesso em: 9 abr. 2014.

MAEHLER, A. R. et al. Potencial de rendimento da soja durante a ontogenia em razão da irrigação e arranjo de plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 2, p. 225-231, 2003. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2003000200009&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2003000200009&nrm=iso) >. Acesso em: 16 abr. 2013.

NAGASUGA, K. et al. Water condition controls inclination angles of leaflets and petioles of soybean (*Glycine max* L.). **Environmental Control in Biology**, v. 51, n. 2, p. 79-84, 2013. Acesso em: 25 out. 2013.

O'TOOLE, J. C.; OZBUN, J. L.; WALLACE, D. H. Photosynthetic response to water stress in *Phaseolus vulgaris*. **Physiologia Plantarum**, v. 40, n. 2, p. 111-114, 1977. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.1977.tb01505.x> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

OYA, T. et al. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars: Evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Production Science**, v. 7, n. 2, p. 129-137, 2004.

REDDY, A. R.; CHAITANYA, K. V.; VIVEKANANDAN, M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 161, n. 11, p. 1189-1202, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161704000422> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

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

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378429096000147> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

SAINT PIERRE, C. et al. Phenotyping transgenic wheat for drought resistance. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 5, p. 1799-1808, 2012. Disponível em: <

<http://jxb.oxfordjournals.org/content/63/5/1799.abstract> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

SANGAKKARA, U. R.; FREHNER, M.; NÖSBERGER, J. Influence of soil moisture and fertilizer potassium on the vegetative growth of mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) and cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 186, n. 2, p. 73-81, 2001. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1046/j.1439-037X.2001.00433.x> >. Acesso em: 22 abr. 2013.

SANGAKKARA, U. R.; HARTWIG, U. A.; NÖSBERGER, J. Root and shoot development of *Phaseolus vulgaris* L. (French Beans) as affected by soil moisture and fertilizer potassium. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 177, n. 3, p. 145-151, 1996. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-037X.1996.tb00231.x> >. Acesso em: 10 jun. 2013.

SHAO, H. B. et al. Some advances in plant stress physiology and their implications in the systems biology era. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 54, n. 1, p. 33-36, 2007. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092777650600169X> >. Acesso em: 27 jun. 2014.

STOKSTAD, E. States sue over global warming. **Science**, v. 305, n. 5684, p. 590-590, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencemag.org/content/305/5684/590.2.short> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: ARTMED, 2004.

WALKER, D. J.; BLACK, C. R.; MILLER, A. J. The role of cytosolic potassium and pH in the growth of barley roots. **Plant Physiology**, v. 118, n. 3, p. 957-964, 1998. Disponível em: < <http://www.plantphysiol.org/content/118/3/957.abstract> >. Acesso em: 22 abr. 2013.

WHITE, J. W.; MCMASTER, G. S.; EDMEADES, G. O. Physiology, genomics and crop response to global change. **Field Crops Research**, v. 90, n. 1, p. 1-3, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429004001558> >. Acesso em: 18 abr. 2013.

WU, Y.; COSGROVE, D. J. Adaptation of roots to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 350, p. 1543-1553, 2000. Disponível em: < <http://jxb.oxfordjournals.org/content/51/350/1543.abstract> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

## **2 CRESCIMENTO DE PLANTAS DE SOJA SUBMETIDAS À RESTRIÇÃO HÍDRICA NO PERÍODO REPRODUTIVO**

### **2.1 RESUMO**

A ocorrência da restrição hídrica leva a diferentes mudanças nas taxas de crescimento de parâmetros morfológicos e nos componentes do rendimento de grãos na soja e, estas mudanças podem variar de acordo com o estágio e o tempo de exposição. O trabalho objetivou avaliar as alterações no crescimento da soja submetida à restrição hídrica, imposta nos estádios reprodutivos da cultura, e determinar os fatores responsáveis por estas alterações. O experimento foi realizado em casa de vegetação onde a cultivar NS 4823 RR foi submetida à restrição hídrica imposta por 10 dias (sem irrigação) separadamente, iniciando-se sempre em cada um dos estádios fenológicos reprodutivos desde R1 ao R7. Na testemunha, as plantas foram irrigadas diariamente até o final do experimento. Os estádios fenológicos R3 e R4 foram os mais suscetíveis à restrição hídrica para estatura de planta, comprimento do internódio, área foliar, número de folhas e nós por planta. O conteúdo relativo de água na folha não alterou nos estádios R1 e R2, e apresentou redução linear nos estádios R4, R5 e R6, sendo a maior redução no estágio R6 (6,6 % dia<sup>-1</sup>). A matéria seca da parte aérea foi menor (20 %) nas plantas submetidas à restrição hídrica em R6 e a matéria seca de raiz nos estádios R5 (26 %) e R6 (22 %). A relação raiz/parte aérea foi maior nas plantas com restrição hídrica (0,70) comparada as plantas sem restrição (0,45). O período final de formação de vagens e o enchimento de grãos submetidos à restrição hídrica não mantêm o conteúdo relativo de água na folha e reduz as taxas de crescimento de estatura, área foliar e número de nós. A menor sensibilidade nos estádios iniciais do desenvolvimento reprodutivo a restrição hídrica está relacionada à capacidade de

manter o conteúdo relativo de água e aumento da relação raiz/parte aérea.

Palavras chave: *Glycine max* L.; deficiência hídrica; estádios reprodutivos; área foliar; componentes do rendimento.

## 2.2 INTRODUÇÃO

Considera-se deficiência hídrica a perda moderada de água, que leva ao fechamento estomático e a limitação das trocas gasosas. Dessecação é uma perda mais extensiva de água, na qual pode levar a distúrbios do metabolismo e na estrutura celular. Deficiência hídrica é caracterizada pela redução do conteúdo de água, diminuição do potencial de água na folha, perda de turgor, fechamento estomático e redução das taxas de crescimento da planta.

A época de ocorrência da restrição hídrica leva a diferentes mudanças morfológicas. Restrição hídrica após a floração reduz biomassa devido a decréscimos no peso e diâmetro da haste associado a menor expansão foliar. Restrição hídrica no período de floração e formação de vagens reduziu o número de nós e o comprimento dos internódios em soja (DESCLAUX et al., 2000). A estatura final da haste principal foi menor nas plantas submetidas à restrição hídrica no período de floração e formação de vagens comparadas ao período de enchimento de grãos (ANDRIANI et al., 1991). Restrição hídrica contínua reduziu área foliar por planta em 30 % no estágio R4 e 35 % no estágio R6 (SINCIK et al., 2008). A restrição hídrica imposta no período de floração aumentou o crescimento radicular e aumentou a relação raiz/parte aérea em soja (HUCK et al., 1983).

Os efeitos da restrição hídrica sobre o rendimento de grãos dependem da intensidade, duração, ciclo da cultura, época de ocorrência e da interação com outros fatores

determinantes da expressão do rendimento de grãos (CHAVES et al., 2002). Os componentes do rendimento são determinados em estádios específicos e cada um destes componentes está sujeito às condições ambientais durante este período. Restrição hídrica reduziu o número de vagens e o tamanho do grão quando aplicado na floração, o número de grãos por vagem quando aplicado no final da floração até o início do enchimento de grãos e o tamanho do grão quando a restrição hídrica foi imposta no final no período de enchimento de grãos (OYA et al., 2004).

Como é difícil prever exatamente quando a planta vai enfrentar déficits durante o seu período de cultivo, principalmente nos períodos mais críticos para a obtenção de elevadas produtividades, interpretar as mudanças morfológicas nas plantas de soja expostas a restrição hídrica é de fundamental importância. Compreender como a soja responde à restrição hídrica e os respectivos mecanismos de tolerância são fundamentais para prever os impactos na produção da cultura. Os estudos sobre mudanças no padrão de crescimento e na partição de assimilados de plantas em condições de estresse estão aumentando e ganhando atenção em todo mundo, principalmente devido às mudanças climáticas globais (MÜLLER et al., 2012 CAMPOS et al., 2004). Considerando as grandes perdas na produção de soja ocasionadas pelos eventos de seca e pela complexidade dos mecanismos de resposta tornam-se prioritários os estudos e pesquisas sobre a reação da planta de soja à restrição hídrica.

O trabalho objetivou avaliar as alterações no crescimento e componentes do rendimento da soja submetida à restrição hídrica, imposta nos estádios reprodutivos da cultura, e determinar os fatores responsáveis por estas alterações.

## 2.3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Centro de Ciências Agroveterinárias, na Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UEDESC) em Lages/SC. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com temperatura de  $25 \pm 5$  °C e umidade relativa de  $60 \pm 15$  %. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com 3 repetições. A semeadura foi realizada em vaso de polietileno de 8 litros (solo com teor de argila de 44 %, matéria orgânica de 2,6 % e pH = 6,5) com 5 sementes cada e após o estágio V1 foi realizado desbaste e mantida apenas uma planta por vaso.

**Amostras não destrutivas:** A cultivar NS 4823 RR foi submetida à restrição hídrica imposta por 10 dias (sem irrigação) separadamente, iniciando-se sempre em cada um dos estádios fenológicos de R1 a R7 (FEHR; CAVINESS, 1977). Na testemunha, as plantas foram irrigadas diariamente até o final do experimento. Foram determinadas as variáveis: estatura de planta, comprimento do último internódio em expansão, comprimento e largura do trifólio em expansão, o número de folíolos por planta e o número de nós por planta. Após o período de restrição foi retomada a irrigação e mantidos em condições de não restrição até a colheita (estádio R8), onde foram avaliados os componentes do rendimento: número total de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), peso de grãos por planta (PGP) e peso de 100 grãos (P100). Com base nos dados foram determinadas as taxas de crescimento da cultura, área foliar e relação entre massa de raiz e parte aérea. A área foliar foi obtida através da multiplicação do comprimento e largura da folha pelo coeficiente de 0,69, o qual foi previamente obtido com o auxílio do integrador de área foliar.

**Amostras destrutivas:** A cultivar NS 4823 RR foi submetida aos tratamentos com e sem restrição hídrica aonde foram coletadas plantas nos dias 0, 2, 4, 6, 8, 10 após o início da

restrição de água nos estádios R1, R2, R3, R4 R5 e R6 onde determinaram-se: biomassa de raízes e parte aérea e conteúdo relativo de água na folha (CRAF). O conteúdo relativo de água foi determinado em 3 folíolos de diferentes plantas. A segunda folha completamente expandida a partir do ápice da haste principal foi coletada às 8 horas da manhã e foi pesada (massa fresca). A massa túrgida foi obtida pela reidratação do tecido em água destilada por 24 horas, a temperatura ambiente e ausência de luz. Após a determinação da massa túrgida as amostras foram colocadas em estufa a 80°C por 48 horas e foi obtida a massa seca. O conteúdo relativo de água foi calculado através da fórmula:  $CRAF = (MF - MS) / (MT - MS) \times 100 \%$ .

**Teor de umidade do solo:** As amostras de solo foram pesadas e determinou-se a massa úmida (MU), sendo transferida em seguida para a estufa a 105 °C por 48 horas onde determinou-se a massa seca (MS). O teor de umidade do solo (US) foi obtido através da fórmula:  $US (\%) = [(MU - MS) / MS] \times 100$ . O teor de umidade do solo foi medido a cada 2 dias durante o período de restrição hídrica nas plantas com e sem irrigação. Nas plantas mantidas irrigadas em todo o período e nas plantas onde foi retomada a irrigação após o período de restrição foi padronizado o teor de umidade do solo em aproximadamente 48%.

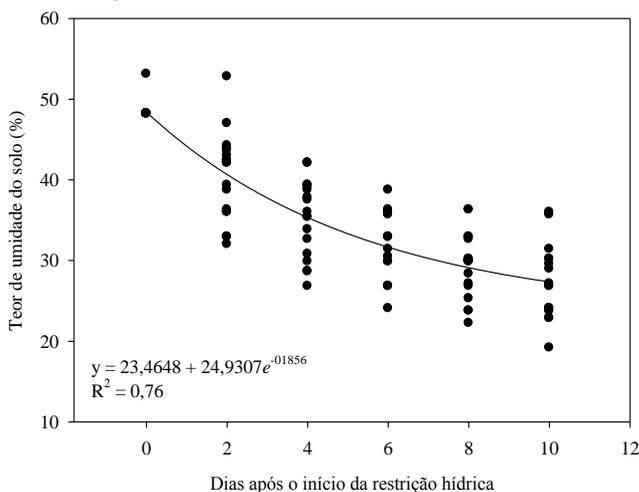
Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando detectadas variações significativas, as médias foram contrastadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para os fatores quantitativos foi procedido ajuste de regressão. Foram testados e escolhidos os modelos que os componentes da equação foram significativos a 5 % de probabilidade e o maior coeficiente de determinação. Procedeu-se também a análise de correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas.

## 2.4 RESULTADOS

### 2.4.1 Teor de água no solo

O teor de umidade do solo apresentou redução durante os 10 dias sem irrigação para todos os estádios fenológicos avaliados com média de 21,3 %, e a evapotranspiração da água no solo apresentou função com comportamento exponencial sendo que a maior redução no teor de umidade do solo ocorreu no estágio R6 com 23,3 % (ver Figura 1).

Figura 1- Teor de umidade do solo após o início da restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivo da soja R1 – R7.



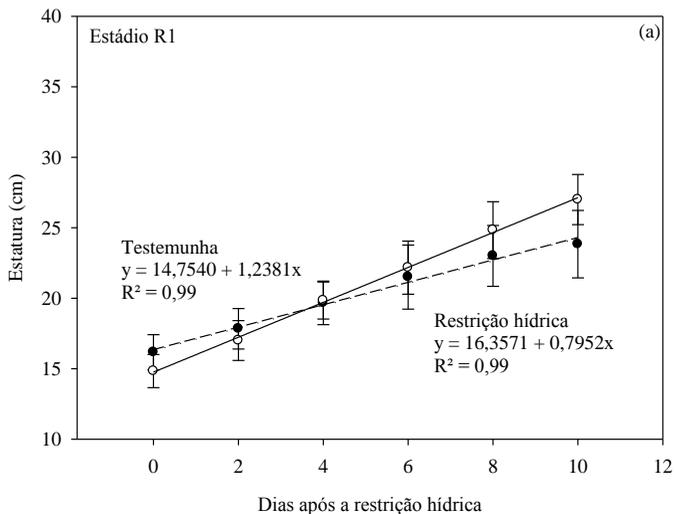
Fonte: produção do próprio autor

### 2.4.2 Estatura

As plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram redução na estatura da haste principal, principalmente no período de formação de vagens. De modo geral, a testemunha apresentou ganhos próximos de 1,2 cm por dia nos períodos de floração e formação das vagens (R1 a R4), enquanto as plantas

submetidas à restrição hídrica apresentaram redução na taxa de crescimento, sendo que no estágio R4 não houve ganhos em estatura quando comparado as plantas sem restrição hídrica (ver Figura 2). Em R6 e R7 não foi observado crescimento em estatura para ambos os tratamentos.

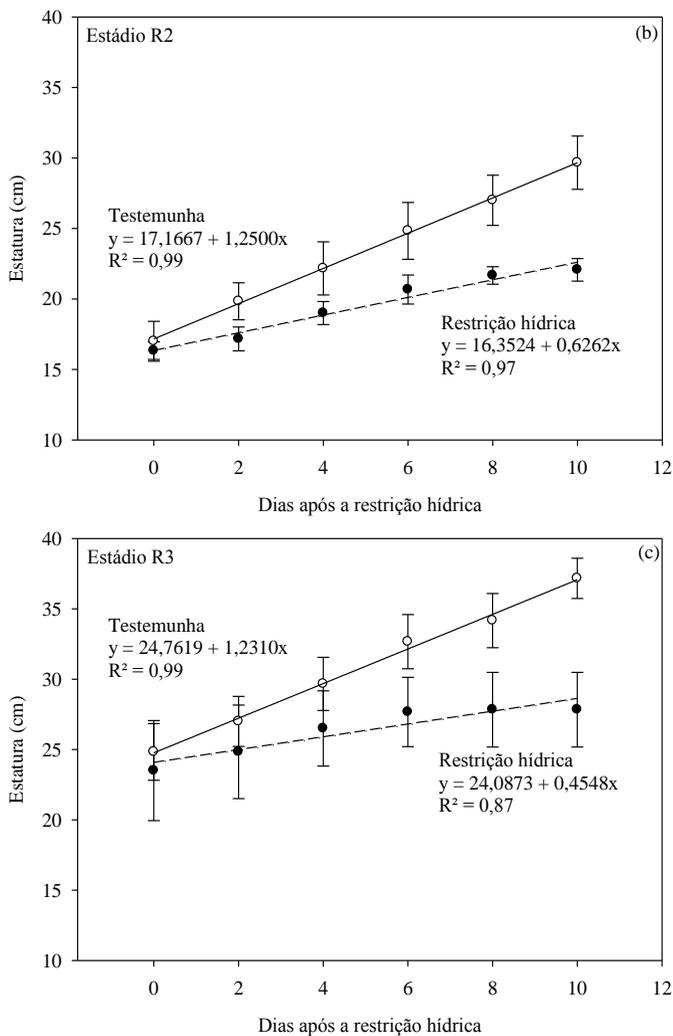
Figura 2- Estatura em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c) e R4 (d).



Continua

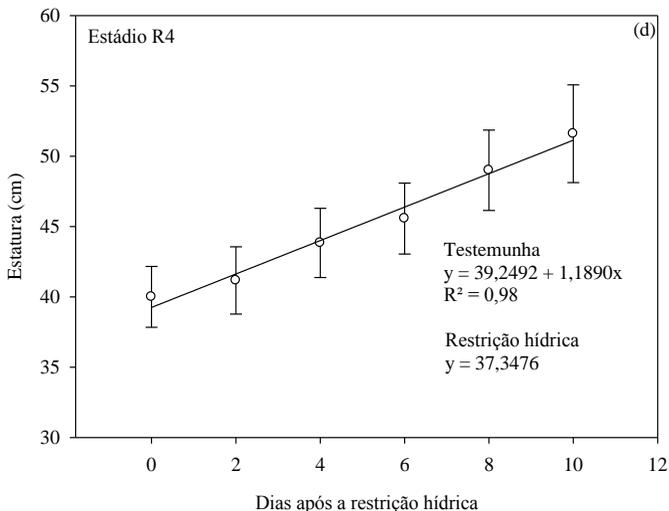
Continuação

Figura 2- Estatura em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c) e R4 (d).



## Conclusão

Figura 2- Estatura em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c) e R4 (d).



Fonte: produção do próprio autor

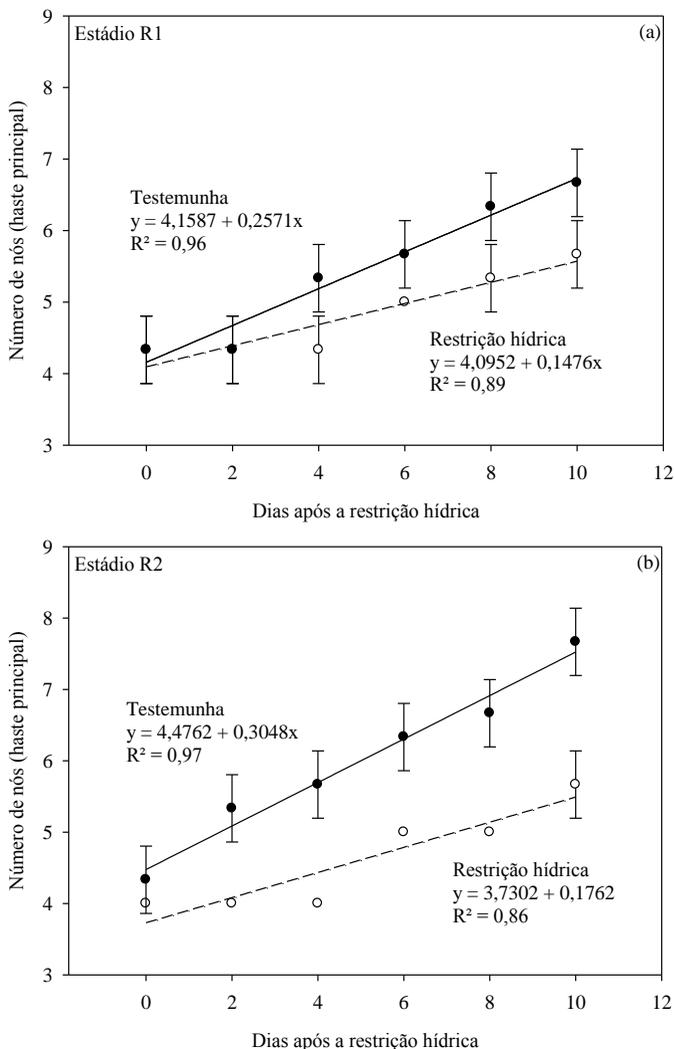
Linha contínua e símbolo preenchido representam a testemunha (—; ●) e linha tracejada e símbolo aberto à restrição hídrica (----; ○). Barras representam o desvio padrão das médias.

### 2.4.3 Número de nós e internódios

O número de nós na haste principal apresentou incremento até o estádio R5 para as plantas irrigadas e até o estádio R4 para as plantas em restrição hídrica. No entanto, houve redução no número total de nós e na taxa de emissão de nós entre as plantas sob restrição hídrica e testemunha. As plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram menor incremento no número de nós na haste principal entre os estádios R1 a R4, sendo a maior diferença encontrada no estádio R4, e no estádio R5 não houve a emissão de nós (ver Figura 3). O crescimento do internódio emitido antes da imposição dos tratamentos não foi alterado, com exceção do

estádio R4, que apresentou redução de 1,2 cm em relação à testemunha.

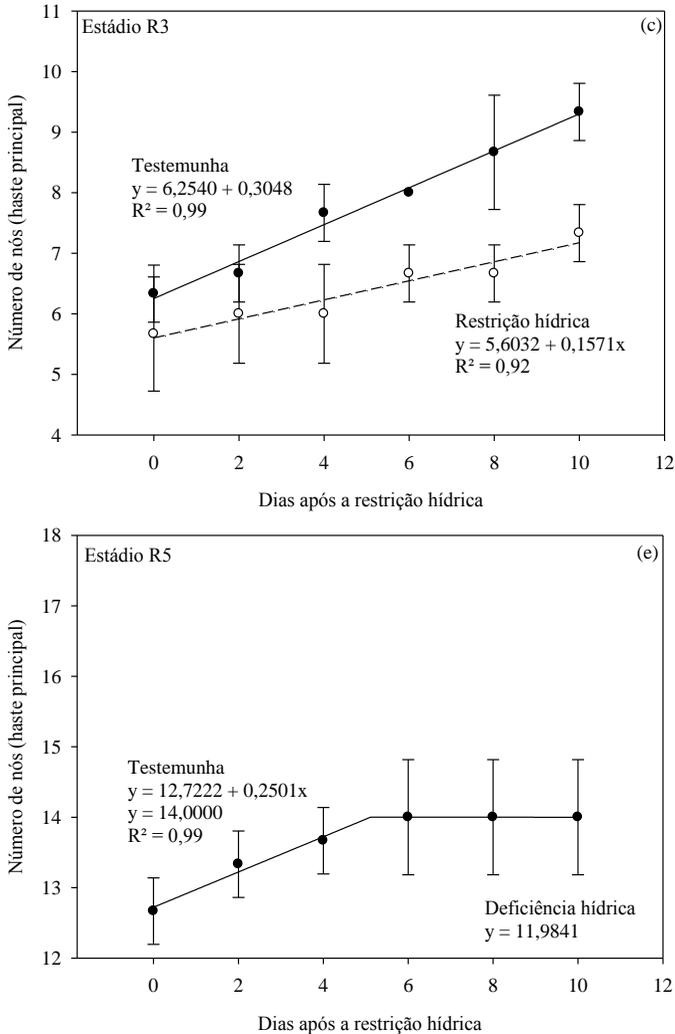
Figura 3- Número de nós na haste principal em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios fenológicos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e).



Continua

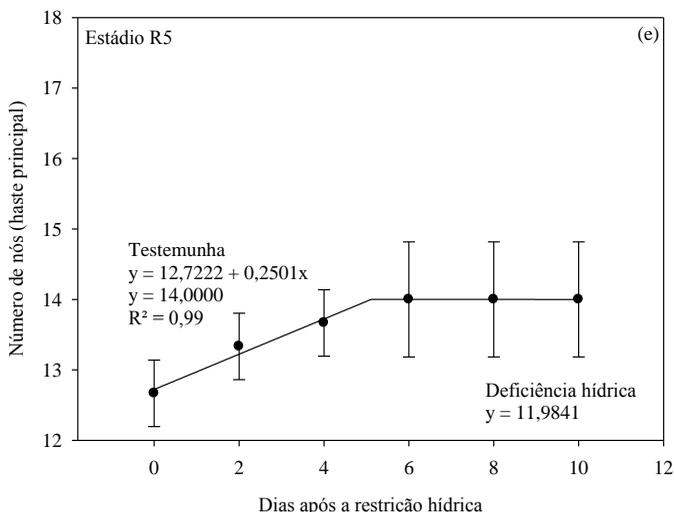
## Continuação

Figura 3- Número de nós na haste principal em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios fenológicos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e).



## Conclusão

Figura 3- Número de nós na haste principal em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios fenológicos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e).



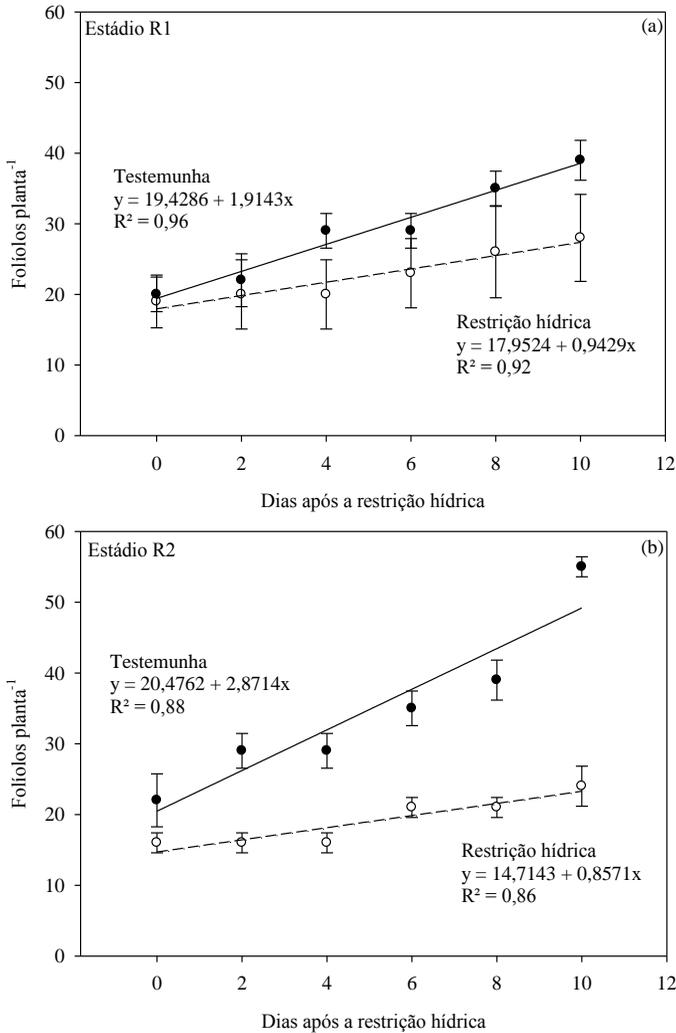
Fonte: produção do próprio autor

Linha contínua e símbolo preenchido representam a testemunha (—; ●) e linha tracejada e símbolo aberto à restrição hídrica (---; ○). Barras representam o desvio padrão das médias.

### 2.4.4 Área foliar

O incremento no número de folíolos por planta reduziu nas plantas submetidas à restrição hídrica, principalmente no período de formação de vagens. As plantas de soja mantidas a 80 % da capacidade de campo apresentaram maior incremento no número de folhas no estádio R4 ( $4,3$  folíolos planta<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>) e as plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram maior incremento no estádio R3 ( $1,3$  folíolos planta<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>). Nos estádios R6 e R7 não foi observado ajuste de regressão para folhas por plantas nos dois regimes hídricos (ver Figura 4).

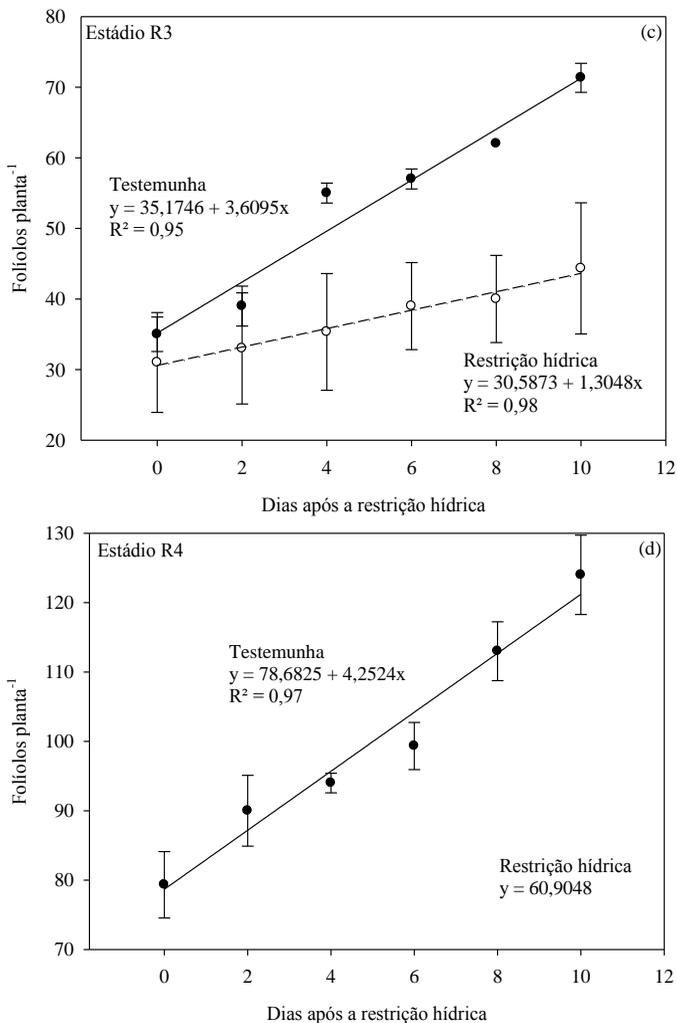
Figura 4- Número de folíolos por planta em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e).



Continua

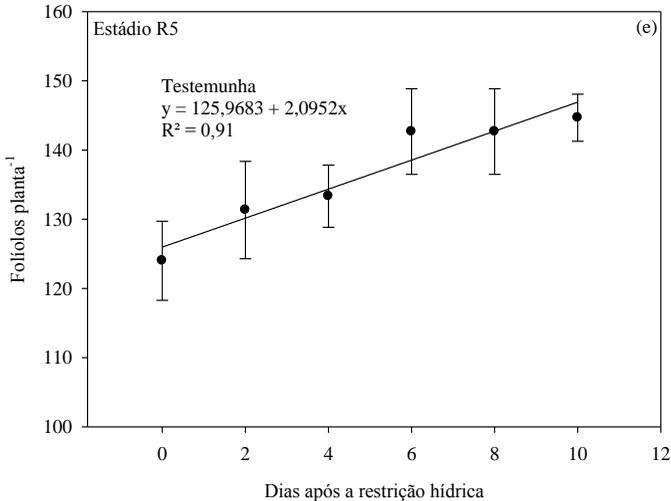
Continuação

Figura 4- Número de folíolos por planta em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e).



## Conclusão

Figura 4- Número de folíolos por planta em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e).

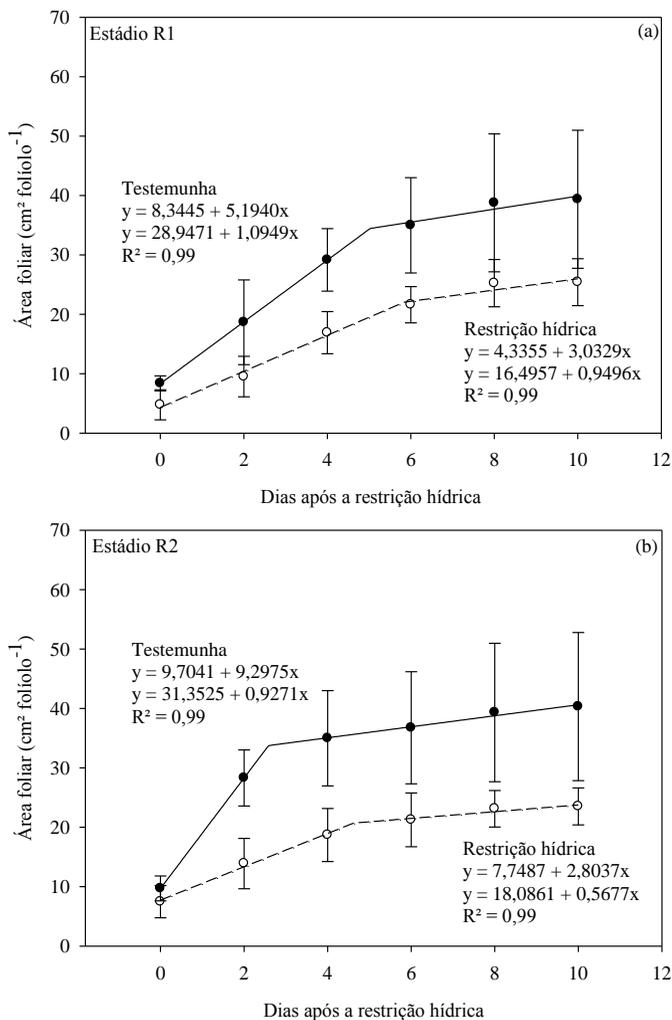


Fonte: produção do próprio autor

Linha contínua e símbolo preenchido representam a testemunha (—; ●) e linha tracejada e símbolo aberto à restrição hídrica (---; ○). Barras representam o desvio padrão das médias.

A área foliar do trifólio em expansão também apresentou menor incremento nas plantas submetidas à restrição hídrica do que na testemunha entre os estádios R1 a R5 (ver Figura 5). A expansão foliar apresentou comportamento linear bissegmentada para os estádios de desenvolvimento R1 a R5 nos dois regimes hídricos. As plantas mantidas hidratadas apresentaram comportamento superior às plantas sob restrição hídrica, principalmente, nos estádios R3 e R4 onde apresentaram uma taxa de expansão relativa de 35,5 % e 36,3 % em relação à testemunha, respectivamente.

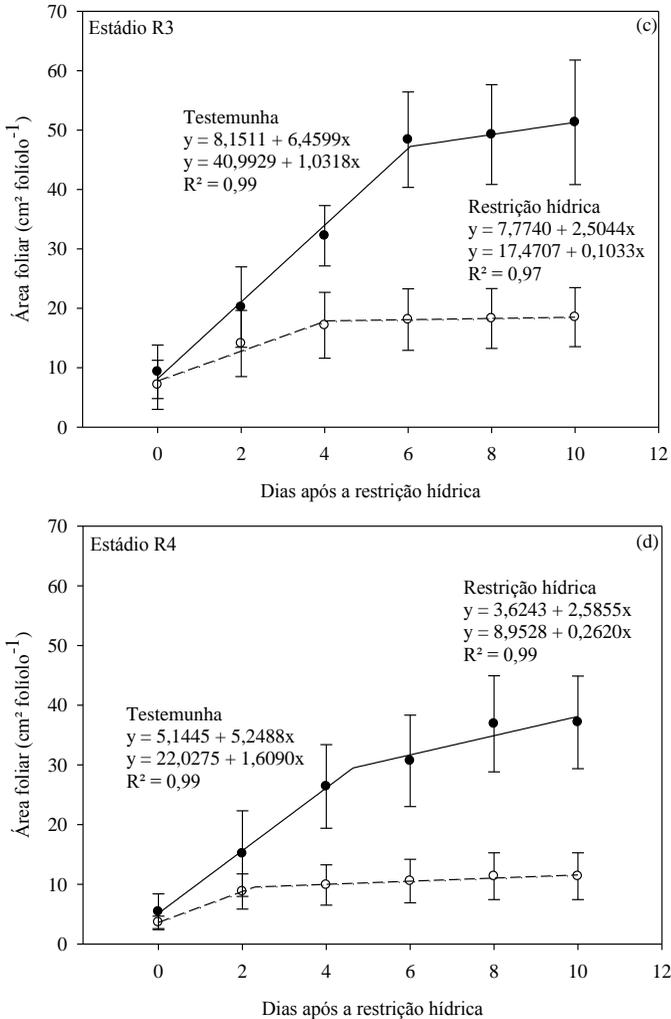
Figura 5- Área foliar do trifólio em expansão em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e).



Continua

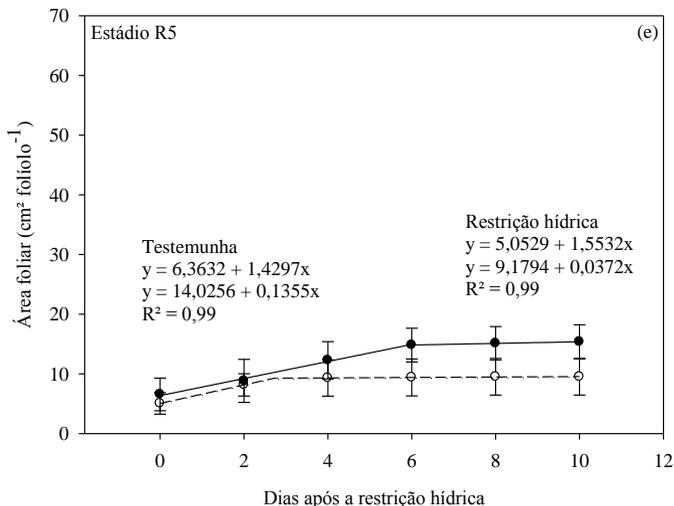
## Continuação

Figura 5- Área foliar do trifólio em expansão em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e).



## Conclusão

Figura 5- Área foliar do trifólio em expansão em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos R1 (a), R2 (b), R3 (c), R4 (d) e R5 (e).



Fonte: produção do próprio autor

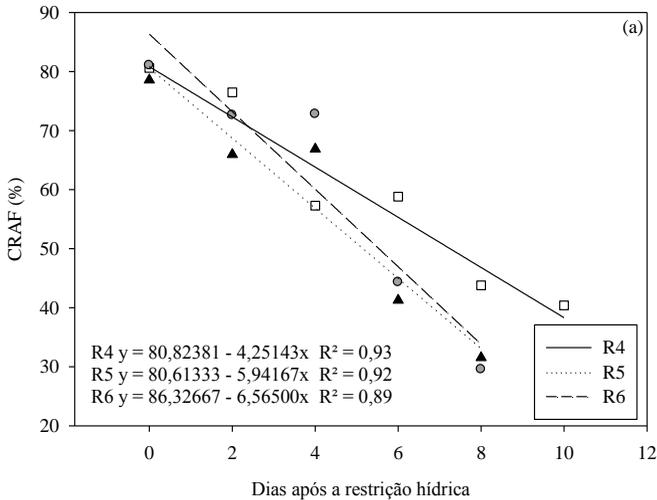
Linha contínua e símbolo preenchido representam a testemunha (—; ●) e linha tracejada e símbolo aberto à restrição hídrica (----; ○). Barras representam o desvio padrão das médias.

### 2.4.5 Conteúdo relativo de água na folha

O CRAF reduziu linearmente nos estádios avançados de desenvolvimento reprodutivo da soja impostas à restrição hídrica. O estágio R4 apresentou a menor redução no CRAF ( $4,2 \text{ \% dia}^{-1}$ ) seguido dos estádios R5 ( $5,9 \text{ \% dia}^{-1}$ ) e R6 ( $6,6 \text{ \% dia}^{-1}$ ) (ver Figura 6a). Aos 10 dias de restrição hídrica nos estádios R4, R5 e R6, foi observado um CRAF de 40,4 %, 31,5 % e 29,5 %. Embora, durante o período de restrição hídrica no estágio R3 não tenha sido observado comportamento linear significativo, houve redução aos 10 dias de 25,1 % no CRAF.

Redução do CRAF indica perda de turgor e resulta num limitado suprimento de água para expansão celular.

Figura 6- Conteúdo relativo de água na folha (CRAF) em plantas de soja submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos.



Fonte: produção do próprio autor

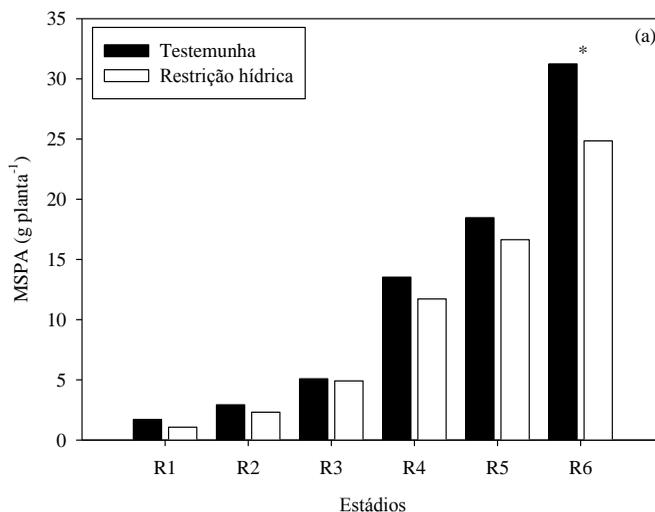
## 2.4.6 Biomassa

A matéria seca da parte aérea apresentou diferença apenas nas plantas submetidas à restrição hídrica em R6, com redução de 20 % em relação à testemunha (ver Figura 7a). As raízes apresentaram redução na matéria seca no período de enchimento de grãos (25 – 30 %) nas plantas submetidas à restrição hídrica em comparação à testemunha. O crescimento das raízes não foi afetado pela restrição hídrica no período entre os estádios R1 a R4 (ver Figura 7b).

A relação raiz/parte aérea apresentou interação significativa entre os estádios reprodutivos de desenvolvimento da soja e os regimes hídricos, porém, apenas no estádio R1 as plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram maior

relação raiz parte aérea do que as mantidas irrigadas, sendo que o valor foi superior a 1,0 (ver Figura 7c). De modo geral, as plantas sob restrição hídrica apresentaram maior relação raiz/parte aérea (0,68) comparada à relação raiz/parte aérea das plantas mantidas irrigadas (0,46).

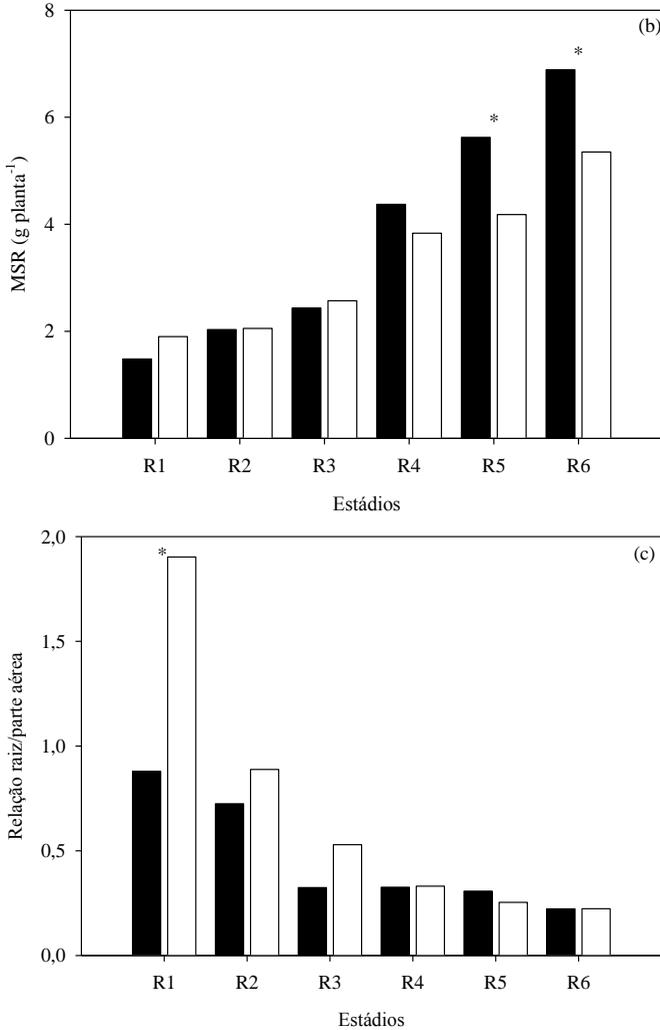
Figura 7- Matéria seca de parte aérea (a) e raiz (b) e relação raiz/parte aérea (c) em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica, aos 10 dias após o início da restrição hídrica, nos estádios fenológicos R1, R2, R3, R4, R5 e R6.



Continua

### Conclusão

Figura 7- Matéria seca de parte aérea (a) e raiz (b) e relação raiz/parte aérea (c) em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica, aos 10 dias após o início da restrição hídrica, nos estádios fenológicos R1, R2, R3, R4, R5 e R6.



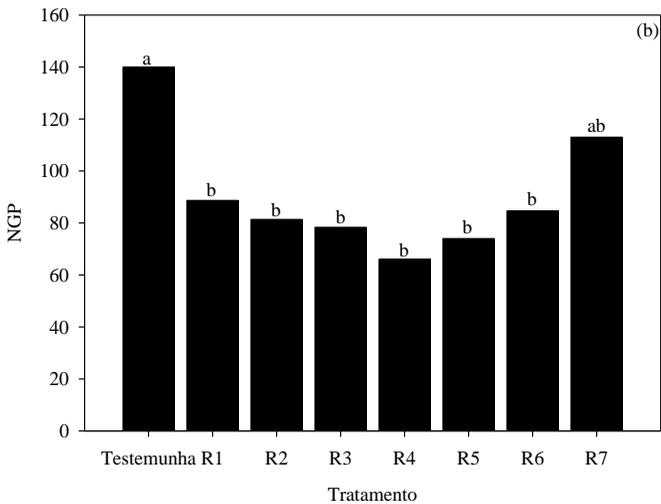
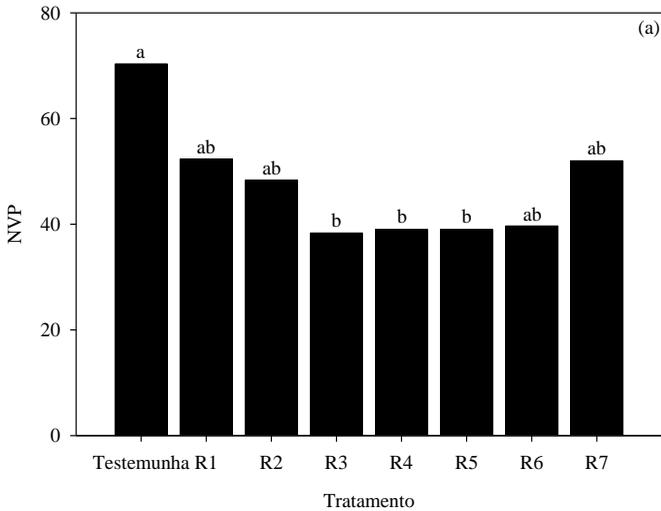
Fonte: produção do próprio autor

\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

### 2.4.7 Componentes do rendimento

O número de vagens por planta foi menor nas plantas submetidas à restrição hídrica nos estádios R3, R4 e R5 (ver Figura 8a). A redução em relação às plantas mantidas irrigadas foi de 45 % para cada estádio. Os estádios R1, R2, R6 e R7 submetidos à restrição hídrica não diferiram da testemunha. O número de grãos por planta reduziu entre os estádios R2 a R6 nas plantas submetidas à restrição hídrica (43,7%), sendo que o estádio R4 apresentou a maior redução (56,3%) (ver Figura 8b). Estes resultados mostram que o período de formação e crescimento das vagens é mais suscetível à baixa disponibilidade hídrica, para o número de grãos por planta, pois este é afetado, principalmente, pela redução do número de vagens por planta. Isto é observado pela correlação positiva entre estes componentes do rendimento ( $r = +0,78$ ) nas plantas sob restrição hídrica e por não ter sido encontrado diferença significativa com o número de grãos por vagem. O tamanho dos grãos variou conforme o estádio de imposição da restrição hídrica, porém no estádio R6 foi observada redução em relação ao estádio R4 e R5. (ver Figura 8c). O peso de grãos por planta reduziu nas plantas submetidas à restrição hídrica, com exceção do estádio R7. O estádio R6 foi o que apresentou a maior redução (63,9%), pois todos os outros componentes do rendimento também foram afetados nas plantas não irrigadas em R6, o que levou ao menor peso de grãos por planta (ver Figura 8d).

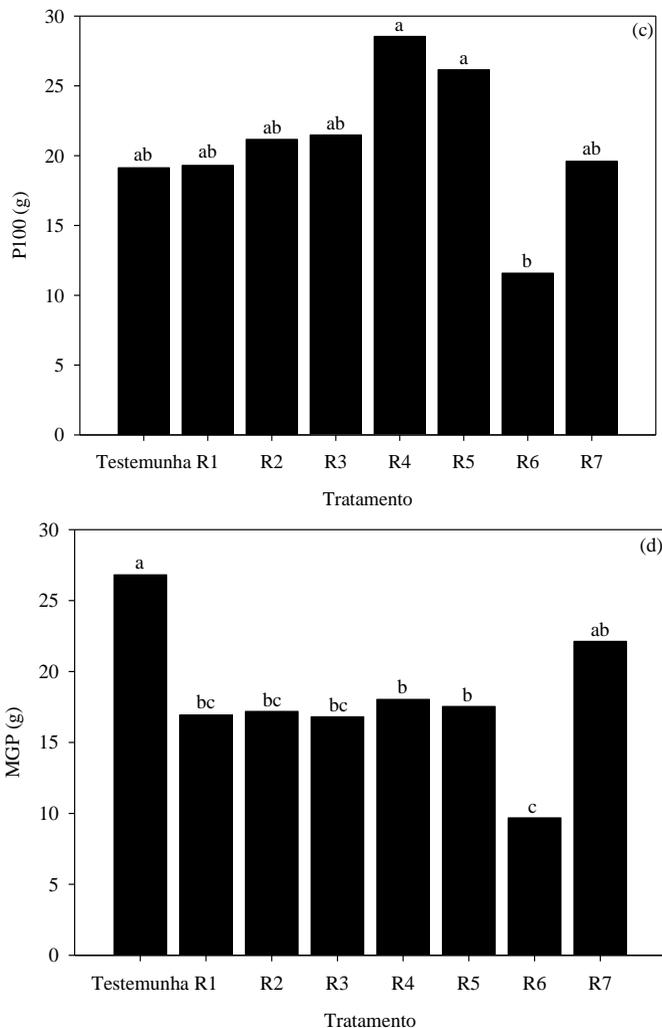
Figura 8- Número de vagens por planta (a), grãos por planta (b), peso de 100 grãos (c) e peso de grãos por planta (d) em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios fenológicos R1a R7.



Continua

## Conclusão

Figura 8- Número de vagens por planta (a), grãos por planta (b), peso de 100 grãos (c) e peso de grãos por planta (d) em plantas de soja irrigadas e submetidas à restrição hídrica nos estádios fenológicos R1a R7.



Fonte: produção do próprio autor  
Teste de Tukey a 5% de significância

## 2.5 DISCUSSÃO

O desenho experimental foi criado com o objetivo de criar situações em que as plantas foram forçadas a condições de restrição hídrica em cada estágio do desenvolvimento reprodutivo separadamente. Esta situação é artificial e não se destina a simular uma condição de seca a campo. No entanto, as respostas obtidas no presente trabalho permitem estabelecer modelos de crescimento e de partição válidas para condições de restrição hídrica controlada.

As taxas de crescimento na soja são afetadas pela restrição hídrica, principalmente durante a floração e formação de vagens. As plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram maior redução na estatura no período de formação de vagens. No estágio R3 a diferença na taxa de crescimento foi de  $0,78 \text{ cm dia}^{-1}$  enquanto no estágio R4 a diferença foi de  $1,19 \text{ cm dia}^{-1}$ . A restrição hídrica no período reprodutivo reduziu a estatura da soja pela redução do número de nós ( $r = +0,76$ ) e do comprimento de internódio ( $r = +0,86$ ). A redução na taxa de emergência dos nós na haste principal ocorreu entre os estágios R1 a R5. Restrição hídrica atrasa o aparecimento de novos nós e apenas mais tarde as estruturas reprodutivas começam a ser priorizadas, reduzindo a força de dreno (DESCLAUX; ROUMET, 1996).

A diferença entre a emissão de folíolos das plantas com e sem irrigação aumentou entre os estágios R1 ( $0,97 \text{ folíolos dia}^{-1}$ ) a R4 ( $4,25 \text{ folíolos dia}^{-1}$ ) e reduziu no estágio R5 ( $2,10 \text{ folíolos dia}^{-1}$ ). A expansão foliar reduziu no período entre a floração e o início de enchimento de grãos, sendo que o período de formação de vagens apresentou maior diferença com as plantas mantidas irrigadas. A regressão ajustada foi linear bissegmentada indicando dois períodos de expansão foliar. A expansão inicial das folhas apresentou maiores incrementos em relação ao período posterior. Nas plantas submetidas à restrição hídrica, o período (dias) de maior

expansão reduziu entre os estádios R1 ( $\approx 6$  dias) a R4 ( $\approx 2$  dias). Estes resultados sugerem maior efeito da restrição hídrica sobre a expansão foliar e número de folhas conforme o avanço dos estádios de desenvolvimento reprodutivo, sendo a fase de formação de vagens a mais suscetível.

A produtividade da soja depende do desenvolvimento da área foliar para interceptar a radiação solar, da eficiência de conversão da radiação em carboidratos e do índice de colheita, ou seja, da eficiência do uso da radiação e da remobilização dos fotoassimilados dos tecidos vegetativos para os grãos. A restrição hídrica pode reduzir a porcentagem de radiação interceptada, devido à redução da expansão foliar, do número de folhas e do aumento da senescência foliar e redução da eficiência do uso da radiação, através da menor taxa fotossintética (VEGA et al., 2001). Apesar da redução da área foliar ser um mecanismo de adaptação à seca, reduções na área fotossinteticamente ativa da planta podem diminuir o número de vagens e de grãos (ANDRIANI et al., 1991). Esta redução na área foliar caracteriza uma redução de fonte na partição dos assimilados para as estruturas reprodutivas. Esta hipótese é confirmada pela correlação existente entre a expansão foliar ( $r = +0,56$ ) e a taxa de emissão de folhas ( $r = +0,70$ ) com o peso dos grãos por planta na soja submetida à restrição hídrica.

A manutenção da área foliar, em plantas que apresentam baixa capacidade de remobilização de reservas para os grãos é importante, pois o acúmulo de massa passa a apresentar alta dependência da fotossíntese nas folhas (BLUM, 2009). Plantas usam diferentes mecanismos para superar a restrição hídrica incluindo a capacidade de retardar a murcha foliar (PATHAN et al., 2014). Portanto, a habilidade da planta em manter a área foliar, durante a diminuição da água disponível no solo, desempenha importante papel na manutenção do potencial produtivo da soja, após o reestabelecimento do suprimento de água.

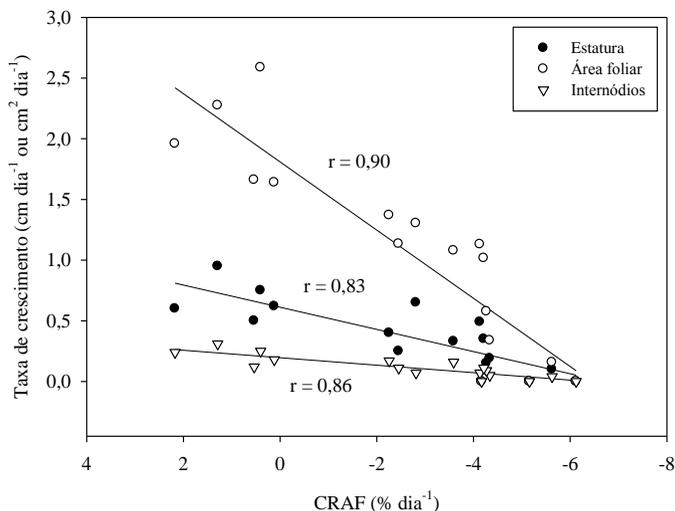
Quando à restrição hídrica atinge condições extremas, observa-se a morte progressiva de folhas, iniciando-se pelas mais velhas e seguindo para as mais novas, quando a planta não consegue manter seu status hídrico acima do CRAF<sub>c</sub> (conteúdo relativo de água na folha crítico) (LAWN; LIKOSWE, 2008). Segundo James et al. (2008), a sobrevivência de folhas e plantas foi maior em genótipos que apresentaram menores taxas de declínio no CRAF e baixos valores de CRAF<sub>c</sub>.

Nos estádios iniciais do desenvolvimento reprodutivo da soja não foi observado redução no CRAF, porém houve decréscimo nos parâmetros estatura, número de folhas e de nós por planta e expansão foliar. Tais resultados indicam que outro fator além do CRAF pode estar envolvido na redução das variáveis morfológicas. Segundo Liu et al. (2004a), o ácido abscísico pode ser este fator controlando o crescimento da planta antes da redução no status hídrico ocorrer. De acordo com os mesmos autores, a correlação negativa entre a concentração de ácido abscísico no xilema e o peso de parte aérea em plantas de soja submetidas à restrição hídrica, indica que a elevação na concentração de ácido abscísico no xilema pode atuar como sinal inicial no controle da expansão de plantas de soja em condições de restrição hídrica.

A taxa de conteúdo relativo de água na folha das plantas em condições de restrição hídrica apresentou correlação positiva com a taxa de crescimento da estatura ( $r = +0,83$ ) e do internódio mais apical ( $r = +0,86$ ) e com a taxa de expansão foliar ( $r = +0,90$ ). A redução da taxa de CRAF reduz o crescimento celular e, conseqüentemente a estatura e área foliar (ver Figura 9). Portanto, o CRAF pode ser utilizado como parâmetro de crescimento e de status hídrico nas plantas em condições de baixa disponibilidade hídrica. Além disso, foi encontrada correlação positiva entre as taxas de crescimento das variáveis morfológicas indicando que as mudanças

morfológicas da soja em condições de restrição hídrica se manifestam de maneira conjunta.

Figura 9- Relação entre taxas de crescimento e CRAF em plantas de soja submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivos.



Fonte: produção do próprio autor

No presente trabalho houve redução no peso total de parte aérea para as plantas submetidas à restrição hídrica no estágio R6. Porém, independentemente do período de ocorrência da restrição, observou-se redução na biomassa de parte aérea. A biomassa de raiz também apresentou redução, sendo que o período mais sensível à restrição hídrica foi os estádios R5 e R6. No entanto, independente do estágio de imposição da restrição hídrica foi observado aumento da relação raiz/parte aérea, principalmente no estágio R1. Este resultado indica a preferência para a partição dos assimilados em direção à raiz em relação à parte aérea, principalmente nos estádios iniciais (R1 a R3) onde se observou a tendência de incrementos na relação raiz/parte aérea. Quando a disponibilidade hídrica é limitada, a relação raiz/parte aérea das

plantas aumenta, pois as raízes são menos sensíveis do que o crescimento da parte aérea em baixos potenciais hídricos (WU; COSGROVE, 2000).

Após o período de restrição e retomada da irrigação, os períodos de floração e formação de vagens apresentaram redução no número de vagens e grãos por planta e conseqüentemente no peso final dos grãos por planta. O crescimento das vagens da soja requer a translocação dos assimilados das folhas para as vagens e qualquer efeito da restrição hídrica neste processo durante a sua formação pode reduzir o crescimento e a viabilidade das vagens. A restrição hídrica induziu a redução da taxa de expansão foliar e no número de folhas o que levou a redução da quantidade de biomassa translocada para as estruturas reprodutivas em formação. Como consequência disto, a taxa de exportação de assimilados das folhas de soja para a formação das vagens foi reduzida indicando uma limitação de fonte (LIU et al., 2004b). Além disso, o menor número de vagens e grãos por planta reduz a atividade de dreno (MARCELIS, 1996).

O máximo peso de grãos é definido nos estádios reprodutivos mais avançados da cultura e, portanto, a capacidade dos grãos de soja de modificar o peso final em resposta ao aumento da fonte é maior (BORRÁS et al., 2004). A consequência dessa capacidade estendida é a habilidade da soja de aumentar o peso dos grãos após o final da restrição hídrica na floração e início de formação de vagens, quando houve incrementos na disponibilidade de assimilados. Corroborando com esta hipótese, foi observado no trabalho maior tamanho dos grãos entre os estádios R1 a R5 em relação ao estádio R6 (ver Figura 8c). Desclaux et al. (2000), observaram incremento na massa do grão ( $\text{g grão}^{-1}$ ) em plantas que foram submetidas à restrição hídrica no período de floração e formação de vagens e redução no período de enchimento de grãos de 25 % e 55 % dependendo da intensidade da restrição. Segundo Brevedan e Egli (2003), a

restrição hídrica no estágio R6 resultou em grãos menores (9 a 17 %).

A incapacidade da soja submetida à restrição hídrica no estágio R6 de produzir e remobilizar os assimilados para os grãos, após o reinício da irrigação, foi determinante para a redução no peso final de grãos por planta. O curto período de enchimento de grãos na soja reduz a capacidade de crescimento dos grãos após o aumento da disponibilidade hídrica. Tal capacidade foi observada para esta cultivar no período de R1 a R5, onde incrementos no tamanho dos grãos recuperou em parte o peso final dos grãos. Brevedan e Egli (2003) sugerem que o curto tempo de restrição hídrica em R6, reduz o período de enchimento de grãos, e após o reinício da irrigação, as plantas apresentam inabilidade de remobilizar assimilados, por esgotamento da fonte. Também, Cure et al. (1985), indicam que ocorre falha na produção de fotoassimilados quando o período de enchimento de grãos foi curto. Submetida a condições de restrição hídrica, a proporção da produtividade originada da redistribuição de assimilados pode aumentar (BLUM et al., 2004). Um curto período de restrição hídrica durante o período de enchimento de grãos pode ter impacto acima de 23 % na redução da produtividade da soja ( $\text{g planta}^{-1}$ ) (BREVEDAN; EGLI, 2003).

## 2.6 CONCLUSÃO

Na fase reprodutiva da soja, as alterações nas taxas de crescimento de parâmetros morfológicos variam de acordo com o estágio de imposição da restrição hídrica. O período final de formação de vagens e o enchimento de grãos são mais suscetíveis à restrição hídrica imposta, pois não mantêm a turgescência foliar e as taxas de crescimento de estatura, área foliar e número de nós. A menor sensibilidade nos estágios iniciais do desenvolvimento reprodutivo está relacionada à

capacidade de manter o conteúdo relativo de água e aumento da relação raiz/parte aérea.

## REFERÊNCIAS

ANDRIANI, J. et al. Water deficits during reproductive growth of soybeans: I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. **Agronomie**, v. 11, n. 9, p. 737-746, 1991.

BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Research**, v. 112, n. 2-3, p. 119-123, 2009. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429009000860> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

BORRÁS, L.; SLAFER, G. A.; OTEGUI, M. A. E. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. **Field Crops Research**, v. 86, n. 2-3, p. 131-146, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429003001849> >. Acesso em: 13 fev. 2014.

BREVEDAN, R. E.; EGLI, D. B. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. **Crop Science**, v. 43, n. 6, p. 2083-2088, 2003. Disponível em: < <https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/43/6/2083> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

CAMPOS, H. et al. Improving drought tolerance in maize: a view from industry. **Field Crops Research**, v. 90, n. 1, p. 19-34, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429004001571> >. Acesso em: 18 abr. 2013.

CHAVES, M. M. et al. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, v. 89, n. 7, p. 907-916, 2002. Disponível em: <  
<http://aob.oxfordjournals.org/content/89/7/907.abstract> >.  
Acesso em: 18 abr. 2013.

CURE, J. D. et al. Dinitrogen fixation in soybean in response to leaf water stress and seed growth rate. **Crop Science**, v. 25, n. 1, p. 52-58, 1985. Disponível em: <  
<https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/25/1/52> >.  
Acesso em: 16 abr. 2013.

DESCLAUX, D.; HUYNH, T. T.; ROUMET, P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. **Crop Science**, v. 40, n. 3, p. 716-722, 2000. Disponível em: <  
<https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/40/3/716> >.  
Acesso em: 16 abr. 2013.

DESCLAUX, D.; ROUMET, P. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. **Field Crops Research**, v. 46, n. 1-3, p. 61-70, 1996. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378429095000860> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Special Report 80, Iowa Agricultural Experiment Station, Ames, IA, 11 p.

HUCK, M. G. et al. Soybean Adaptation to Water Stress at Selected Stages of Growth. **Plant Physiology**, v. 73, n. 2, p. 422-427, 1983. Disponível em: <  
<http://www.plantphysiol.org/content/73/2/422.abstract> >.  
Acesso em: 16 abr. 2013.

JAMES, A. T.; LAWN, R. J.; COOPER, M. Genotypic variation for drought stress response traits in soybean: II. Interrelations between epidermal conductance, osmotic potential, relative water content, and plant survival. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 59, n. 7, p. 670-678, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1071/AR07160> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

LAWN, R. J.; LIKOSWE, A. A. Genotypic differences in leaf area maintenance contribute to differences in recovery from water stress in soybean. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 59, n. 12, p. 1075-1085, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1071/AR08177> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

LIU, F.; ANDERSEN, M. N.; JENSEN, C. R. Root signal controls pod growth in drought-stressed soybean during the critical, abortion-sensitive phase of pod development. **Field Crops Research**, v. 85, n. 2-3, p. 159-166, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429003001643> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

LIU, F.; JENSEN, C. R.; ANDERSEN, M. N. Drought stress effect on carbohydrate concentration in soybean leaves and pods during early reproductive development: its implication in altering pod set. **Field Crops Research**, v. 86, n. 1, p. 1-13, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429003001655> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

MARCELIS, L. F. M. Sink strength as a determinant of dry matter partitioning in the whole plant. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. Special Issue, p. 1281-1291, 1996. Disponível em: < [http://jxb.oxfordjournals.org/content/47/Special\\_Issue/1281.abstract](http://jxb.oxfordjournals.org/content/47/Special_Issue/1281.abstract) >. Acesso em: 19 abr. 2014.

MÜLLER, T.; LENTZSCH, P.; MÜLLER, M. E. H. Carbohydrate dynamics in leaves of rapeseed (*Brassica napus*) under drought. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 198, n. 3, p. 207-217, 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00502.x> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

OYA, T. et al. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars: Evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Production Science**, v. 7, n. 2, p. 129-137, 2004.

PATHAN, S. M. et al. Two soybean plant introductions display slow leaf wilting and reduced yield loss under drought. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 2, n. 1, p. 1-6, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/jac.12053> >. Acesso em: 19 mar. 2014.

SINCIK, M. et al. Deficit Irrigation of Soya Bean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a Sub-humid Climate. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 194, n. 3, p. 200-205, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00307.x> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

VEGA, C. R. C. et al. Seed number as a function of growth: A comparative study in soybean, sunflower, and maize. **Crop Science**, v. 41, n. 3, p. 748-754, 2001. Disponível em: < <https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/41/3/748> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

WESTGATE, M. E.; PETERSON, C. M. Flower and pod development in water-deficient soybeans (*Glycine max* L. Merr.). **Journal of Experimental Botany**, v. 44, n. 1, p. 109-117, 1993. Disponível em: < <http://jxb.oxfordjournals.org/content/44/1/109.abstract> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

WU, Y.; COSGROVE, D. J. Adaptation of roots to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 350, p. 1543-1553, 2000. Disponível em: < <http://jxb.oxfordjournals.org/content/51/350/1543.abstract> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

### **3 MORFOLOGIA E PARTIÇÃO DE BIOMASSA EM CULTIVARES DE SOJA SUBMETIDAS À RESTRIÇÃO HÍDRICA NO PERÍODO REPRODUTIVO**

#### **3.1 RESUMO**

Os efeitos da restrição hídrica na morfologia e na partição de biomassa das plantas dependem da intensidade e duração do período de restrição hídrica e do momento em que ocorre no ciclo da cultura. O objetivo do trabalho foi investigar as respostas na morfologia e na partição dos assimilados em cultivares de soja submetida à restrição hídrica imposta nos estádios reprodutivos. O experimento foi realizado em casa de vegetação onde a cultivar BMX Magna e BMX Potência RR foram submetidas à restrição hídrica imposta por 10 dias (sem irrigação) separadamente, iniciando-se sempre em cada um dos estádios fenológicos de R1 a R7. Na testemunha, as plantas foram irrigadas diariamente até o final do experimento. As plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram redução nos parâmetros morfológicos, especialmente nos estádios iniciais reprodutivos. A cultivar Magna apresentou menor redução para área foliar, estatura, nós e área foliar específica. As plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram menor biomassa de parte aérea, biomassa reprodutiva e de raiz, porém houve incrementos na raiz/parte aérea, principalmente na floração. A biomassa reprodutiva/parte aérea na cultivar Magna reduziu nas plantas submetidas à restrição hídrica no período de formação de vagens, enquanto na cultivar Potência foi menor na formação de vagens e enchimento de grãos. Na cultivar Potência houve redução na biomassa reprodutiva/raiz no período final de formação de vagens e enchimento de grãos. A restrição de água no período final de formação de vagens e enchimento de grãos reduz a força de dreno, pois reduz o número de vagens e de grãos, e a fonte, devido à redução da

massa seca de parte aérea. A cultivar Magna apresenta maior redução de fonte enquanto a cultivar potência maior redução de dreno.

Palavras chave: *Glycine max*; estádios fenológicos, deficiência hídrica, área foliar específica, relação fonte/dreno.

### 3.2 INTRODUÇÃO

A manutenção da produtividade nas culturas submetidas a condições ambientais adversas é provavelmente o maior desafio da agricultura moderna. Mudanças ambientais previstas, como alterações no padrão das chuvas, torna necessário o desenvolvimento de cultivares tolerantes à restrição hídrica (SINGH et al., 2012). Para enfrentar esse desafio é necessário compreender as mudanças nas respostas morfológicas das plantas em condições de restrição e não restrição hídrica e, suas relações (LIZANA et al., 2006).

À restrição hídrica pode afetar o crescimento de diferentes partes da planta, os quais podem resultar em alterações morfológicas na planta. As mudanças na relação raiz/parte aérea têm sido consideradas como um mecanismo envolvendo a adaptação da planta a seca. Restrição hídrica afeta tanto o crescimento de parte aérea quanto de raiz. Porém, a parte aérea é mais suscetível a baixos potenciais hídricos o que leva a aumentos na relação raiz/parte aérea (WU; COSGROVE, 2000). A relação entre raiz/parte aérea reflete no balanço entre órgãos que perdem e absorvem água (LIU; STÜTZEL, 2004). Mudanças nessa relação sob restrição hídrica podem desempenhar um papel de controle do status hídrico da planta.

A redução da área foliar específica tem sido relatada como mecanismo de adaptação de plantas submetidas à restrição hídrica. Esta redução pode ser devido à sensibilidade

da fotossíntese e da expansão foliar as condições de seca (SANDRAS; MILROY, 1996). Deficiência hídrica afeta inicialmente a expansão foliar em relação à fotossíntese (BOYER, 1970). Alterações na área foliar específica têm sido associadas a aumentos na eficiência no uso da água (SONGSRI et al., 2009).

A produção na soja é determinada, em grande parte, pelo número de vagens e grãos que sobrevivem até a maturidade. A sobrevivência é descrita como função da taxa de crescimento durante a floração e formação de vagens. Entretanto, este período é dinâmico, de forma que a partição da biomassa vegetativa e reprodutiva determina o número de vagens e grãos na maturidade (EGLI; BRUENING, 2006a). Na soja o número de grãos por planta possui relação linear com a taxa de crescimento no período crítico, reflexo da alta plasticidade reprodutiva, o que permite ajustar o número de estruturas reprodutivas (drenos) com a disponibilidade de recursos (fontes) (VEGA et al., 2001a).

A restrição hídrica no período anterior a floração reduz a produção de biomassa vegetativa, porém não altera a partição de assimilados para a formação de vagens e enchimento de grãos. Entretanto, o número de vagens por unidade de massa seca reduz quando a restrição hídrica ocorre durante a o período de formação de vagens (DESCLAUX et al., 2000). De acordo com Frederick et al. (2001), o crescimento vegetativo dos ramos durante o período reprodutivo é essencial para a definição do número de vagens por planta. Redução no crescimento dos ramos diminui a taxa de crescimento da soja no período reprodutivo o que resulta em menor número de vagens e grãos (BOARD; TAN, 1995).

A morfologia e a partição dos assimilados são um importante componente da adaptação das plantas à restrição hídrica. Portanto, assume grande importância o conhecimento das interações da restrição hídrica com os estádios de desenvolvimento da cultura, visto que, em cada estágio de

desenvolvimento ocorrem eventos morfológicos responsáveis pela definição do potencial de produção.

O objetivo do trabalho foi determinar as alterações na morfologia e na partição da biomassa de plantas de soja submetidas à restrição hídrica nos estádios de desenvolvimento reprodutivo.

### 3.3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Centro de Ciências Agroveterinárias, na Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UEDESC) em Lages/SC. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com temperatura de  $25 \pm 5$  °C e umidade relativa de  $60 \% \pm 15 \%$ . O experimento foi em delineamento experimental inteiramente casualizado, com 6 repetições. A semeadura foi realizada em vaso de polietileno de 8 L (solo com teor de argila de 44 %, matéria orgânica de 2,6 % e pH = 6,5) com 5 sementes em cada vaso e após o estágio V1 foi realizado desbaste e mantendo-se apenas uma planta por vaso. As cultivares avaliadas foram a BMX Magna RR e BMX Potência RR.

#### 3.3.1 Experimento 1

**Amostras não destrutivas:** As cultivares foram submetidos à restrição hídrica imposta por 10 dias (sem irrigação) separadamente, iniciando-se sempre em cada um dos estádios fenológicos de R1 a R7. Foram determinadas as seguintes variáveis: estatura de planta, comprimento e largura do trifólio em expansão, o número de folíolos por planta, número de nós por planta. Após o período de restrição foi retomada a irrigação diária e mantidos em condições de não restrição até a colheita (estádio R8). No final do ciclo da cultura (estádio R8), foram avaliados os componentes da produção: número total de vagens por planta (NV), número de grãos por planta (NG), massa de

grãos por planta (MG) e massa de cem grãos (M100). Na testemunha, as plantas foram irrigadas diariamente até o final do experimento. Com base nos dados foram determinadas as taxas de crescimento da cultura, efeito relativo da restrição hídrica e área foliar. As taxas de crescimento relativo foram obtidas pela equação:  $TCR = (\ln Y_{t10} - \ln Y_{t0}) / 10$ ; onde  $\ln Y_{t10}$  é o logaritmo natural da variável aos 10 dias após o início da restrição hídrica e  $\ln Y_{t0}$  é o logaritmo natural da variável no início da restrição hídrica. O efeito relativo da restrição hídrica foi determinado pela equação: [(valor não irrigado – valor irrigado) / valor irrigado]. A área foliar foi obtida através da multiplicação do comprimento e largura da folha pelo coeficiente de 0,69, o qual foi previamente obtido com o auxílio do integrador de área foliar.

### 3.3.2 Experimento 2

**Amostras destrutivas:** Os genótipos foram submetidos aos tratamentos com e sem restrição hídrica por 10 dias separadamente em cada um dos estádios fenológicos de R1 a R7. Após o período de 10 dias as plantas foram coletadas e determinou-se a massa de parte aérea (P.A.) e raiz (R), biomassa reprodutiva (flor + vagem + grão) (REP), relação raiz/parte aérea (R/P.A.), relação biomassa reprodutiva/parte aérea (REP/P.A.), relação biomassa reprodutiva/raiz (REP/R), efeito relativo da restrição hídrica, área foliar específica (AFE) (área foliar/peso da folha) e conteúdo relativo de água na folha. O conteúdo relativo de água foi determinado em 3 folíolos de diferentes plantas. A segunda folha completamente expandida a partir do ápice da haste principal foi coletada às 8 horas da manhã e foi pesada (massa fresca). A massa túrgida foi obtida pela reidratação do tecido em água destilada por 24 horas, a temperatura ambiente e ausência de luz. Após a determinação da massa túrgida as amostras foram colocadas em estufa a 80°C por 48 horas e foi obtida a massa seca. O conteúdo

relativo de água foi calculado através da fórmula:  $CRAF = \frac{(MF - MS)}{(MT - MS)} \times 100 \%$ .

**Teor de umidade do solo:** As amostras de solo foram pesadas e determinou-se a massa úmida (MU), sendo transferida em seguida para a estufa a 105 °C por 48 horas onde determinou-se a massa seca (MS). O teor de umidade do solo foi obtido através da fórmula:  $US (\%) = \frac{(MU - MS)}{MS} \times 100$ . O teor de umidade do solo (US) foi medido no final do período de restrição hídrica. Nas plantas mantidas irrigadas em todo o período e nas plantas onde foi retomada a irrigação após o período de restrição foi padronizado o teor de umidade do solo em aproximadamente 48%. Nestas plantas o teor de umidade do solo era medido a cada 2 dias através da pesagem dos vasos. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando detectadas variações significativas, as médias foram contrastadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Procedeu-se também a análise de correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas.

### 3.4 RESULTADOS

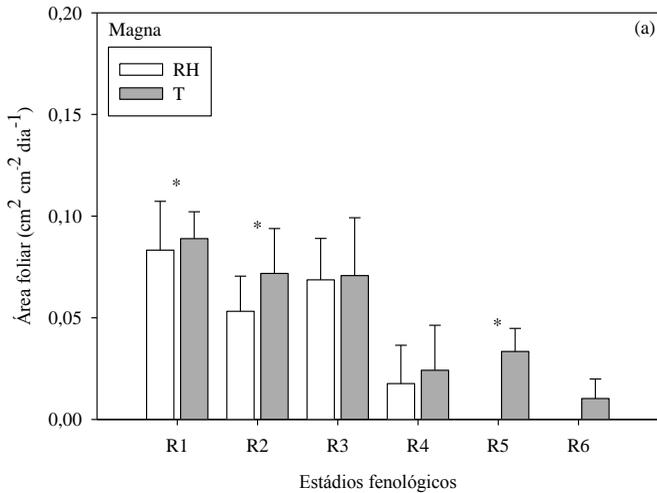
#### 3.4.1 Experimento 1

##### 3.4.1.1 Área foliar

As plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram redução na expansão da área foliar do trifólio em desenvolvimento, para as duas cultivares (ver Figura 10). A cultivar Magna apresentou menor redução na taxa de expansão relativa da área foliar nas plantas submetidas à restrição hídrica (26%) comparada ao cultivar Potência (53%). Porém a cultivar Potência teve maior taxa de expansão da área foliar nas plantas mantidas irrigadas quando comparado ao cultivar Magna. As plantas sob restrição hídrica no estágio R2 apresentaram maior diferença em relação à testemunha para a cultivar Magna

(26%) e o estágio R4 para a cultivar Potência (68%). Portanto, a cultivar Magna teve maior tolerância à restrição hídrica em relação à expansão da área foliar, comparado ao cultivar Potência.

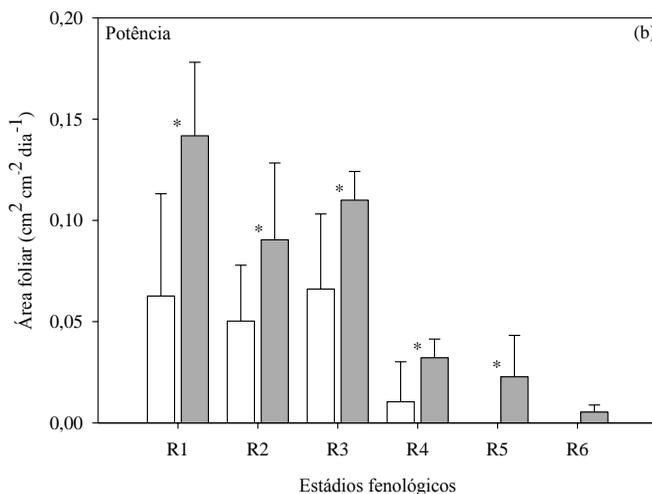
Figura 10- Taxa relativa de expansão foliar do trifólio em desenvolvimento de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios de desenvolvimento reprodutivo R1 a R6.



Continua

## Conclusão

Figura 10- Taxa relativa de expansão foliar do trifólio em desenvolvimento de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios de desenvolvimento reprodutivo R1 a R6.



Fonte: produção do próprio autor

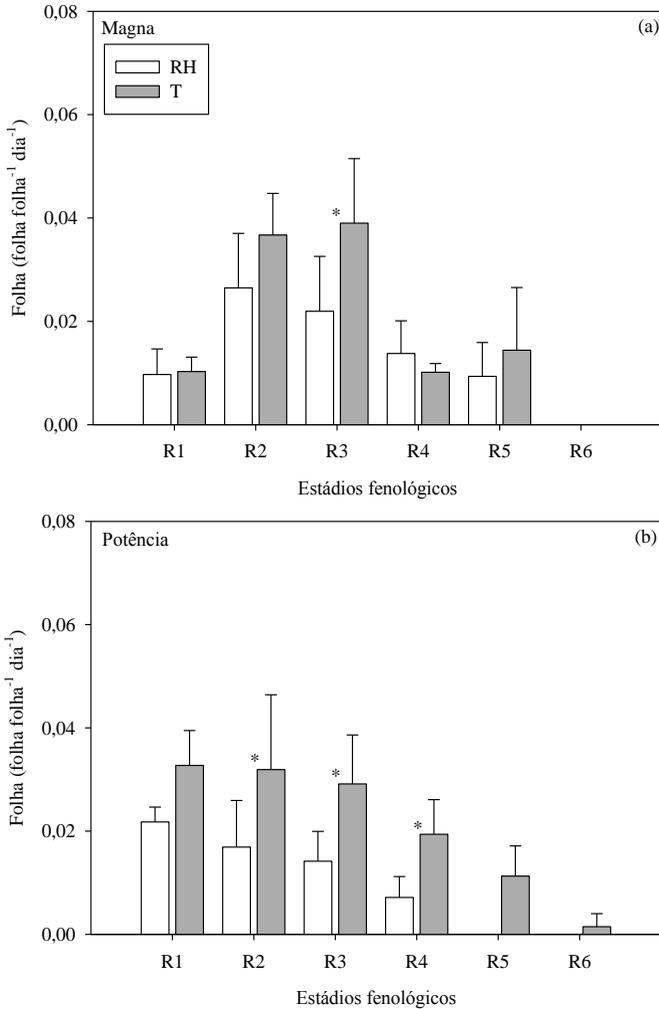
\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

Barras representam o desvio padrão das médias.

O número de folhas por planta reduziu nas plantas submetidas à restrição hídrica nas cultivares avaliadas (ver Figura 11). A cultivar Potência teve maior redução na taxa de emissão de folhas (52%), principalmente no estágio R3 (51%). A cultivar Magna apresentou redução apenas no estágio R3 (55%). De acordo com os dados, pode-se observar um padrão de crescimento e resposta diferenciada entre as cultivares, sendo que para a cultivar Magna as taxas de emissão de folhas aumentaram até o início da fase de formação de vagens, enquanto a cultivar Potência apresentou maior emissão na fase de floração, ou seja, com a imposição de restrição hídrica, na

cultivar Magna a emissão de novas folhas zerou apenas em R6, enquanto para cultivar Potência o valor zerou já no R5.

Figura 11- Taxa relativa de emissão de folhas de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R6.



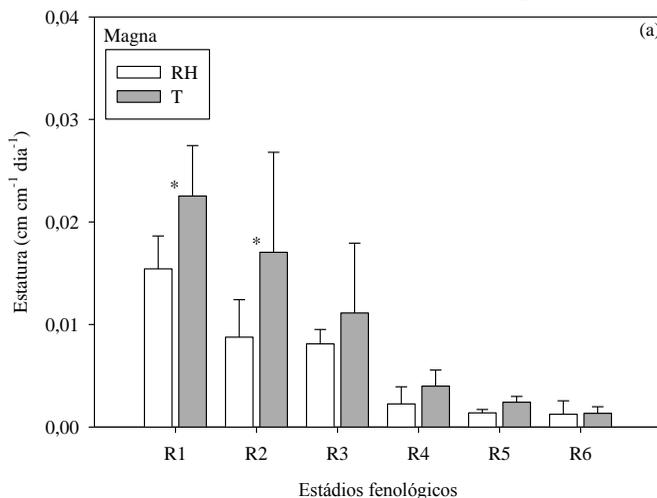
Fonte: produção do próprio autor

\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

### 3.4.1.2 Estatura de planta

A estatura apresentou menor taxa relativa de crescimento nas plantas submetidas à restrição hídrica (ver Figura 12). De modo geral, as plantas da cultivar Potência apresentaram maior redução da taxa relativa de crescimento ( $0,007 \text{ cm cm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ), comparado às plantas da cultivar Magna ( $0,004 \text{ cm cm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ), independente do estágio de desenvolvimento. Entretanto, ao se considerar cada estágio de desenvolvimento, sob influência da restrição hídrica, as plantas da cultivar Magna no estágio R2 apresentaram a maior redução na taxa de crescimento ( $0,008 \text{ cm cm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ), enquanto que para as plantas da cultivar Potência o estágio R1 apresentou a maior redução ( $0,018 \text{ cm cm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ). No estágio R6 foi observado crescimento apenas na cultivar Magna, tanto para as plantas irrigadas quanto as não irrigadas.

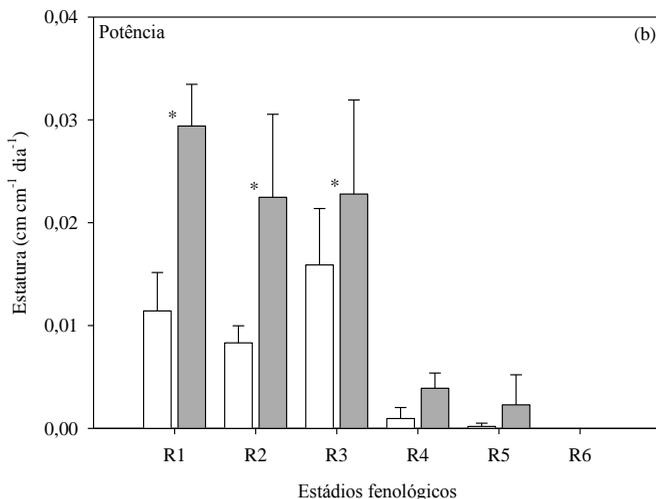
Figura 12- Taxa relativa de crescimento em estatura de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R6.



Continua

## Conclusão

Figura 12- Taxa relativa de crescimento em estatura de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R6.



Fonte: produção do próprio autor

\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

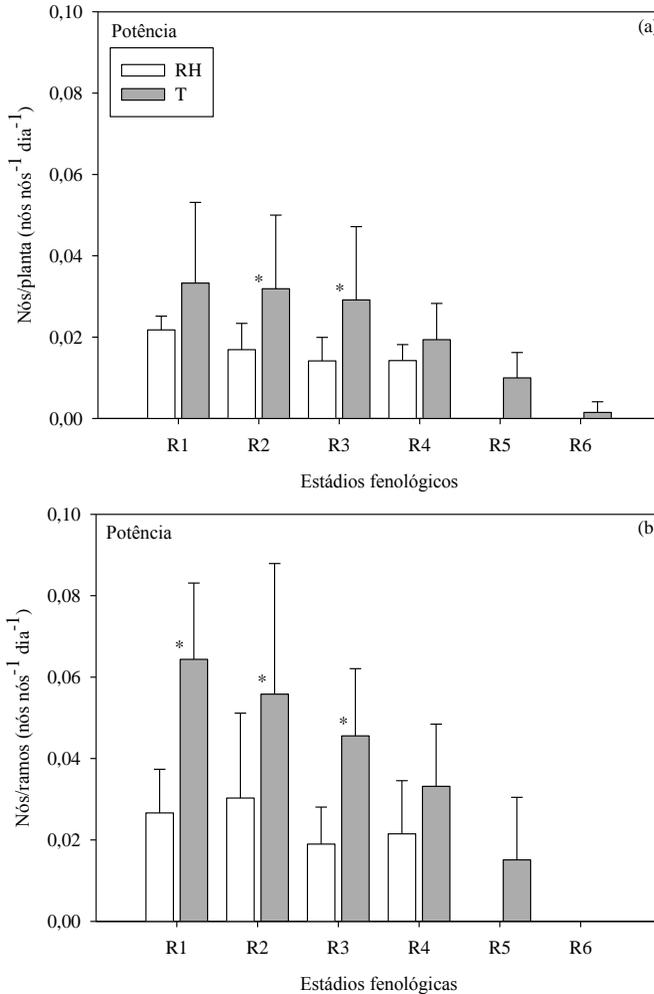
Barras representam o desvio padrão das médias.

### 3.4.1.3 Número de nós

A taxa de emissão de nós foi reduzida nas plantas submetidas à restrição hídrica, em ambas as cultivares (Magna e Potência) quando comparado a suas respectivas testemunhas (ver Figura 13a). Porém, a cultivar Magna não apresentou interação entre estágio e tratamento, não sendo, portanto, observado diferença entre a taxa de emissão de nós por planta entre as plantas submetidas à restrição hídrica e as mantidas irrigadas, em cada estágio fenológico. Na cultivar Potência houve interação entre estágio e tratamento, mas apenas nos estádios R2 e R3 as plantas mantidas irrigadas apresentaram

incrementos significativos no número de nós por planta comparada às em restrição hídrica ( $0,015$  nós nós<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>).

Figura 13- Taxa relativa de emissão de nós por planta (a) e nos ramos (b) da cultivar BMX Potência RR submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R6.



Fonte: produção do próprio autor

\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

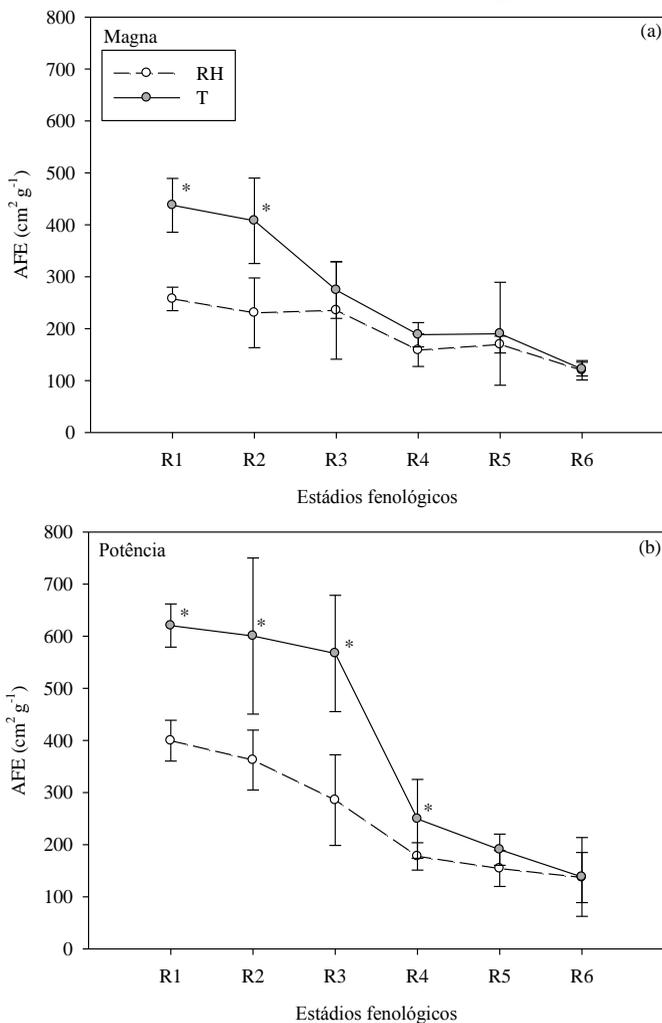
A redução na taxa de emissão de nós nas plantas submetidas à restrição hídrica na cultivar Potência ocorreu devido a menor taxa de emissão de nós nos ramos em relação à haste principal (ver Figura 13b). Esta redução na taxa de emissão de nós nos ramos foi observada nos estádios R1, R2 e R3. Tal característica indica que sob restrição hídrica as plantas suscetíveis mantêm a emissão de nós na haste principal e diminui nos ramos, sendo, portanto, o crescimento da haste principal priorizado pela planta em condições de baixa disponibilidade hídrica.

### **3.4.2 Experimento 2**

#### **3.4.2.1 Área foliar específica**

A área foliar específica reduziu no período de floração (R1 e R2) na cultivar Magna e no período de floração e formação de vagens (R1 até R4) para a cultivar Potência nas plantas submetidas à restrição hídrica (ver Figura 14). Porém, no geral a cultivar Potência apresentou maior área foliar específica tanto nas plantas irrigadas ( $385,4 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ) quanto nas submetidas à restrição hídrica ( $244,5 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ).

Figura 14- Área foliar específica de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R6.



Fonte: produção do próprio autor

\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

Barras representam o desvio padrão das médias.

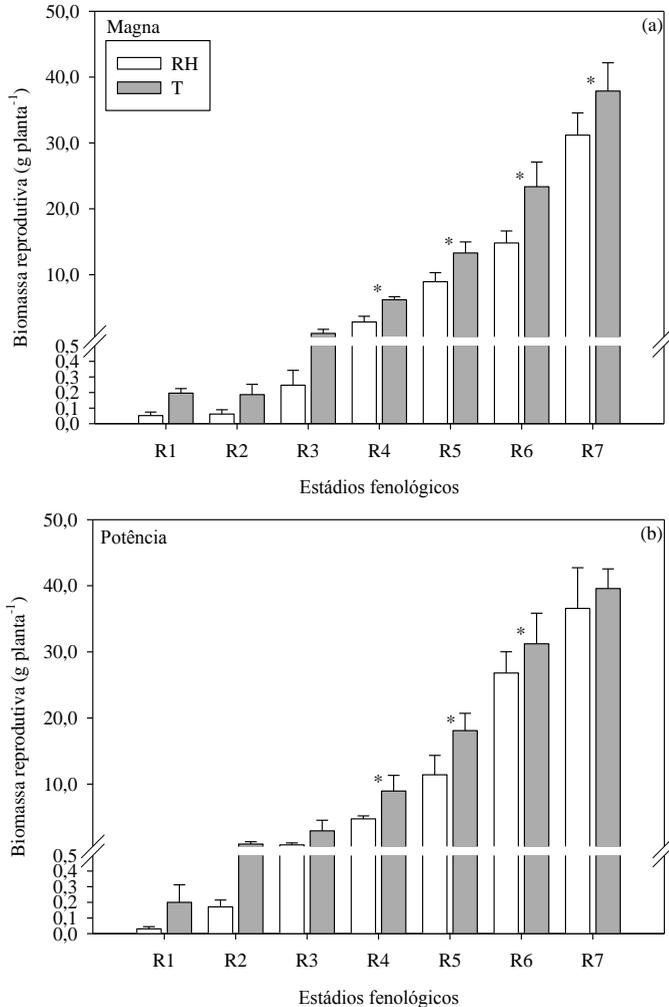
### 3.4.2.2 Biomassa

As plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram menor biomassa total de parte aérea. Mas as plantas da cultivar Magna apresentaram menor biomassa total de parte aérea (29,2 g planta<sup>-1</sup>), comparado às plantas da cultivar Potência (40,1 g planta<sup>-1</sup>), independente do estágio de desenvolvimento. A redução da biomassa de parte aérea foi maior na cultivar Magna (28%) em relação a cultivar Potência (17%). O período de floração e início de formação de vagens apresentaram maior redução na parte aérea para as duas cultivares, sendo que no estágio R1 se obteve a maior queda na biomassa total (49% para a cultivar Magna e 44% para a cultivar Potência).

A biomassa vegetativa também apresentou redução em ambas as cultivares. Na cultivar Magna, as plantas mantidas irrigadas apresentaram 28,7 g planta<sup>-1</sup>, enquanto as que foram mantidas sem irrigação por 10 dias, a biomassa vegetativa foi de 20,9 g planta<sup>-1</sup>. Já a cultivar Potência reduziu de 34,0 para 28,6 g planta<sup>-1</sup>. O período da floração apresentou maior redução para ambas as cultivares. As plantas com restrição hídrica no estágio R1 apresentaram biomassa vegetativa de 8,5 g planta<sup>-1</sup> na cultivar Magna e 10,0 g planta<sup>-1</sup> na cultivar Potência, enquanto as plantas mantidas irrigadas a biomassa foi de 16,7 e 17,9 g planta<sup>-1</sup> para as cultivares Magna e Potência, respectivamente.

A biomassa reprodutiva nas plantas submetidas à restrição hídrica foi menor nos estádios de desenvolvimento reprodutivos mais avançados (ver Figura 15). Na cultivar Magna a redução ocorreu nos estádios de R4 (54%) a R7 (18%), enquanto que na cultivar Potência de R4 (47%) a R6 (14%).

Figura 15- Biomassa reprodutiva (flor + vagem + grão) de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R7.



Fonte: produção do próprio autor

\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

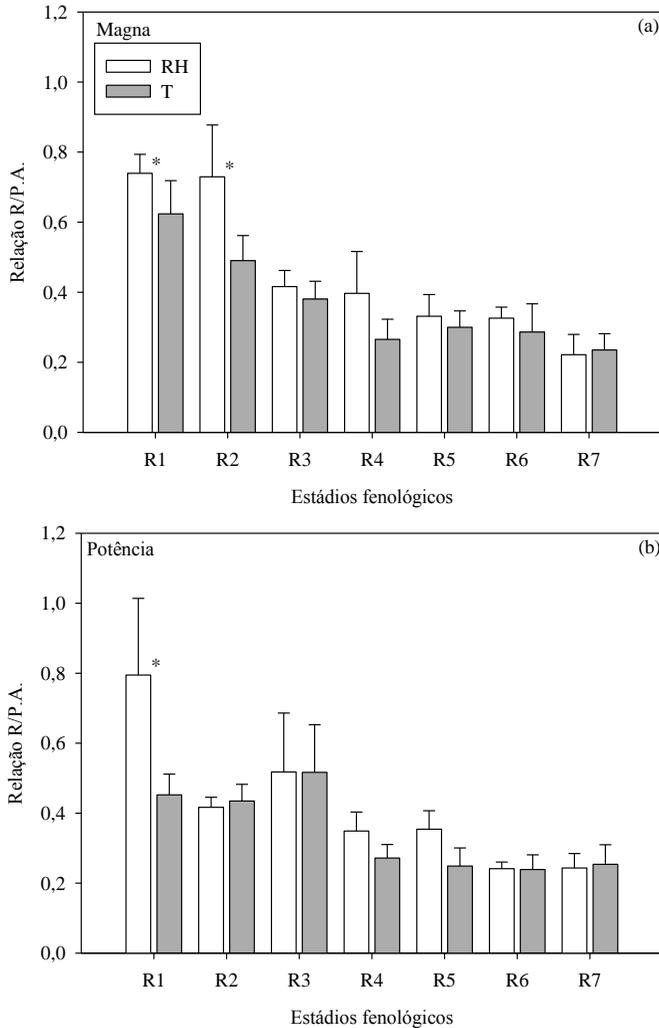
Barras representam o desvio padrão das médias.

A biomassa de raiz nas plantas submetidas à restrição hídrica nos cultivares Magna e Potência reduziu (19% e 10%, respectivamente) comparado às plantas mantidas irrigadas. Porém, na cultivar Potência não houve interação entre estágio e tratamento, não sendo, portanto, observado diferença entre a massa de raiz por planta entre as plantas submetidas à restrição hídrica e as mantidas irrigadas em cada estágio fenológico. Na cultivar Magna houve interação entre estágio e tratamento, mas apenas nos estádios R5 e R6 as plantas mantidas irrigadas apresentaram maior biomassa de raiz por planta comparada às em restrição hídrica.

#### **3.4.2.3 Relação raiz/parte aérea**

A relação raiz/parte aérea apresentou interação significativa entre os estádios reprodutivos de desenvolvimento da soja e os regimes hídricos, porém, apenas no estágio R1 e R2 na cultivar Magna e no estágio R1 para a cultivar Potência, as plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram maior relação raiz parte aérea do que as mantidas irrigadas (ver Figura 16). No geral, as plantas sob restrição hídrica apresentaram maior relação raiz/parte aérea, tanto para a cultivar Magna (0,47) quanto para a cultivar Potência (0,42), comparada à relação raiz/parte aérea das plantas mantidas irrigadas (0,37 e 0,35, respectivamente).

Figura 16- Relação raiz/parte aérea de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R7.



Fonte: produção do próprio autor

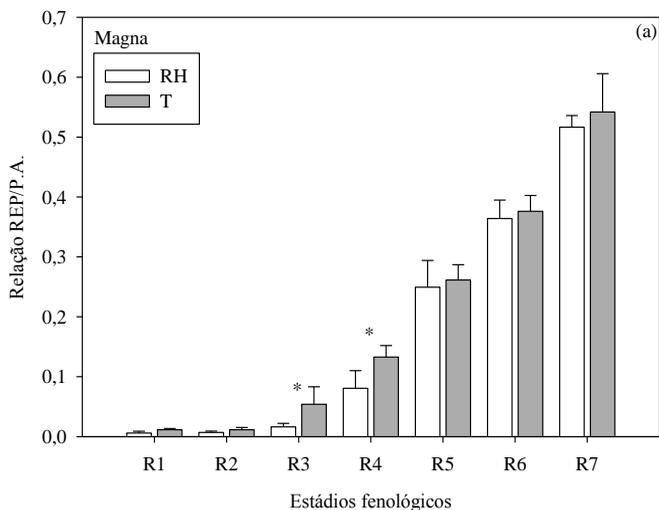
\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

Barras representam o desvio padrão das médias.

### 3.4.2.4 Relação biomassa reprodutiva/parte aérea

A cultivar Magna apresentou relação biomassa reprodutiva/parte aérea de 0,20 e 0,18 nas plantas com e sem irrigação, respectivamente, redução de 10%. A cultivar Potência teve relação de 0,22 nas plantas com irrigação e 0,18 nas plantas sem irrigação, redução de 18%. A relação biomassa reprodutiva/parte aérea na cultivar Magna foi menor nas plantas submetidas à restrição hídrica nos estádios R3 e R4, enquanto na cultivar Potência foi observado redução nos estádios R3, R4 e R6. No estágio R5 apenas se observou diferença entre os tratamentos quando considerado o nível de significância de 10% ( $p < 0,1$ ) (ver Figura 17).

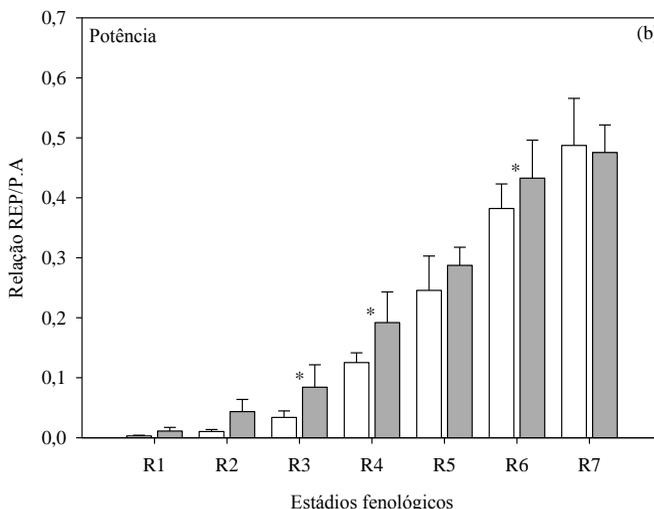
Figura 17- Relação biomassa reprodutiva/parte aérea de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R7.



Continua

## Conclusão

Figura 17- Relação biomassa reprodutiva/parte aérea de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R7.



Fonte: produção do próprio autor

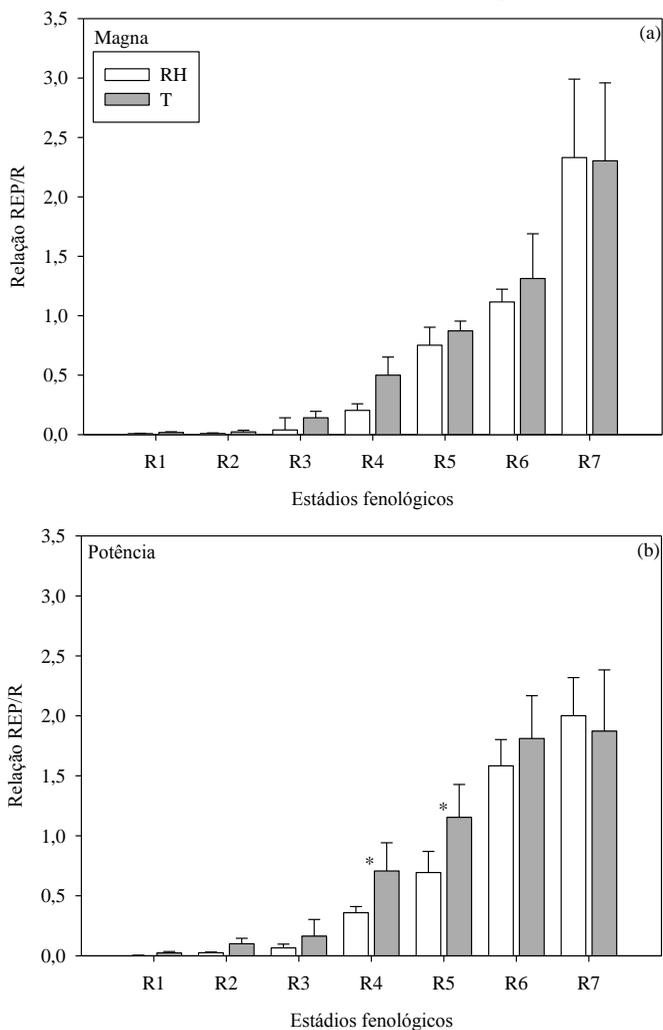
\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

Barras representam o desvio padrão das médias.

### 3.4.2.5 Relação biomassa reprodutiva/raiz

Não houve efeito da restrição hídrica na relação biomassa reprodutiva/raiz na cultivar Magna e nem interação com os estádios de desenvolvimento. Na cultivar Potência houve interação entre estágio e tratamento, mas apenas nos estádios R4 e R5 as plantas mantidas irrigadas apresentaram ganhos significativos na relação biomassa reprodutiva/raiz (ver Figura 18). No estágio R6 também se observou diferença entre os tratamentos, apenas quando considerado o nível de significância de 0,1 na cultivar Potência.

Figura 18- Relação biomassa reprodutiva/raiz de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) submetidas à restrição hídrica (RH) comparada à testemunha (T) nos estádios fenológicos R1 a R7.



Fonte: produção do próprio autor

\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

Barras representam o desvio padrão das médias.

### 3.5 DISCUSSÃO

O objetivo deste trabalho foi determinar o efeito da restrição hídrica na morfologia e na partição de biomassa em duas cultivares de soja durante a floração, formação de vagens, enchimento de grãos e maturação. Com esta intenção as plantas de soja foram conduzidas em vasos na casa de vegetação onde a imposição da restrição hídrica foi realizada em ambiente controlado. Os resultados observados neste experimento podem diferir dos conduzidos a campo, porém são válidos para avaliar a capacidade de tolerância à restrição hídrica das cultivares e as alterações na morfologia e partição de biomassa na soja.

As taxas de crescimento relativo das variáveis morfológicas nas plantas submetidas à restrição hídrica no período de floração e início da formação de vagens apresentaram maior redução em comparação às plantas sob restrição hídrica no período final de formação de vagens e no enchimento de grãos. O menor crescimento sob restrição hídrica foi observado nas plantas da cultivar Potência, principalmente nos estádios iniciais do desenvolvimento reprodutivo. Porém em condições de não restrição a cultivar Potência apresentou as maiores taxas de crescimento para todas as variáveis analisadas. A redução nas taxas de crescimento está associada com a diminuição no conteúdo relativo de água na folha. As plantas da cultivar Magna apresentaram redução de 82,6 para 48,3%, enquanto a cultivar Potência reduziu de 83,3 para 33,5%, independente do estágio de desenvolvimento (dados não mostrados).

Houve interação entre os estádios de desenvolvimento reprodutivo e a disponibilidade hídrica para a área foliar e número de folhas nas duas cultivares. Segundo Sincik et al. (2008), as plantas de soja submetidas à restrição hídrica no estágio R4 apresentaram redução da área foliar por planta e do índice de área foliar de aproximadamente 31% comparado com

a soja irrigada. No estágio R6, houve decréscimo em ambas as características em 34 a 35%.

A área foliar reduziu nas plantas submetidas à restrição hídrica pela combinação da redução da expansão foliar e da emissão de folhas, principalmente na cultivar Potência. No período da floração e formação de vagens a redução na expansão foliar e na emissão de folhas resultou em menor massa vegetativa, responsável em maior grau pela redução da biomassa total de parte aérea neste período. A redução na área foliar na planta está associada com o declínio da biomassa total, sugerindo que a menor área foliar afeta a produção de biomassa (ANYIA; HERZOG, 2004).

A emissão de nós foi reduzida pela restrição hídrica nos estádios iniciais do desenvolvimento reprodutivo na cultivar Potência. Tal redução deveu-se ao menor número de nós por ramos em relação aos nós na haste principal. Restrição hídrica no período de floração ao início do enchimento de grãos reduziu a produtividade na soja primeiramente pela redução do crescimento dos ramos o qual resulta num menor número de vagens e grãos por planta. Segundo Frederick et al. (2001), a haste principal sob condições de restrição hídrica torna-se a fração mais importante na definição da produtividade final de grãos. Geralmente, quanto mais longo o período e maior o número de nós emitidos na haste principal, maior é a força de dreno apical e posteriormente a estrutura reprodutiva é priorizada (JEUFFROY; WAREMBOURG, 1991). Portanto, a produção contínua de nós na haste principal em cultivares de hábito indeterminado, parece ser responsável pela sobrevivência das vagens em condições de restrição hídrica.

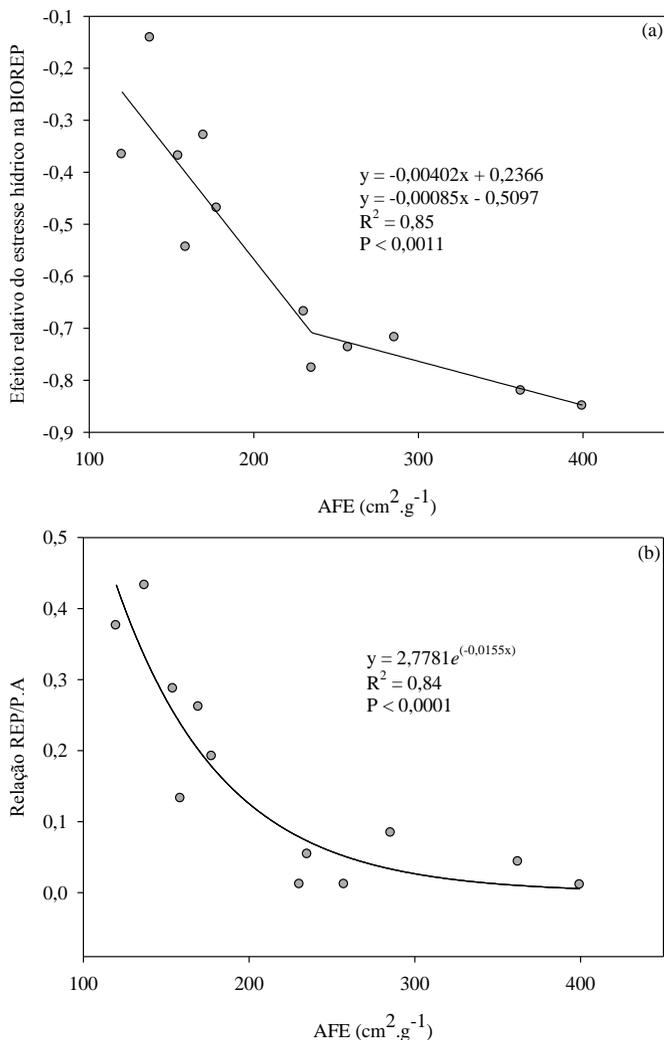
As plantas submetidas à restrição hídrica apresentaram redução na área foliar específica. A cultivar Potência apresentou maior redução, porém os valores foram maiores do que os da cultivar Magna. A redução da área foliar específica possibilita indicar a formação de folhas mais espessas, as quais auxiliam na conservação da água na folha, devido a menor

relação superfície/volume da folha. Restrição hídrica reduz a área superficial específica e pode aumentar a eficiência do uso da água (LIU; STÜTZEL, 2004). Isto é provavelmente parte do mecanismo adaptativo de reduzir a área foliar e a transpiração. A maior área foliar específica durante os estádios iniciais do desenvolvimento reprodutivo da soja mantida irrigada pode permitir maior taxa de crescimento, uma vez que há maior área foliar por unidade de massa seca. A redução da área foliar específica permite uma resposta mais favorável das plantas sob restrição hídrica nos estádios iniciais. A relação significativa entre área foliar específica (eficiência no uso da água) e o efeito da restrição hídrica sobre a biomassa reprodutiva ressalta a importância da redução da área foliar específica nas plantas submetidas à restrição hídrica (ver Figura 19a). Os menores valores de área foliar específica indicam maior eficiência no uso da água e menor efeito da restrição hídrica sobre a biomassa reprodutiva.

Ambas as cultivares reduziram a massa de parte aérea (vegetativa e reprodutiva) e de raiz, quando submetidas à restrição hídrica. A cultivar Magna apresentou maior redução do que a cultivar Potência para a massa de parte aérea, principalmente no período de floração, devido há incrementos na relação raiz/parte aérea. O aumento da relação raiz/parte aérea nas plantas submetidas à restrição hídrica observado no presente trabalho está de acordo com estudos prévios (WU; COSGROVE, 2000) e indica um balanço conservativo entre água perdida pela transpiração e absorção de água. Tais resultados sugerem mudança na partição de assimilados em condições de restrição hídrica, principalmente nos estádios iniciais do desenvolvimento reprodutivo. Este resultado está de acordo com o encontrado por Westgate e Boyer (1985), que sugeriram que o maior crescimento de raiz em relação à parte aérea deve-se a maior capacidade de alongação das raízes em condições de baixo potencial hídrico. A redução do crescimento de parte aérea durante a restrição hídrica pode ser

uma vantagem adaptativa, principalmente se o crescimento das raízes é promovido.

Figura 19- Relação entre área foliar específica e o efeito relativo da restrição hídrica na biomassa reprodutiva (a) e com a biomassa reprodutiva/parte aérea (b) submetidas à restrição hídrica.



Fonte: produção do próprio autor

A cultivar Potência tem maior redução na partição dos assimilados para o crescimento das estruturas reprodutivas quando submetida à restrição hídrica, indicando maior competição entre estruturas vegetativas e reprodutivas sob restrição hídrica em relação à testemunha, principalmente no final do período reprodutivo. A partição dos assimilados é o resultado do fluxo via transporte dos órgãos fonte para os órgãos dreno (habilidade competitiva de atrair assimilados), regulado primariamente pela força de dreno (MARCELIS, 1996). Ambas as cultivares são de hábito indeterminado, no entanto, a cultivar Potência apresenta maior área foliar específica. Este fato pode ser importante principalmente em condições de restrição hídrica. A relação significativa entre área foliar específica e a relação biomassa reprodutiva/parte aérea destaca a partição dos assimilados entre as estruturas reprodutivas e o total de massa seca produzida nas plantas submetidas à restrição hídrica (ver Figura 19b). Durante o mesmo período, submetidos à restrição hídrica, a cultivar Potência apresentou redução na relação biomassa reprodutiva/raiz, evidenciando que no período final de formação de vagens e enchimento de grãos a capacidade competitiva dos órgãos reprodutivos é menor do que as estruturas vegetativas (folhas + raiz) na cultivar BMX Potência em relação às plantas mantidas irrigadas. Já na cultivar Magna a redução é menor, portanto a competição entre as estruturas vegetativas e reprodutivas também é menor.

A plasticidade das plantas nos estádios iniciais do desenvolvimento reprodutivo está associada à capacidade de após o período de restrição a planta retomar o crescimento e a formação de novas flores e vagens. Esta plasticidade para estabelecer o potencial de dreno pode ser a mais importante característica de tolerância à restrição hídrica na soja. Segundo Borrás et al. (2004), a soja apresenta elevados incrementos no peso de grãos em resposta a disponibilidade de assimilados ao grão durante o período de enchimento de grãos. Portanto, a

disponibilidade de assimilados e de água no período de enchimento de grãos, permite a soja após o período de restrição hídrica na floração e início de formação de vagens, remobilizar os assimilados para os grãos.

O máximo peso de grãos é definido nos estádios reprodutivos mais avançados da cultura e, portanto, a capacidade dos grãos de soja de modificar o peso final em resposta ao aumento da fonte é maior (BORRÁS et al., 2004). A consequência dessa capacidade estendida é a habilidade da soja de aumentar o peso dos grãos após o final da restrição hídrica na floração e início de formação de vagens, quando houve incrementos na disponibilidade de assimilados no período de enchimento de grãos. Suportando esta hipótese, os valores do efeito relativo da restrição hídrica para biomassa total de parte aérea e biomassa reprodutiva comparada ao número de vagens, número de grãos e peso final dos grãos, mostra a capacidade da soja de após o período de restrição hídrica na floração, de produzir e remobilizar os assimilados para os grãos (ver Tabela 1).

Restrição hídrica no período de formação de vagens e início do enchimento de grãos apresentou as maiores reduções no número de vagens e de grãos por planta (dados não mostrados). A restrição de água neste período reduz a força de dreno, pois reduz o número de vagens e de grãos até R8 e a fonte, devido à redução da massa seca de parte aérea. No período de R4 a R6 a plasticidade reprodutiva é menor comparada aos estádios iniciais e capacidade da soja de modificar o peso final de grãos é menor. Estes resultados são consistentes com trabalhos prévios, os quais sugerem que o desenvolvimento tardio de vagens não é efetivo, pois não há assimilados disponíveis suficientes para sustentar o seu crescimento (EGLI; BRUENING, 2002).

Tabela 1- Efeito relativo da restrição hídrica de plantas das cultivares BMX Magna RR (a) e BMX Potência RR (b) nos estádios de desenvolvimento reprodutivo R1 a R7.

Estádio	BMX Magna RR					
	P.A.	REP	MG	NV	M100	NG
R1	-0,49	-0,74	-0,12	-0,03	-0,04	-0,01
R2	-0,44	-0,67	-0,32	-0,22	-0,08	-0,27
R3	-0,26	-0,78	-0,40	-0,38	0,05	-0,43
R4	-0,25	-0,54	-0,66	-0,43	-0,19	-0,60
R5	-0,30	-0,33	-0,45	-0,24	-0,17	-0,36
R6	-0,34	-0,37	-0,47	-0,16	-0,23	-0,32
R7	-0,14	-0,18	-0,14	-0,03	-0,06	-0,11

Estádio	BMX Potência RR					
	P.A.	REP	MG	NV	M100	NG
R1	-0,44	-0,85	-0,09	-0,08	-0,06	-0,04
R2	-0,25	-0,82	-0,13	-0,23	0,00	-0,14
R3	-0,30	-0,72	-0,22	-0,38	0,12	-0,31
R4	-0,19	-0,47	-0,73	-0,61	0,02	-0,86
R5	-0,26	-0,37	-0,63	-0,44	-0,24	-0,52
R6	-0,03	-0,14	-0,67	-0,22	-0,27	-0,55
R7	-0,10	-0,08	-0,18	-0,23	0,01	-0,19

Fonte: produção do próprio autor

A baixa disponibilidade de assimilados pode ser resultado do menor acúmulo de biomassa e da redução da fotossíntese devido à menor área foliar. Entretanto, a falha na formação e enchimento de grãos, nas vagens formadas posteriormente, pode ser devido a maior força de dreno imposta pelo rápido crescimento dos grãos (EGLI; BRUENING, 2006b). Portanto, a disponibilidade de assimilados (fonte) e o momento de crescimento da vagem (dreno) estão envolvidos na sobrevivência da vagem. De

acordo com Vega et al. (2001b), o número de grãos é função linear da taxa de crescimento no período reprodutivo e que a redução no número de grãos para baixas taxas de crescimento reprodutivo está associado com a redução e instabilidade da partição de biomassa para as estruturas reprodutivas. O crescimento das vagens de soja necessita da translocação da sacarose das folhas para as vagens e qualquer efeito da restrição hídrica, no dreno e/ou fonte, pode reduzir o crescimento e a viabilidade das vagens (LIU et al., 2004).

### 3.6 CONCLUSÃO

A plasticidade da soja de hábito de crescimento indeterminado nos estádios iniciais do desenvolvimento reprodutivo está relacionada à capacidade de após o período de restrição a planta retomar o crescimento e a formação de vagens, pela redução da área foliar específica, incrementos na relação raiz/parte aérea e pelo fato da soja ser responsiva a disponibilidade de água na formação de vagens e enchimento de grãos. A restrição de água no período final de formação de vagens e enchimento de grãos reduz a força de dreno, pois reduz o número de vagens e de grãos até R8 e a fonte, devido à redução da massa seca de parte aérea.

A soja de hábito de crescimento indeterminado apresenta tanto limitação de fonte quanto dreno na partição da biomassa para as estruturas reprodutivas, porém os resultados sugerem que a cultivar Magna apresenta maior limitação de fonte em relação à Potência, pois possui maior redução na biomassa de parte aérea em condições de restrição hídrica, enquanto a cultivar Potência tem maior limitação nos órgãos de dreno, devido a maior redução das plantas submetidas à restrição hídrica na relação biomassa reprodutiva/parte aérea e biomassa reprodutiva/raiz quando comparado as plantas mantidas irrigadas, associado ao maior efeito relativo da restrição hídrica sobre o número de vagens e grãos por planta.

## REFERÊNCIAS

- ANYIA, A. O.; HERZOG, H. Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought. **European Journal of Agronomy**, v. 20, n. 4, p. 327-339, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030103000388> >. Acesso em: 19 abr. 2013.
- BOARD, J. E.; TAN, Q. Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. **Crop Science**, v. 35, n. 3, p. 846-851, 1995. Disponível em: < <https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/35/3/846> >. Acesso em: 28 mai. 2013.
- BORRÁS, L.; SLAFER, G. A.; OTEGUI, M. A. E. Seed dry weight response to source–sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. **Field Crops Research**, v. 86, n. 2-3, p. 131-146, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429003001849> >. Acesso em: 13 fev. 2013.
- BOYER, J. S. Differing sensitivity of photosynthesis to low leaf water potentials in corn and soybean. **Plant Physiology**, v. 46, n. 2, p. 236-239, 1970. Disponível em: < <http://www.plantphysiol.org/content/46/2/236.abstract> >. Acesso em: 16 abr. 2013.
- DESCLAUX, D.; HUYNH, T.-T.; ROUMET, P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. **Crop Science**, v. 40, n. 3, p. 716-722, 2000. Disponível em: < <https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/40/3/716> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

EGLI, D. B.; BRUENING, W. P. Flowering and fruit set dynamics at phloem-isolated nodes in soybean. **Field Crops Research**, v. 79, n. 1, p. 9-19, 2002. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429002000163> >. Acesso em: 21 abr. 2014.

EGLI, D. B.; BRUENING, W. P. Fruit development and reproductive survival in soybean: Position and age effects. **Field Crops Research**, v. 98, n. 2-3, p. 195-202, 2006a. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037842900600027X> >. Acesso em: 8 fev. 2014.

EGLI, D. B.; BRUENING, W. P. Temporal profiles of pod production and pod set in soybean. **European Journal of Agronomy**, v. 24, n. 1, p. 11-18, 2006b. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030105000407> >. Acesso em: 8 fev. 2014.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Special Report 80, Iowa Agricultural Experiment Station, Ames, IA, 11 p.

FREDERICK, J. R.; CAMP, C. R.; BAUER, P. J. Drought-stress effects on branch and mainstem seed yield and yield components of determinate soybean. **Crop Science**, v. 41, n. 3, p. 759-763, 2001. Disponível em: < <https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/41/3/759> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

JEUFFROY, M.-H.; WAREMBOURG, F. R. Carbon transfer and partitioning between vegetative and reproductive organs in *Pisum sativum* L. **Plant Physiology**, v. 97, n. 1, p. 440-448, 1991. Disponível em: <  
<http://www.plantphysiol.org/content/97/1/440.abstract> >. Acesso em: 15 mai. 2013.

LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. **Scientia Horticulturae**, v. 102, n. 1, p. 15-27, 2004. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423804000202> >. Acesso em: 16 abr. 2013. Acesso em: 19 abr. 2013.

LIZANA, C. et al. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress: I. Effects of drought on yield and photosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 3, p. 685-97, 2006. Disponível em: <  
<http://jxb.oxfordjournals.org/content/57/3/685.full> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

MARCELIS, L. F. M. Sink strength as a determinant of dry matter partitioning in the whole plant. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. Special Issue, p. 1281-1291, 1996. Disponível em: <  
[http://jxb.oxfordjournals.org/content/47/Special\\_Issue/1281.abstract](http://jxb.oxfordjournals.org/content/47/Special_Issue/1281.abstract) >. Acesso em: 19 abr. 2014.

SADRAS, V. O.; MILROY, S. P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. **Field Crops Research**, v. 47, n. 2-3, p. 253-266, 1996. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378429096000147> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

SINCIK, M. et al. Deficit Irrigation of Soya Bean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a Sub-humid Climate. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 194, n. 3, p. 200-205, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00307.x> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

SINGH, S. K. et al. Influence of artificially restricted rooting depth on soybean yield and seed quality. **Agricultural Water Management**, v. 105, 2012. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000302331700006 >. Acesso em: 18 abr. 2014.

SONGSRI, P. et al. Association of root, specific leaf area and SPAD chlorophyll meter reading to water use efficiency of peanut under different available soil water. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 5, p. 790-798, 2009. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377408002825> >. Acesso em: 17 mai. 2013.

VEGA, C. R. C.; ANDRADE, F. H.; SADRAS, V. O. Reproductive partitioning and seed set efficiency in soybean, sunflower and maize. **Field Crops Research**, v. 72, n. 3, p. 163-175, 2001. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429001001721> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

VEGA, C. R. C. et al. Seed number as a function of growth: A comparative study in soybean, sunflower, and maize. **Crop Science**, v. 41, n. 3, p. 748-754, 2001/5 2001. Disponível em: < <https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/41/3/748> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

WESTGATE, M. E.; BOYER, J. S. Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem and silk growth at low water potentials in maize. **Planta**, v. 164, n. 4, p. 540-549, 1985. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/BF00395973> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

WU, Y.; COSGROVE, D. J. Adaptation of roots to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 350, p. 1543-1553, 2000. Disponível em: < <http://jxb.oxfordjournals.org/content/51/350/1543.abstract> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

## **4 CRESCIMENTO RADICULAR EM SOJA SUBMETIDA À RESTRIÇÃO HÍDRICA E APLICAÇÃO DE GESSO**

### **4.1 RESUMO**

A aplicação de gesso no solo pode levar a modificações químicas que promovam o crescimento radicular em condições de restrição hídrica. O objetivo do trabalho foi determinar o efeito do gesso no crescimento radicular de plantas de soja submetidas à restrição hídrica no período de enchimento de grãos. O trabalho foi realizado em casa de vegetação com a cultivar NA 5909 RR, em tubos de PVC de 120 cm de comprimento e 15 cm de diâmetro. As doses de gesso utilizadas foram de 0 Mg ha<sup>-1</sup> (sem gesso), 6 Mg ha<sup>-1</sup> aplicados em superfície e a dose de 6 Mg ha<sup>-1</sup> incorporada em todo perfil do solo. O suprimento diário de água às plantas foi realizado até o estágio R5, quando iniciou-se a imposição da restrição hídrica. No período de enchimento de grãos as plantas foram submetidas à restrição hídrica por 10 dias (sem irrigação), e avaliadas nos dias 0 e 10 após o início da restrição de água. Após o período de restrição foi realizada a colheita das plantas. No tratamento com irrigação as plantas foram irrigadas diariamente até o final do experimento (10 dias após o início do estágio R5) e a água no solo foi mantida na capacidade de retenção do vaso. O gesso proporcionou aumento nos teores de cálcio nos perfis de 40-60 a 100-120 cm e de enxofre entre os perfis 0-20 a 100-120 cm. O teor de magnésio reduziu no perfil 0-20 cm em função da aplicação de gesso. A aplicação de gesso promoveu o crescimento radicular (g planta<sup>-1</sup>) nas plantas submetidas à restrição hídrica principalmente nos perfis 80-100 e 100-120 cm. O crescimento radicular apresentou correlação negativa com os teores de alumínio no perfil superior (0-60 cm) e inferior (60-120 cm) e correlação positiva com os teores de cálcio no perfil inferior (60-120 cm). O método de

aplicação de gesso incorporado proporcionou maior crescimento radicular no perfil de 0-120 cm. A utilização do gesso nas plantas sob restrição hídrica aumentou a biomassa de parte aérea e o número de folhas e reduziu a relação raiz/parte aérea. Gesso também causou incrementos nas concentrações de cálcio e magnésio. Os resultados sugerem que o gesso é efetivo na redução da deficiência hídrica no estádio R5, em solos com baixa concentração de alumínio, pois promove o crescimento radicular em subsuperfície através do incremento nas concentrações de cálcio e redução no alumínio.

Palavras-chave: *Glycine max* L; deficiência hídrica; sulfato de cálcio; raiz

#### 4.2 INTRODUÇÃO

A absorção de água pode ser limitada pelo crescimento de raízes principalmente em camadas mais profundas do solo e, portanto, o crescimento radicular pode reduzir os efeitos da restrição hídrica nas plantas. Resultados mostram que plantas com maior crescimento de raízes em camadas profundas do solo, extraem mais água do solo, aumentam a transpiração, sendo as principais características para a manutenção da produtividade em condições de restrição hídrica (SERRAJ et al., 2004). Segundo Jongrunklang et al. (2012), existe correlação positiva entre o crescimento de raiz em camadas profundas do solo (60-90 cm) e o número de vagens por área, massa seca de parte aérea e índice de colheita de vagens em plantas de amendoim submetidas a restrição hídrica. Segundo os autores, este processo aumenta a proporção de raízes em camadas mais profundas do solo onde a disponibilidade de água é maior no período de restrição hídrica, permitindo à planta manter a taxa de transpiração.

De acordo com Songsri et al. (2009) a contribuição da biomassa de raiz para a maior eficiência no uso da água foi maior nas plantas submetidas à restrição hídrica moderada. Porém, em condições de restrição hídrica severa a biomassa de raiz apresentou menor contribuição para a eficiência no uso da água e neste caso a manutenção das taxas fotossintéticas pode ter maior importância no crescimento.

Sendo assim, torna-se fundamental a busca por práticas de manejo que possibilitem o maior crescimento e melhor distribuição do sistema radicular no perfil do solo, principalmente no período crítico da cultura. A aplicação de gesso no solo leva a modificações químicas no perfil que podem influenciar o crescimento de raízes das culturas anuais e aumentar a absorção de água e nutrientes pelas raízes das plantas.

Em cevada, Caires et al. (2001), observaram melhor distribuição relativa de raízes em profundidade quando foi aplicado gesso associado a calagem. Além disso, a aplicação de gesso melhorou a absorção de N, P, K, Ca e S pela cevada, em condições de restrição de água no período do florescimento, proporcionando acréscimos na produção de grãos. Destacou-se, ainda, o efeito positivo do fornecimento do enxofre pelo gesso sobre a produção de grãos de cevada. Caires et al. (2006), observou aumento dos níveis de cálcio, enxofre e magnésio no perfil de solo de 0 a 80 cm, com a aplicação de gesso. Em adição, o gesso promoveu maior acúmulo de fósforo, potássio e cálcio nos grãos de soja. Entretanto, a aplicação do gesso não causou efeito na produtividade. A ausência de resposta da soja a aplicação de gesso pode estar relacionada ao crescimento radicular, em condições de não restrição hídrica, não ser influenciado pela redução da saturação de alumínio no subsolo (CAIRES et al., 2001). Em milho, Caires et al. (2004), mostraram aumento da produção na ordem de 17%, pela aplicação de gesso. Porém, o aumento não foi ocasionado por alterações no crescimento do sistema radicular, mas esteve

relacionado com o aumento da saturação por cálcio nas camadas superficiais do solo.

No entanto, os efeitos do gesso no crescimento radicular de plantas em condições de restrição hídrica ainda não estão claros. A aplicação de gesso resulta em melhor desenvolvimento radicular e maior absorção de água e nutrientes pelas raízes das plantas em camadas mais profundas do solo. Isso pode ocorrer em decorrência do aumento da concentração de cálcio, da formação de espécies menos tóxicas de Al ( $\text{AlSO}_4^+$ ) e da precipitação de  $\text{Al}^{3+}$ , ou em casos de solos com concentração muito baixa de Al, mas com baixa concentração de Ca, o suprimento de Ca é o principal fator responsável pelo melhor desenvolvimento do sistema radicular (CAIRES et al., 2011). Estas características podem aumentar a biomassa de raiz no subsolo mantendo a absorção de água, as taxas de transpiração e de crescimento da planta, principalmente no período crítico para a formação dos componentes do rendimento.

O objetivo do trabalho foi determinar o efeito do gesso no crescimento radicular de plantas de soja submetidas à restrição hídrica no período de enchimento de grãos.

#### 4.3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Centro de Ciências Agroveterinárias, na Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UDESC) em Lages/SC. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com temperatura de  $25 \pm 5$  °C e umidade relativa de  $60 \pm 15\%$ . O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com 6 repetições. A cultivar utilizada foi NA 5909 RR de hábito de crescimento indeterminado e grau de maturação 5.9.

A semeadura foi realizada em tubos de PVC de 120 cm de comprimento e 15 cm de diâmetro com 4 sementes cada e após o estágio V1 foi realizado desbaste e mantida apenas uma

planta por vaso. A análise inicial do solo apresentou teor de argila de 75,5%, matéria orgânica de 4,6%, CTC do solo a pH 7,0 de 25,6  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  e pH em água de 4,1. Os teores iniciais dos nutrientes foram  $\text{Ca} = 0,55 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ,  $\text{Mg} = 0,22 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ,  $\text{P} = 3,1 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $\text{K} = 54 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $\text{H+Al} = 24,4 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$  e  $\text{Al} = 4,0 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ . Foi realizado a aplicação de calcário dolomítico (incorporado) para elevar o pH do solo para 5,5 (CQFS-RS/SC, 2004). A adubação de correção para P e K foi feita com 153,4 g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  diluídos em água e aplicado 0,5 litros/tubo. O N foi aplicado em cobertura com 28 g de ureia diluídos em água e aplicado 0,2 litros/tubo nos estádios V2 e R1.

As doses de gesso utilizadas foram de 0  $\text{Mg ha}^{-1}$  (sem gesso), 6  $\text{Mg ha}^{-1}$  aplicados em superfície e a dose de 6  $\text{Mg ha}^{-1}$  incorporada em todo perfil do solo. A aplicação do gesso ocorreu 15 dias antes da semeadura. O suprimento diário de água às plantas foi realizado até o estágio fenológico R5 (FEHR; CAVINESS, 1977), quando se iniciou a imposição da restrição hídrica. No período de enchimento de grãos as plantas foram submetidas à restrição hídrica por 10 dias (sem irrigação), e avaliadas nos dias 0 e 10 após o início da restrição de água. Após o período de restrição foi realizado a colheita das plantas. No tratamento com irrigação as plantas foram irrigadas diariamente até o final do experimento (10 dias após o início do estágio R5) e a água no solo foi mantida na capacidade de retenção do vaso. O teor de umidade do solo (US) foi medido no final do período de restrição hídrica. As amostras de solo foram pesadas e determinou-se a massa úmida (MU), sendo transferida em seguida para a estufa a 105 °C por 48 horas onde determinou-se a massa seca (MS). O teor de umidade do solo foi obtido através da fórmula:  $\text{US} (\%) = [(MU - MS)/MS] \times 100$ .

Foram coletadas plantas no décimo dia após o início da restrição para determinação do conteúdo relativo de água na folha (CRAF). O conteúdo relativo de água foi determinado em

3 folíolos de diferentes plantas. A segunda folha completamente expandida a partir do ápice da haste principal foi coletada às 8 horas da manhã e foi pesada (massa fresca). A massa túrgida foi obtida pela reidratação do tecido em água destilada por 24 horas, a temperatura ambiente e ausência de luz. Após a determinação da massa túrgida as amostras foram colocadas em estufa a 80°C por 48 horas e foi obtida a massa seca. O conteúdo relativo de água foi calculado através da fórmula:  $CRAF = (MF - MS) / (MT - MS) \times 100 \%$ . Após a restrição hídrica também foi determinado: o número de folhas por planta, o peso da matéria seca de raízes a cada 20 cm do perfil de solo e também foi avaliada a biomassa total da parte aérea. As amostras de raiz e parte aérea foram colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C, até atingirem massa constante. Com base nos dados coletados foi determinada a relação entre massa de raiz e parte aérea. Também foi realizada análise química do solo (Ca, Mg, Al e S), e de parte aérea (N, Ca, Mg e S), segundo Tedesco et al. (1995).

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando detectadas variações significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Também foi realizada a comparação de médias pelo contraste entre os tratamentos com e sem gesso e entre os métodos de aplicação. Procedeu-se também a análise de correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas.

## 4.4 RESULTADOS

### 4.4.1 Concentrações de cálcio, magnésio, enxofre e alumínio no solo

A aplicação de gesso apresentou efeito sobre as concentrações de cálcio, magnésio, enxofre e alumínio disponíveis no perfil do solo no período de enchimento de

grãos. No perfil do solo de 40-60 cm houve efeito da aplicação de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  na concentração cálcio trocável ( $9,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em relação a não aplicação de gesso ( $5,31 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), porém não houve efeito do método de aplicação (ver Tabela 2). Para o perfil de 60-80 cm também houve efeito da aplicação do gesso na concentração de cálcio ( $9,97 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em comparação a não aplicação ( $5,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). No perfil 80-100 cm houve incrementos na concentração de cálcio quando foi aplicado  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso ( $4,58 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), no entanto, a forma de aplicação não diferiu. Já na profundidade de 100-120 cm foi observado diferença na concentração de cálcio com a aplicação de gesso ( $11,04 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em relação a não aplicação ( $4,64 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e no método de aplicação. A aplicação em superfície apresentou menor concentração de cálcio ( $7,58 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em relação a aplicação incorporada ( $14,49 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). A concentração de enxofre apresentou interação com o uso do gesso em todos os perfis do solo. Observou-se ganhos na concentração de enxofre com a aplicação de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso no perfil de 0-20 ( $0,43 \text{ mg dm}^{-3}$ ), 20-40 ( $0,41 \text{ mg dm}^{-3}$ ), 40-60 ( $0,80 \text{ mg dm}^{-3}$ ), 60-80 ( $0,91 \text{ mg dm}^{-3}$ ), 80-100 ( $0,81 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e 100-120 cm ( $0,76 \text{ mg dm}^{-3}$ ) (ver Tabela 2). Foi observado aumento da concentração de enxofre no método incorporado em relação ao sem incorporação para os perfis do solo 20-40 ( $0,51 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e 40-60 cm ( $0,48 \text{ mg dm}^{-3}$ ).

A concentração de magnésio apresentou interação com o uso do gesso nos perfis de 0-20 40-60 e 100-120 cm (ver Tabela 2). Foi observado redução na concentração de magnésio com a aplicação de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso no perfil de 0-20 ( $3,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). O método de aplicação diferiu no perfil 40-60 e 100-120 cm, sendo que a aplicação incorporada promoveu os maiores valores ( $4,68$  e  $4,37 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em relação a aplicação superficial ( $1,40$  e  $1,72 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). A concentração de alumínio não alterou com a aplicação de gesso nos perfis avaliados (ver Tabela 2).

Tabela 2- Concentração de cálcio, enxofre, magnésio e alumínio nos diferentes perfis do solo, considerando a aplicação de gesso.

Perfil do solo (cm)	Sem gesso	Com gesso		Com gesso		
				Superficial	Incorporado	
Cálcio ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ )						
0-20	11,16	11,03	ns	12,12	9,95	ns
20-40	7,78	9,37	ns	7,97	10,77	ns
40-60	5,31	9,20	*	7,08	11,32	ns
60-80	5,10	9,97	*	8,68	11,26	ns
80-100	5,36	9,94	*	8,42	11,45	ns
100-120	4,64	11,04	*	7,58	14,49	*
Enxofre ( $\text{mg dm}^{-3}$ )						
0-20	1,09	1,52	*	1,57	1,47	ns
20-40	1,11	1,52	*	1,27	1,78	*
40-60	0,90	1,70	*	1,46	1,95	*
60-80	0,91	1,82	*	1,79	1,85	ns
80-100	0,89	1,70	*	1,58	1,82	ns
100-120	0,91	1,67	*	1,64	1,70	ns
Magnésio ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ )						
0-20	8,18	5,12	*	5,43	4,80	ns
20-40	4,50	3,22	ns	2,84	3,60	ns
40-60	2,69	3,04	ns	1,40	4,68	*
60-80	2,13	2,88	ns	2,29	3,48	ns
80-100	1,74	2,74	ns	1,98	3,50	ns
100-120	1,80	3,04	ns	1,72	4,37	*

Continua

## Conclusão

Tabela 2- Concentração de cálcio, enxofre, magnésio e alumínio nos diferentes perfis do solo, considerando a aplicação de gesso.

Perfil do solo (cm)	Sem gesso	Com gesso	Com gesso			
			Superficial	Incorporado		
Alumínio ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ )						
0-20	0,57	0,73	ns	0,63	0,83	ns
20-40	1,30	1,25	ns	1,50	1,01	ns
40-60	1,68	1,18	ns	1,50	0,86	ns
60-80	1,16	1,09	ns	1,19	0,99	ns
80-100	1,15	1,09	ns	1,31	0,87	ns
100-120	1,46	1,16	ns	1,41	0,92	ns

Fonte: produção do próprio autor

\* e ns – Significativo e não significativo pelo teste de tukey a 5% de significância, respectivamente.

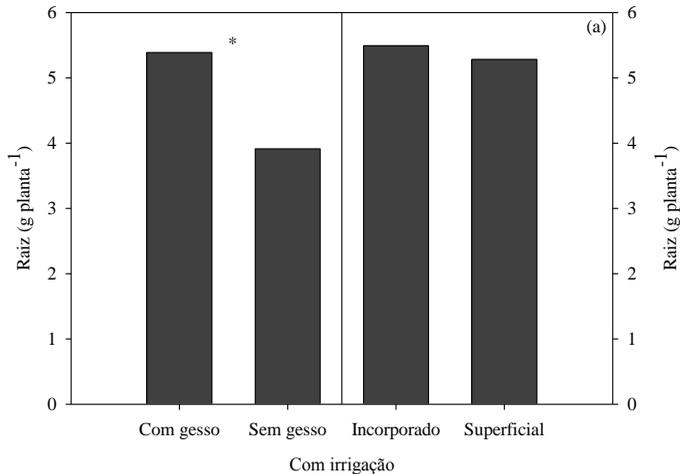
Portanto, de modo geral, houve alteração nas concentrações de cálcio e enxofre, no solo pela ação do gesso e pelo método de aplicação. Para a concentração de cálcio a aplicação de gesso incorporado ( $11,54 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) apresentou o maior valor em relação a não aplicação de gesso ( $6,55 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ). A aplicação de gesso incorporado também apresentou maior valor na concentração de enxofre ( $1,76 \text{ mg dm}^{-3}$ ) em relação a não aplicação ( $0,97 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Já para magnésio e alumínio não houve diferença entre a aplicação de gesso incorporado e superficial com a não aplicação de gesso no perfil do 0-120 cm, a 5% de significância.

#### 4.4.2 Biomassa radicular

A restrição hídrica imposta no período de enchimento de grãos na soja sem a aplicação de gesso apresentou, de modo geral, biomassa de raiz de  $3,29 \text{ g planta}^{-1}$  e as plantas mantidas

irrigadas no período apresentaram  $3,91 \text{ g planta}^{-1}$ . No entanto, a aplicação de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso proporcionou incremento na biomassa de raiz nas plantas submetidas à restrição hídrica ( $1,05 \text{ g planta}^{-1}$ ) e mantidas irrigadas ( $1,48 \text{ g planta}^{-1}$ ) (ver Figura 20). O método de aplicação promoveu incremento na produção de biomassa de raiz nas plantas submetidas à restrição hídrica no período de enchimento de grãos, sendo que a aplicação incorporada proporcionou ganhos de  $0,75 \text{ g planta}^{-1}$  em relação ao método superficial.

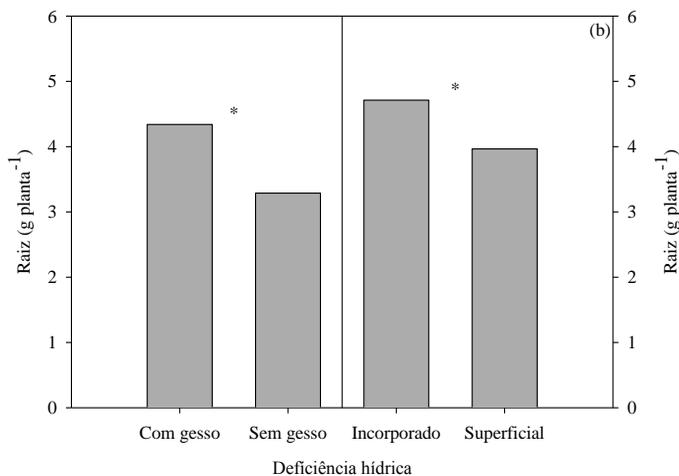
Figura 20- Crescimento radicular ( $\text{g planta}^{-1}$ ) em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso.



Continua

## Conclusão

Figura 20- Crescimento radicular (g planta<sup>-1</sup>) em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso.



Fonte: produção do próprio autor

\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

Observou-se interação da aplicação do gesso com o perfil do solo nas plantas submetidas à restrição hídrica e para as plantas mantidas irrigadas no estágio R5 para a biomassa de raiz (ver Tabela 3). Nas plantas submetidas à restrição hídrica a aplicação de gesso promoveu o crescimento radicular nos perfis do solo de 0-20 (0,69 g planta<sup>-1</sup>), 80-100 (0,21 g planta<sup>-1</sup>) e 100-120 cm (0,28 g planta<sup>-1</sup>) em relação a não aplicação do gesso. Não houve efeito do método de aplicação no crescimento radicular nas plantas sob restrição hídrica. Já nas plantas mantidas irrigadas houve crescimento radicular com o uso do gesso nos perfis de 0-20 (0,88 g planta<sup>-1</sup>) e no perfil de 100-120 cm (0,30 g planta<sup>-1</sup>). O método de aplicação do gesso não alterou o crescimento da biomassa de raiz por perfil.

Tabela 3- Crescimento radicular ( $\text{g planta}^{-1}$ ) por perfil do solo em plantas de soja com e sem irrigação no estádio R5, considerando a aplicação de gesso.

Perfil do solo (cm)	Sem gesso	Com gesso		Com gesso		
				Superficial	Incorporado	
Raiz ( $\text{g planta}^{-1}$ ) - Com irrigação						
0-20	1,69	2,57	*	2,68	2,45	ns
20-40	0,57	0,59	ns	0,54	0,64	ns
40-60	0,49	0,50	ns	0,49	0,52	ns
60-80	0,43	0,49	ns	0,41	0,57	ns
80-100	0,40	0,60	ns	0,55	0,66	ns
100-120	0,33	0,63	*	0,61	0,65	ns
Raiz ( $\text{g planta}^{-1}$ ) - Sem irrigação						
0-20	1,38	2,07	*	1,77	2,37	ns
20-40	0,61	0,49	ns	0,51	0,47	ns
40-60	0,55	0,44	ns	0,44	0,45	ns
60-80	0,35	0,45	ns	0,42	0,48	ns
80-100	0,27	0,48	*	0,44	0,52	ns
100-120	0,13	0,41	*	0,39	0,44	ns
Raiz (%) - Sem irrigação						
0-20	42,9	47,4	ns	44,7	50,1	ns
20-40	18,6	11,5	*	13,1	9,9	ns
40-60	17,1	10,3	*	11,2	9,5	ns
60-80	10,4	10,5	ns	10,6	10,5	ns
80-100	7,3	10,9	ns	10,8	11,0	ns
100-120	3,7	9,3	*	9,6	9,1	ns

Fonte: produção do próprio autor

\* e ns – Significativo e não significativo pelo teste de tukey a 5% de significância, respectivamente.

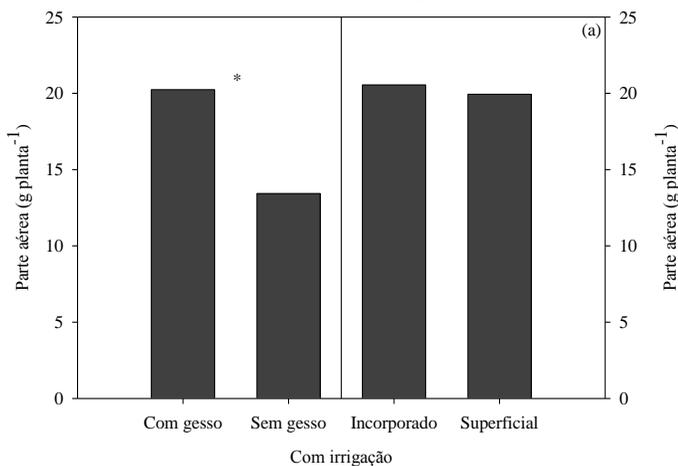
Houve interação da aplicação do gesso com o perfil do solo nas plantas submetidas à restrição hídrica no estádio R5 para a biomassa relativa de raiz (ver Tabela 3). Nas plantas

onde foi aplicado gesso a biomassa relativa de raiz apresentou redução nos perfis 20-40 e 40-60 cm e aumentou a proporção de raiz no perfil 100-120 cm em relação às plantas sem a aplicação de gesso. Não foi observado efeito do método de aplicação de gesso.

#### 4.4.3 Biomassa de parte aérea

A biomassa da parte aérea nas plantas com a aplicação de gesso apresentou incremento nas plantas mantidas irrigadas ( $6,81 \text{ g planta}^{-1}$ ) e nas plantas submetidas à restrição hídrica ( $6,25 \text{ g planta}^{-1}$ ) no período de enchimento de grãos em relação a aquelas sem a aplicação de gesso. Nas plantas submetidas à restrição hídrica ocorreu efeito adicional da incorporação do gesso no perfil do solo sobre a biomassa de parte aérea ( $3,55 \text{ g planta}^{-1}$ ) (ver Figura 21).

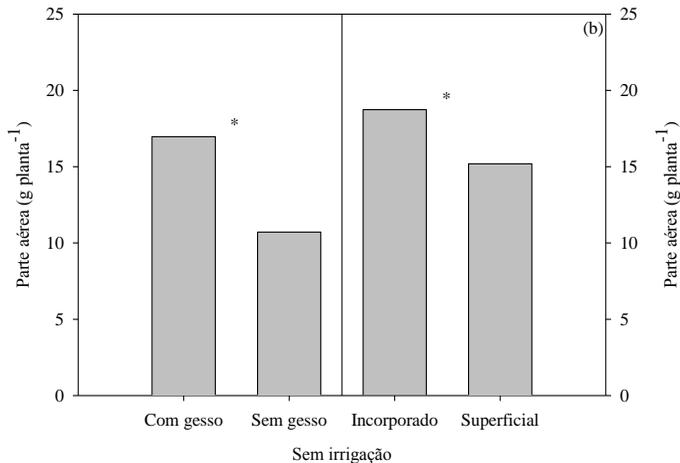
Figura 21- Crescimento de parte aérea ( $\text{g planta}^{-1}$ ) em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso.



Continua

## Conclusão

Figura 21- Crescimento de parte aérea (g planta<sup>-1</sup>) em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso.



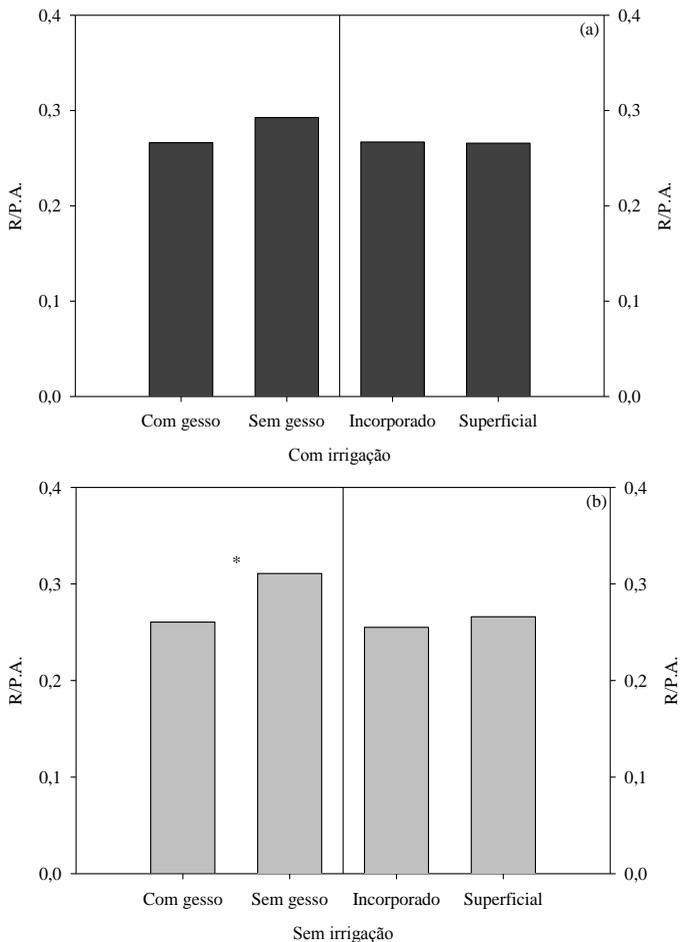
Fonte: produção do próprio autor

\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

### 4.4.4 Relação raiz/parte aérea

A relação entre a biomassa de raiz e parte aérea nas plantas com a aplicação de gesso apresentou redução nas plantas submetidas à restrição hídrica no período de enchimento de grãos em relação a aquelas sem a aplicação de gesso (16%) (ver Figura 22). Não foi observado efeito do método de aplicação nas plantas com e sem irrigação. A diferença observada entre com e sem gesso nas plantas submetidas à restrição hídrica deveu-se especialmente a relação raiz/parte aérea aos perfis 20-40 e 40-60 cm, onde a aplicação de gesso promoveu redução de 49 e 48%, respectivamente.

Figura 22- Relação raiz/parte aérea em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso.



Fonte: produção do próprio autor

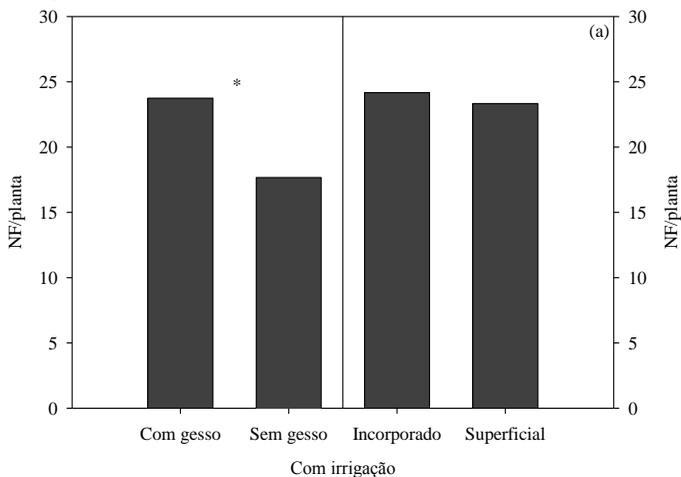
\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

#### 4.4.5 Número de folhas

O número de folhas por planta foi menor nas plantas sob condições de restrição hídrica imposto no período de

enchimento de grãos ( $18,9$  folhas planta<sup>-1</sup>) em relação às plantas mantidas irrigadas ( $21,7$  folhas planta<sup>-1</sup>). Nas plantas sob restrição hídrica a aplicação de gesso promoveu o incremento no número de folhas ( $3,9$  folhas planta<sup>-1</sup>) em relação a não aplicação do gesso, no entanto não foi observado efeito do método de aplicação. As plantas mantidas irrigadas também apresentaram ganho no número de folhas com a aplicação do gesso ( $6,1$  folhas planta<sup>-1</sup>) (ver Figura 23). O conteúdo relativo de água na folha também foi menor nas plantas sem irrigação ( $62,4\%$ ) em relação às mantidas irrigadas ( $81,8\%$ ) no período de enchimento de grãos, entretanto não foi constatado efeito da aplicação de gesso.

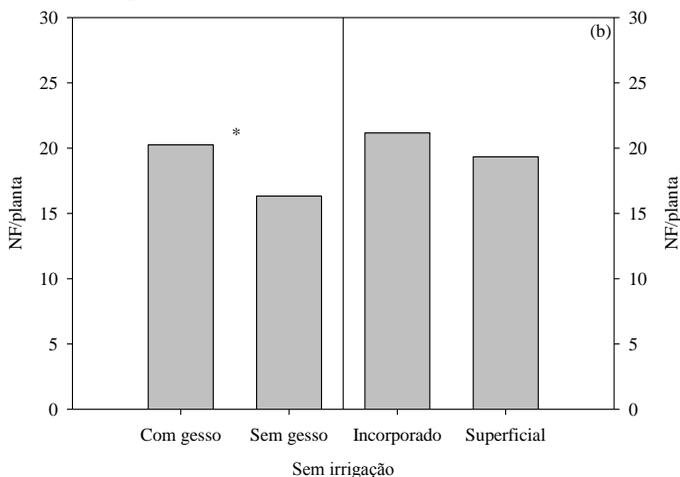
Figura 23- Número de folhas em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso.



Continua

## Conclusão

Figura 23- Número de folhas em plantas de soja com e sem irrigação no estágio R5, considerando a aplicação de gesso.



Fonte: produção do próprio autor

\* Diferença significativa pelo teste de tukey a 5% de significância.

### 4.4.6 Concentração de nutrientes nas folhas de soja

A aplicação de gesso promoveu aumento na concentração de cálcio nas folhas de plantas mantidas irrigadas no período de enchimento de grãos (ver Tabela 4). O método de aplicação incorporado promoveu adição na concentração de cálcio em relação a não incorporação no solo. Nas plantas submetidas à restrição hídrica não foi encontrado efeito do uso de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso. A concentração de magnésio nas folhas de plantas sem irrigação também aumentou com a aplicação de gesso, sendo que a incorporação ou não do gesso não alterou a concentração de magnésio nas folhas (ver Tabela 4). O gesso não promoveu alteração na concentração foliar do enxofre e nitrogênio (ver Tabela 4). No entanto, a análise do tecido foliar

mostrou que as concentrações de cálcio, enxofre, magnésio e nitrogênio estão dentro da faixa de suficiência para a soja.

Tabela 4- Concentração de nutrientes nas folhas de soja com e sem irrigação no estádio R5, considerando a aplicação de gesso.

Nível de irrigação	Sem gesso	Com gesso	Com gesso			
			Superficial		Incorporado	
Cálcio ( $\text{g kg}^{-1}$ )						
CI	12,5	14,5	*	12,9	16,1	*
SI	15,0	15,8	ns	14,8	15,2	ns
Enxofre ( $\text{g kg}^{-1}$ )						
CI	2,3	2,1	ns	2,1	2,1	ns
SI	2,5	2,2	ns	2,0	2,4	ns
Magnésio ( $\text{g kg}^{-1}$ )						
CI	4,5	5,0	ns	5,0	5,0	ns
SI	4,2	5,0	*	5,0	5,1	ns
Nitrogênio ( $\text{g kg}^{-1}$ )						
CI	54,8	52,5	ns	50,7	54,2	ns
SI	50,8	51,4	ns	49,8	53,0	ns

Fonte: produção do próprio autor

CI – com irrigação; SI – sem irrigação.

\* e ns – Significativo e não significativo pelo teste de tukey a 5% de significância, respectivamente.

#### 4.5 DISCUSSÃO

O objetivo deste trabalho foi determinar o efeito da aplicação de gesso no crescimento radicular e na partição de biomassa em soja submetida à restrição hídrica no período de enchimento de grãos. Com esta intenção as plantas de soja foram conduzidas em vasos na casa de vegetação onde a aplicação do gesso e a imposição da restrição hídrica foi realizada em ambiente controlado. A hipótese geral do trabalho foi que o gesso promove o crescimento radicular ( $\text{g m}^{-3}$ ) pelo

aumento na concentração de cálcio nos perfis mais profundos do solo e reduz a deficiência hídrica através do aumento da absorção de água. Os resultados observados neste experimento podem diferir dos conduzidos a campo, porém são válidos para avaliar a capacidade de crescimento radicular de plantas de soja.

Os resultados mostraram que o gesso promoveu incrementos nas concentrações de cálcio nos perfis do solo de 40-60, 60-80, 80-100 e 100-120 cm. Portanto, a aplicação de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso foi eficiente no aumento das concentrações de cálcio em profundidade inferior a 40 cm. O método de aplicação incorporado promoveu maior concentração de cálcio no perfil de 100-120 cm em relação ao método superficial, indicando que a aplicação do gesso em superfície promoveu a movimentação do cálcio em maior quantidade até a profundidade de 100 cm no período de enchimento de grãos. Aplicação de gesso aumentou linearmente os teores de cálcio trocável no perfil do solo (CAIRES et al., 2011). O movimento do cálcio trocável no perfil do solo pode variar de acordo com o tipo do solo, quantidade de gesso e volume de água aplicada.

A concentração de enxofre extraível também aumentou nos perfis do solo de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 e 100-120 cm com a aplicação de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso. Segundo Caires et al. (2011), os teores de enxofre aumentaram linearmente com a profundidade do solo entre 0-60 cm, quando aplicado na superfície. Caires et al. (2003), observaram que a movimentação do enxofre foi proporcional a quantidade de gesso aplicado entre 0 e  $9 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Houve redução de magnésio trocável nas camadas superficiais do solo quando aplicado gesso em relação a não aplicação. A lixiviação do magnésio em camadas superficiais com a aplicação de gesso ocorre pela formação de pares iônicos neutros com o  $\text{SO}_4^{-2}$ , pela ação do cálcio dissociado no gesso. Em solos que apresentam acidez em perfis do solo mais profundos, a aplicação de gesso pode aumentar a lixiviação de

bases pela formação de pares iônicos neutros ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  e  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) (ZAMBROSI et al., 2007). A movimentação de cálcio e magnésio no perfil do solo pode ser benéfica para o crescimento radicular em camadas mais profundas.

A aplicação de gesso, tanto incorporado quanto superficial, não alterou o teor de alumínio trocável no perfil do solo em relação a não aplicação, no período de enchimento de grãos na soja. Além disso, não foi observado correlação do enxofre ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) com alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ). Tal resultado pode estar associado à aplicação de calcário dolomítico incorporado no perfil do solo na implantação do experimento. Como resultado do aumento do pH do solo pela aplicação do  $\text{CaCO}_3$ , houve redução na concentração e na atividade de alumínio tóxico e aumento na proporção  $\text{AlOH}^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  e  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (CARVALHO; RAIJ, 1997).

A biomassa de raiz ( $\text{g planta}^{-1}$ ) foi influenciada pela aplicação de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso nas plantas mantidas irrigadas, portanto a utilização de gesso mesmo em condições de não restrição foi efetivo no aumento do crescimento radicular. Nas plantas submetidas à restrição hídrica no período de enchimento de grãos o gesso proporcionou maior crescimento radicular total, sendo que a aplicação incorporada promoveu maior biomassa de raiz em comparação a aplicação superficial. Na análise por perfil do solo, observou-se que a aplicação de gesso no solo promoveu o crescimento radicular nas plantas sem irrigação no estágio R5 nos perfis mais profundos do solo. Além disso, nas plantas com e sem irrigação houve o aumento no crescimento radicular no perfil de 0-20 cm em decorrência da aplicação do gesso. Tal resultado pode estar relacionado ao crescimento inicial das raízes no período de plântula. O apropriado balanço entre cálcio e alumínio foi efetivo no crescimento inicial das raízes de plântulas de soja (NOBLE et al., 1988).

A aplicação de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso promoveu alteração no crescimento relativo das raízes, no qual os perfis 20-40 e

40-60 cm reduziram a proporção de raízes e no perfil 100-120 cm houve aumento na proporção de raízes. A aplicação do gesso tanto em superfície quando incorporado promoveu a melhor distribuição da raiz em todo o perfil do solo, principalmente nos perfis de maior profundidade. Caires et al. (2001), observou que o gesso proporcionou melhor distribuição relativa do sistema radicular em profundidade em cevada.

O crescimento radicular ( $\text{g planta}^{-1}$ ) das plantas submetidas à restrição hídrica apresentou correlação com as concentrações de cálcio, magnésio e alumínio do solo. No perfil total do solo (0-120 cm) o magnésio apresentou correlação positiva de  $r = 0,65$  com a biomassa de raiz e o alumínio correlação negativa de  $r = -0,58$ . No entanto, no perfil superior do solo (0-60 cm) apenas a concentração de alumínio apresentou correlação com a biomassa de raiz de  $r = -0,65$ . Portanto, no perfil de 0-60 cm a redução na concentração de alumínio levou ao maior crescimento da raiz nas plantas submetidas à restrição hídrica no período de enchimento de grãos. O alumínio em concentrações tóxicas causa redução na taxa de crescimento de raízes, interferindo na absorção de água e nutrientes pelas plantas (SILVA et al., 2001). No presente trabalho, os valores encontrados não são considerados elevados (CAIRES et al., 2001), no entanto, a sua redução promoveu o crescimento radicular.

Já no perfil inferior (60-120 cm) a concentração de cálcio ( $r = +0,77$ ) e alumínio ( $r = -0,67$ ) apresentou correlação com a biomassa de raiz em condições de restrição hídrica. Então, o aumento do teor de cálcio e a redução do teor de alumínio promoveu o crescimento da raiz no perfil de 60-120 cm. Em casos de solos com concentrações muito baixas de alumínio trocável, o suprimento de cálcio é o principal fator responsável pelo crescimento do sistema radicular. A presença de Ca nas soluções em contato com as raízes é essencial para a sua sobrevivência, pois não há a translocação do nutriente da

parte aérea para as porções novas das raízes em crescimento (CAIRES et al., 2001).

Mecanismos propostos para reduzir a toxidez do alumínio às raízes pelo cálcio e magnésio adicionados ao solo envolvem a redução da atividade do alumínio na membrana plasmática ou na competição pelos sítios de ligação (KINRAIDE; PARKER, 1987; KINRAIDE 1998). O teor de cálcio e magnésio no perfil do solo pode influenciar na redução da toxidez do alumínio às raízes. Segundo Silva et al. (2005), o magnésio foi mais eficiente que o cálcio para reduzir a toxidez por alumínio, porém os mecanismos fisiológicos envolvidos no efeito protetor do magnésio contra a toxidez do alumínio as raízes de soja ainda não são conhecidos.

A utilização de gesso mesmo em condições de não restrição foi efetiva no aumento da biomassa de parte aérea. Este resultado pode estar associado à melhoria na fertilidade do subsolo promovido pela aplicação do gesso. Nas plantas submetidas à restrição hídrica no período de enchimento de grãos o gesso proporcionou maior acúmulo de biomassa de parte aérea, sendo que a aplicação incorporada promoveu maior biomassa de parte aérea em relação à aplicação superficial. O maior crescimento radicular em subsuperfície com a aplicação do gesso aumenta a absorção de água e a biomassa de parte aérea (SILVA et al., 2005). Soratto e Crusiol (2008) observaram aumento na estatura de plantas de aveia-preta com a aplicação de gesso em superfície. Gill et al. (2008), constataram aumento da biomassa e da estatura em trigo com a aplicação de  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso incorporado no perfil de 30-40 cm.

Em adição, a aplicação de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso em condições de restrição hídrica foi eficiente na redução da relação raiz/parte aérea. Portanto, o gesso promoveu o crescimento da parte aérea em relação ao crescimento da raiz nas plantas submetidas à restrição hídrica no período de enchimento de grãos. A partição dos assimilados produzidos

pela fotossíntese entre a parte aérea e raiz e posteriormente, entre as estruturas vegetativas e reprodutivas é importante para a determinação da produtividade em condições de restrição hídrica. Restrição hídrica pode reduzir o crescimento foliar e aumentar a alocação de massa seca na raiz, levando ao declínio da relação parte aérea/raiz (WU; COSGROVE, 2000). O resultado do presente trabalho mostrou que as plantas foram responsivas a aplicação de gesso para atenuar os efeitos da restrição hídrica, pois aumentou o acúmulo de assimilados na parte aérea em relação raiz.

A aplicação do gesso promoveu o aumento no número de folhas nas plantas com e sem irrigação no período de enchimento de grãos. Portanto, o gesso foi efetivo no aumento do número de folhas e para atenuar os efeitos da restrição hídrica imposta na soja. A habilidade da planta em manter a área foliar, durante a diminuição da água disponível no solo, desempenha importante papel na manutenção do potencial produtivo da soja, após o reestabelecimento do suprimento de água (CHAVES et al., 2002). O conteúdo relativo de água na folha reduziu nas plantas submetidas à restrição hídrica, no entanto não foi observado diferença nos valores com a aplicação do gesso incorporado ou superficial. Porém, as plantas com a aplicação de gesso apresentaram maior número de folhas e maior biomassa de parte aérea em comparação às plantas de soja sem gesso. Este fato pode estar relacionado à redução no conteúdo relativo de água na folha num período menor de dias (< 10 dias) nas plantas sem a aplicação de gesso, decorrentes do menor crescimento radicular e absorção de água, proporcionando menor crescimento de parte aérea e número de folhas nas plantas.

O gesso causou aumento das concentrações de cálcio nas plantas com irrigação no período de enchimento de grãos e na concentração de magnésio nas plantas sem irrigação. A maior absorção dos nutrientes pode estar associada a maior concentração em subsuperfície do cálcio e magnésio pela ação

do gesso. De acordo com Caires et al. (2003) a aplicação de gesso promoveu incrementos na concentração de cálcio nas folhas de soja. Segundo Rampim et al. (2011), os teores foliares de cálcio e magnésio nas folhas de soja aumentaram em consequência da aplicação de gesso no solo. A aplicação de gesso não afetou as concentrações de enxofre e nitrogênio nas folhas de soja. Outros trabalhos tem encontrado ausência de efeito do gesso na concentração de nitrogênio em soja (CAIRES et al., 2006; 2011). No entanto, é importante destacar que a quantidade total de nitrogênio absorvido por planta ( $\text{g N planta}^{-1}$ ) aumentou em decorrência da aplicação do gesso na soja sob restrição hídrica. Este resultado foi em função da maior biomassa de parte aérea das plantas com aplicação de gesso.

#### 4.6 CONCLUSÃO

Os resultados sugerem que o gesso é efetivo na redução da restrição hídrica no período de enchimento de grãos em solos com baixa concentração de alumínio trocável, pois promove o crescimento radicular em subsuperfície através do incremento nas concentrações de cálcio e redução no alumínio. O método de aplicação de gesso incorporado proporcionou maior crescimento radicular no perfil de 0-120 cm. O gesso promove o aumento da biomassa da parte aérea e do número de folhas por planta e reduz a relação raiz/parte aérea nas plantas em condições de restrição hídrica. Além disso, a absorção de cálcio e magnésio aumenta em decorrência da aplicação do gesso.

## REFERÊNCIAS

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 275-286, 2003. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832003000200008&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000200008&nrm=iso)>. Acesso em: 28 mai. 2013.

CAIRES, E. F. et al. Soybean yield and quality a function of lime and gypsum applications. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 4, p. 370-379, 2006. Disponível em: <

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-90162006000400008&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162006000400008&nrm=iso)>. Acesso em: 18 abr. 2013.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, v. 60, n. 3, p. 213-223, 2001. Disponível em: <

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87052001000300009&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052001000300009&nrm=iso)>. Acesso em: 18 abr. 2013.

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 125-136, 2004. Disponível em:

<  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832004000100013&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000100013&nrm=iso)>. Acesso em: 18 abr. 2013.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 2, p. 209-216, 2011. Disponível em: <

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-90162011000200011&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162011000200011&nrm=iso)>. Acesso em: 18 abr. 2013.

CARVALHO, M. C. S.; VAN RAIJ, B. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant and Soil**, v. 192, n. 1, p. 37-48, 1997. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004285113189> >. Acesso em: 22 mai. 2014.

CHAVES, M. M. et al. How Plants Cope with Water Stress in the Field? Photosynthesis and Growth. **Annals of Botany**, v. 89, n. 7, p. 907-916, 2002. Disponível em: < <http://aob.oxfordjournals.org/content/89/7/907.abstract> >. Acesso em: 18 abr. 2013.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, SBCS - Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004. 400 p.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Special Report 80, Iowa Agricultural Experiment Station, Ames, IA, 11 p.

GILL, J. S.; SALE, P. W. G.; TANG, C. Amelioration of dense sodic subsoil using organic amendments increases wheat yield more than using gypsum in a high rainfall zone of southern Australia. **Field Crops Research**, v. 107, n. 3, p. 265-275, 2008. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429008000543> >. Acesso em: 27 mai. 2013.

JONGRUNGKLANG, N. et al. Classification of root distribution patterns and their contributions to yield in peanut genotypes under mid-season drought stress. **Field Crops Research**, v. 127, n. 1, p. 181-190, 2012. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037842901100390X> >. Acesso em: 27 mai. 2013.

KINRAIDE, T. B. Three Mechanisms for the Calcium Alleviation of Mineral Toxicities. **Plant Physiology**, v. 118, n. 2, p. 513-520, 1998. Disponível em: < <http://www.plantphysiol.org/content/118/2/513.abstract> >. Acesso em: 24 jun. 2013.

KINRAIDE, T. B.; PARKER, D. R. Cation Amelioration of Aluminum Toxicity in Wheat. **Plant Physiology**, v. 83, n. 3, p. 546-551, 1987. Disponível em: < <http://www.plantphysiol.org/content/83/3/546.abstract> >. Acesso em: 24 jun. 2014.

NOBLE, A. D.; SUMNER, M. E.; ALVA, A. K. The pH dependency of aluminum phytotoxicity alleviation by calcium sulfate. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 5, p. 1398-1402, 1988. Disponível em: < <https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/52/5/1398> >. Acesso em: 18 abr. 2013.

RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1687-1698, 2011. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832011000500023&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832011000500023&nrm=iso) >. Acesso em: 23 mai. 2014.

SERRAJ, R. et al. Variation in root traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.) grown under terminal drought. **Field Crops Research**, v. 88, n. 2-3, p. 115-127, 8/10/ 2004. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429003002673> >. Acesso em: 27 mai. 2014.

SILVA, I. R. D. et al. Altered aluminum inhibition of soybean root elongation in the presence of magnesium. **Plant and Soil**, v. 230, n. 2, p. 223-230, 2001. Disponível em: <  
<http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1010384516517> >. Acesso em: 18 abr. 2013.

SILVA, I. R. D. et al. Interactions between magnesium, calcium, and aluminum on soybean root elongation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 747-754, 2005. Disponível em: <  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832005000500010&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832005000500010&nrm=iso) >. Acesso em: 18 abr. 2013.

SONGSRI, P. et al. Association of root, specific leaf area and SPAD chlorophyll meter reading to water use efficiency of peanut under different available soil water. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 5, p. 790-798, 2009. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377408002825> >. Acesso em: 27 mai. 2013.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 675-688, 2008. Disponível em: <  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832008000200022&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000200022&nrm=iso) >. Acesso em: 18 abr. 2013.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 1. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

WU, Y.; COSGROVE, D. J. Adaptation of roots to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 350, p. 1543-1553, 2000. Disponível em: < <http://jxb.oxfordjournals.org/content/51/350/1543.abstract> >. Acesso em: 16 abr. 2013.

ZAMBROSI, F.; ALLEONI, L.; CAIRES, E. F. Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid Oxisol under no-till system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 79, n. 2, p. 169-179, 2007. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s10705-007-9105-7> >. Acesso em: 18 abr. 2013.

## **5 EFEITO DA RESTRIÇÃO HÍDRICA E DO POTÁSSIO NO CRESCIMENTO RADICULAR DE PLANTAS DE SOJA**

### **5.1 RESUMO**

A suplementação de potássio (K) pode influenciar o status hídrico da planta e mitigar os efeitos da restrição hídrica, através do crescimento radicular. O objetivo do trabalho foi determinar o efeito do K no crescimento radicular de plantas de soja submetidas à restrição hídrica no período inicial do desenvolvimento vegetativo. O trabalho foi realizado em casa de vegetação com a cultivar BMX Turbo RR, em tubos de PVC de 120 cm de comprimento e 15 cm de diâmetro. O suprimento diário de água às plantas foi realizado até o estágio fenológico V2, quando a imposição da restrição hídrica foi realizada. O período de restrição hídrica foi de 12 dias. No tratamento com irrigação as plantas foram irrigadas diariamente até o final do experimento (12 dias após o início do estágio V2) e a água no solo foi mantida na capacidade de retenção do vaso. Nos tratamentos com imposição da restrição hídrica, esta foi realizada pela suspensão do fornecimento de água aos vasos. Após o período de restrição foi realizada a colheita das plantas. A suplementação de K na base não promoveu incrementos na biomassa de raiz nos perfis do solo nas plantas sem irrigação no início do desenvolvimento vegetativo. O K também não alterou o padrão de distribuição relativa de raiz nas plantas submetidas à restrição hídrica. Nas plantas submetidas à restrição hídrica observou-se aumento da densidade de comprimento de raiz no perfil de 0-20 cm. O peso específico de raiz respondeu a suplementação de K nas plantas submetidas à restrição hídrica nos perfis de 0-20 e 20-40 cm. A suplementação de K não proporcionou aumento da biomassa de parte aérea nem na relação raiz/parte aérea nas plantas de soja submetidas à restrição hídrica. Na área foliar, o K

proporcionou maior taxa de expansão nas plantas submetidas à restrição hídrica comparada às plantas mantidas irrigadas. A suplementação de K precocemente no desenvolvimento da soja aumenta a tolerância à restrição hídrica, através do aumento da densidade de comprimento de raiz e do peso específico de raiz.

Palavras chave: *Glycine max*, deficiência hídrica, densidade de comprimento de raiz, peso específico de raiz.

## 5.2 INTRODUÇÃO

Características de raiz como densidade de comprimento de raiz, espessura de raiz, profundidade de enraizamento e distribuição radicular foram considerados fatores de tolerância à restrição hídrica. Crescimento de raiz é um importante componente da adaptação da soja a condições de baixa disponibilidade hídrica. Crescimento radicular define a extensão pelas quais as plantas exploram o solo para absorção de água e assimilação de nutrientes (KUSAKA et al., 2005).

Segundo Kashiwagi et al. (2006), a densidade de comprimento de raiz apresenta relação positiva na produtividade de plantas em condições de restrição hídrica de curta duração. O fato da densidade de comprimento de raiz aumentar sob condições de baixa disponibilidade hídrica no solo e de estar correlacionada com a produtividade, a dinâmica de crescimento da raiz sob restrição hídrica pode ser a chave para o entendimento da contribuição das raízes para retardar a restrição hídrica. O foco da tolerância à restrição hídrica é a habilidade de sustentar grande produção de biomassa via crescimento radicular para a manutenção da transpiração (SOLTANI et al., 2000). A elevada relação entre biomassa de raiz em profundidade e biomassa de parte aérea foi encontrada na manutenção do potencial hídrico e apresentou efeito

positivo na produtividade sob condições de restrição hídrica (SANGAKKARA et al., 1996).

Nesse sentido, a suplementação de K influencia o status hídrico da planta e auxilia a superar a restrição hídrica, através do crescimento radicular. Estudos de Sangakkara et al. (1996) e Nandwal et al. (1998), reportaram o efeito benéfico da utilização de K na redução da restrição hídrica em *Phaseolus vulgaris* e *Vigna Radiata*. De acordo com Sangakkara et al. (2000), a suplementação de K em espécies de feijão aumentou a área foliar, o peso seco de parte aérea e a taxa fotossintética e reduziu o potencial hídrico das folhas em condições de restrição hídrica, indicando a influencia do nutriente na mitigação da restrição hídrica. Em relação ao crescimento radicular os autores observaram maior crescimento com suplementação de K em condições de restrição hídrica. Rosolem et al. (2003), ao analisar a adubação potássica em relação ao nível de umidade do solo na cultura da soja, observaram maior incremento na produção de grãos sob condição de baixa umidade do solo em função do aumento das doses do nutriente. Porém Catuchi et al. (2012) não observou efeito da adubação potássica em condições de restrição hídrica nos parâmetros fisiológicos e no crescimento de plantas de soja.

O K também reduz os efeitos da restrição hídrica em plantas pela manutenção do balanço hídrico e partição dos fotoassimilados (WALKER et al., 1998). Segundo Sangakkara et al. (2000), o maior efeito da fertilização com K foi na manutenção do potencial hídrico, aumentando a fotossíntese e facilitando o movimento do carbono das folhas para as raízes em espécies suscetíveis em condições de restrição hídrica.

O objetivo do trabalho foi determinar o efeito do K no crescimento radicular de plantas de soja submetidas à restrição hídrica no período inicial do desenvolvimento vegetativo.

### 5.3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Centro de Ciências Agroveterinárias, na Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UEDESC) em Lages/SC. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com temperatura de  $25 \pm 5$  °C e umidade relativa de  $60 \pm 15\%$ . O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com 5 repetições.

A semeadura foi realizada em tubos de PVC de 120 cm de comprimento e 15 cm de diâmetro, preenchido com 4 sementes cada e após o estágio V1 foi realizado desbaste e mantida apenas uma planta por vaso. A cultivar utilizada foi BMX Turbo RR de hábito de crescimento indeterminado e grupo de maturidade relativa 6.0. A análise inicial do solo apresentou teor de argila de 43,0%, matéria orgânica de 2,6%, CTC do solo a pH 7,0 de  $15,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e pH em água de 6,7. Os teores iniciais dos nutrientes foram  $\text{Ca} = 8,01 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ,  $\text{Mg} = 5,46 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ,  $\text{P} = 17,25 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $\text{K} = 149 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $\text{H+Al} = 1,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e  $\text{Al} = 0,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . As doses de K foram 0, 30 e  $60 \text{ mg dm}^{-3}$  aplicados na base e em superfície com cloreto de potássio. O suprimento diário de água às plantas foi realizado até determinado estágio fenológico (estádio V2), quando a imposição da restrição hídrica foi realizada. No estágio V2 as plantas foram submetidas à restrição hídrica por 12 dias. No tratamento com irrigação as plantas foram irrigadas diariamente até o final do experimento (12 dias após o início do estágio V2) e a água no solo foi mantida na capacidade de retenção do vaso. Nos tratamentos com imposição da restrição hídrica, esta foi realizada pela suspensão do fornecimento de água aos vasos. Após o período de restrição foi realizado a colheita das plantas. O teor de umidade do solo (US) foi medido no final do período de restrição hídrica. As amostras de solo foram pesadas e determinou-se a massa úmida (MU), sendo transferida em seguida para a estufa a 105 °C por 48 horas onde determinou-

se a massa seca (MS). O teor de umidade do solo foi obtido através da fórmula:  $US (\%) = [(MU-MS)/MS] \times 100$ .

Foram coletadas plantas no dia 12 após a restrição hídrica para determinação do comprimento e largura foliar, da biomassa de parte aérea, biomassa radicular, densidade de comprimento de raiz, peso específico de raiz e distribuição relativa de raiz (%). Os caracteres de raiz foram avaliados nas camadas de 0-20; 20-40; 40-60; 60-80; 80-100 e 100-120 cm de perfil de solo, respectivamente. A área foliar foi obtida de maneira indireta através da multiplicação do comprimento e largura da folha pelo coeficiente de área foliar (0,69) obtido previamente com o auxílio do integrador de área foliar. As amostras de raiz e parte aérea para determinação da biomassa foram colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar a 60° C, até atingirem massa constante. A densidade de comprimento de raiz foi estimada pelo método de interceptação linear (TENNANT, 1975) dividido pelo volume de solo, e o peso específico de raiz foi calculado pela divisão comprimento de raiz/biomassa de raiz. Com base nos dados foram determinadas as taxas de crescimento da cultura e relação entre peso de raiz e parte aérea.

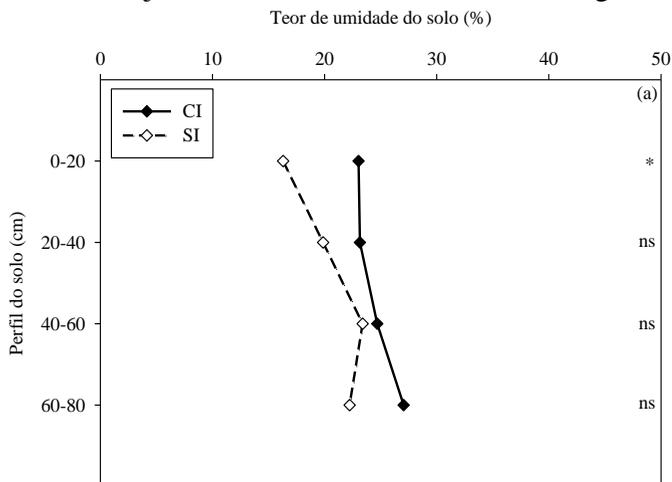
Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando detectadas variações significativas, as médias foram contrastadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Quando os fatores quantitativos foram significativos foi procedido ajuste de regressão através de contrastes previamente definidos para decompor a variação em componentes polinomiais ortogonais. Entre as funções testadas para ajuste dos dados, foram escolhidos os modelos que os componentes da equação foram significativos a 5% de probabilidade e o de maior coeficiente de determinação.

## 5.4 RESULTADOS

## 5.4.1 Teor de umidade do solo

O teor de umidade no solo para as doses 0, 30 e 60 mg K dm<sup>-3</sup> apresentou diferença apenas no perfil de 0-20 cm do solo entre as plantas com e sem irrigação (ver Figura 24). A maior diferença entre com e sem irrigação no perfil de 0-20 cm foi na ausência de K (6,7%), seguido do tratamento com 30 mg K dm<sup>-3</sup> (5,3%) e 60 mg K dm<sup>-3</sup> (3,0%). No geral, todos os tratamentos de K apresentaram redução no teor de umidade do solo ( $\approx$  4%).

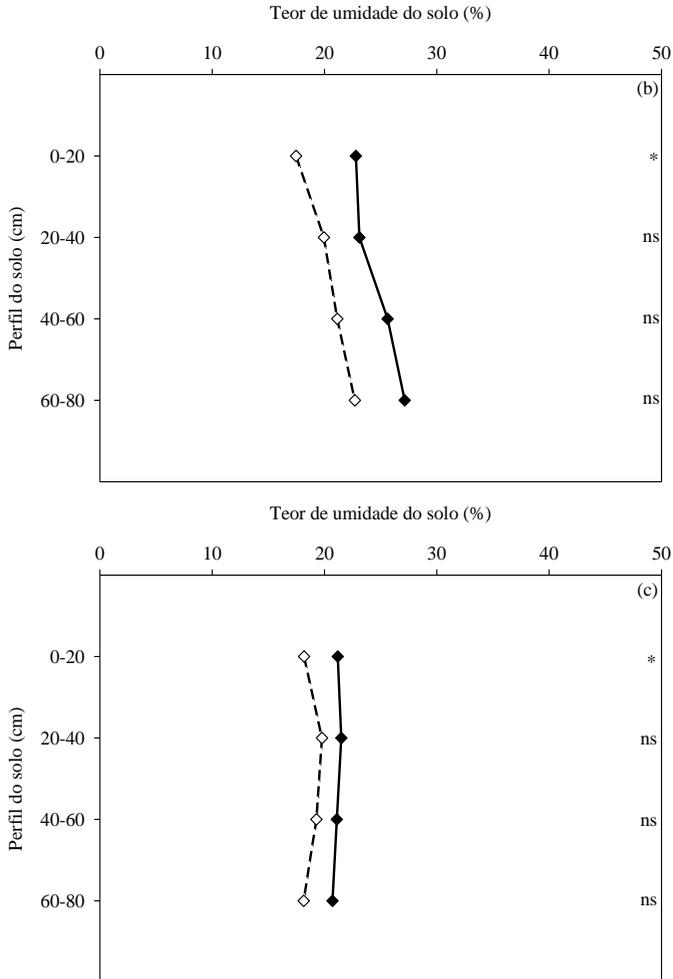
Figura 24- Teor de umidade do solo em função da suplementação de K com 0 (a); 30 (b) e 60 (c) mg dm<sup>-3</sup> em soja no início do desenvolvimento vegetativo.



Continua

Continuação

Figura 24- Teor de umidade do solo em função da suplementação de K com 0 (a); 30 (b) e 60 (c) mg dm<sup>-3</sup> em soja no início do desenvolvimento vegetativo.



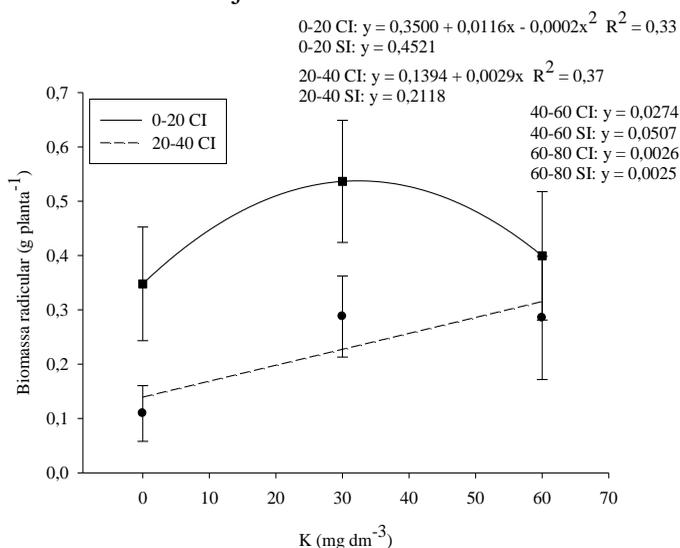
Fonte: produção do próprio autor

\* e ns – Significativo e não significativo pelo teste de tukey a 5% de significância, respectivamente.

### 5.4.2 Biomassa radicular

Para as características de raiz avaliadas no trabalho houve interação entre os níveis de irrigação, suplementação de K e perfil de solo. A aplicação adicional de K na base não promoveu incrementos na biomassa de raiz nos perfis do solo nas plantas sem irrigação no início do desenvolvimento vegetativo. No entanto, a suplementação de K proporcionou aumento na biomassa de raiz nas plantas mantidas irrigadas. No perfil de 0-20 cm o K promoveu ajuste quadrático para o crescimento de raiz, sendo que a dose de  $33,0 \text{ mg K dm}^{-3}$  apresentou os maiores ganhos em biomassa de raiz ( $0,54 \text{ g planta}^{-1}$ ). Já para o perfil de 20-40 cm o incremento apresentou função linear entre as doses de 0 a  $60 \text{ mg K dm}^{-3}$ . Nos perfis de 40-60 e 60-80 cm não foi observado ajuste de regressão entre K e biomassa de raiz (ver Figura 25).

Figura 25- Suplementação de K no crescimento da biomassa radicular de soja no estágio V2.



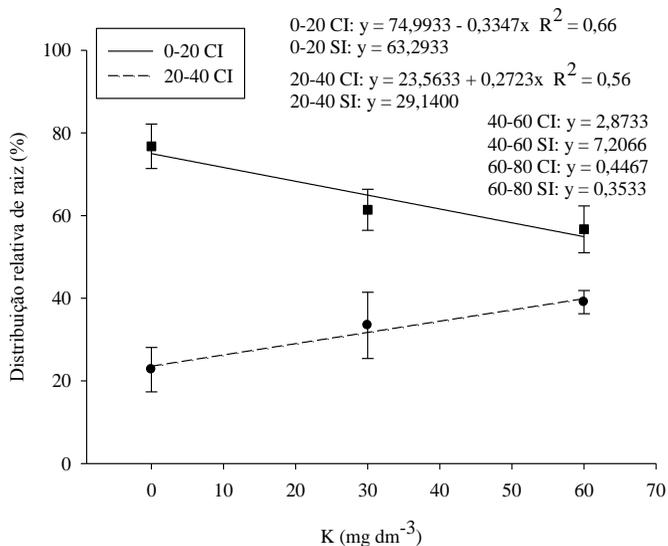
Fonte: produção do próprio autor

Barras representam o desvio padrão das médias.

### 5.4.3 Distribuição relativa da raiz

O efeito suplementar do K aplicado à base alterou o padrão de distribuição relativa de raiz nas plantas mantidas irrigadas no início do desenvolvimento vegetativo. No perfil de 0-20 cm observou-se redução linear ( $b = -0,33$ ) da distribuição relativa de raiz com o aumento da dose de K. Já para o perfil de 20-40 cm houve incremento linear ( $b = 0,27$ ) na distribuição relativa de raiz com o aumento da dose de K. Não foi observado efeito do K na distribuição relativa de raiz nas plantas em condições de restrição hídrica (ver Figura 26). Entretanto, o perfil de 40-60 cm apresentou maior proporção de raiz nas plantas sem irrigação em relação às plantas mantidas irrigadas em todo o período, quando considerou-se a significância de 10% ( $P = 0,0596$ ).

Figura 26- Suplementação de K no padrão de distribuição relativa de raiz de soja no estágio V2.



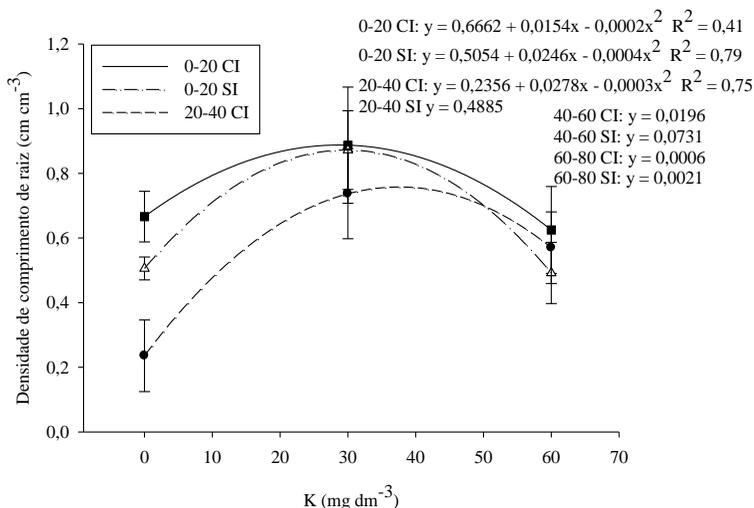
Fonte: produção do próprio autor

Barras representam o desvio padrão das médias.

### 5.4.4 Densidade de comprimento de raiz

O K no perfil de 0-20 e 20-40 cm nas plantas mantidas irrigadas apresentou relação quadrática com a densidade de comprimento de raiz. A maior densidade de comprimento de raiz nas plantas com irrigação no estágio V2 foi observado na dose de 28,8 mg K dm<sup>-3</sup> (0,89 cm cm<sup>-3</sup>) no perfil de 0-20 cm e de 37,8 mg K dm<sup>-3</sup> (0,76 cm cm<sup>-3</sup>) no perfil de 20-40 cm. Para os perfis 40-60 cm e 60-80 cm não houve ajuste de regressão. Nas plantas submetidas à restrição hídrica observou-se função quadrática para o perfil de 0-20 cm. A dose de K que proporcionou maior densidade de comprimento de raiz foi 30,0 mg K dm<sup>-3</sup> (0,87 cm cm<sup>-3</sup>) (ver Figura 27).

Figura 27- Suplementação de K na densidade de comprimento de raiz de soja no estágio V2.

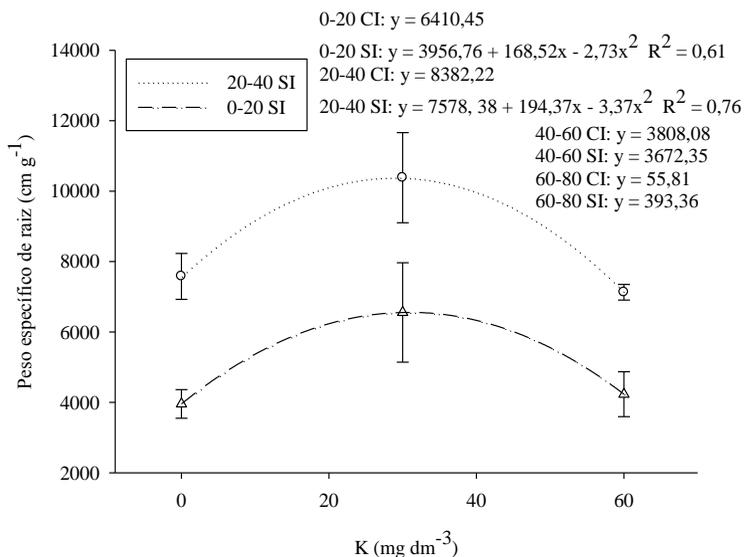


Fonte: produção do próprio autor  
 Barras representam o desvio padrão das médias.

### 5.4.5 Peso específico de raiz

O peso específico de raiz respondeu a aplicação de K adicional na base nas plantas submetidas à restrição hídrica nos perfis de 0-20 e 20-40 cm. Para ambos os perfis a função ajustada foi quadrática, sendo que o valor de maior peso específico de raiz foi  $30,6 \text{ mg K dm}^{-3}$  para o perfil de 0-20 cm ( $6554,9 \text{ cm g}^{-1}$ ) e  $29 \text{ mg K dm}^{-3}$  no perfil 20-40 cm ( $10385,2 \text{ cm g}^{-1}$ ). Nas plantas mantidas irrigadas não foi constatado incrementos no peso específico de raiz com as doses de K (ver Figura 28).

Figura 28- Suplementação de K no peso específico de raiz de soja no estágio V2.



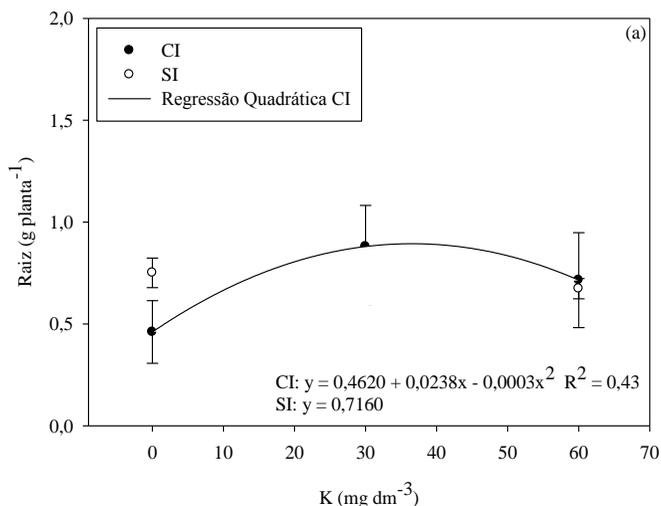
Fonte: produção do próprio autor

Barras representam o desvio padrão das médias.

### 5.4.6 Biomassa de raiz e parte aérea, relação raiz/parte aérea e área foliar

No perfil de 0-80 cm a suplementação do K promoveu incremento de matéria seca de raiz nas plantas com irrigação, sendo que apresentou ganhos no crescimento até a dose de  $36,6 \text{ mg K dm}^{-3}$  ( $0,89 \text{ g planta}^{-1}$ ). Nas plantas sem irrigação no mesmo período não foi observado incrementos na biomassa de raiz no perfil de 0-80 cm (ver Figura 29a). A aplicação adicional de K na base não proporcionou aumento da biomassa de parte aérea nas plantas de soja submetidas à restrição hídrica no início do desenvolvimento vegetativo. No entanto, o K promoveu maior ganho de biomassa nas plantas irrigadas, sendo que a relação apresentou função quadrática com maior valor de biomassa de parte aérea com  $36 \text{ mg K dm}^{-3}$  ( $2,53 \text{ g planta}^{-1}$ ) (ver Figura 29b).

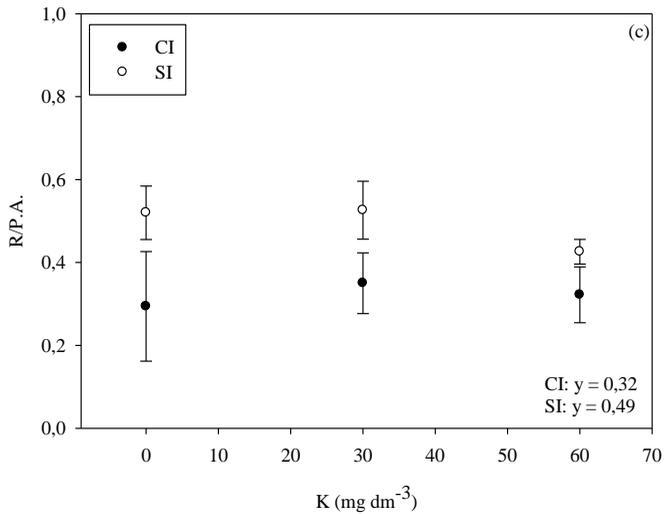
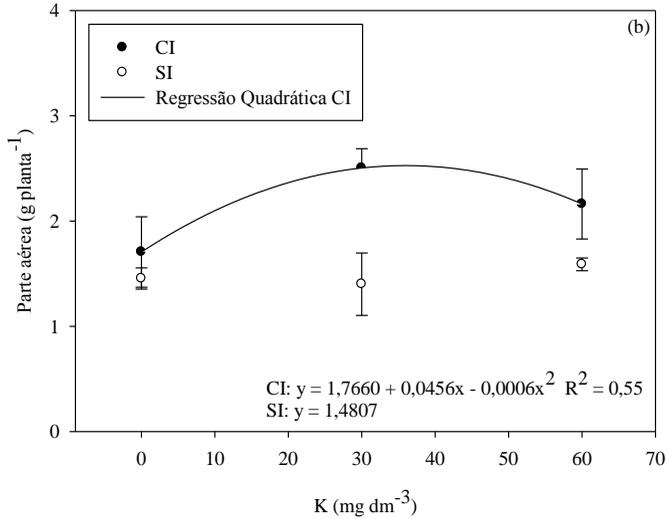
Figura 29- Suplementação de K na biomassa radicular (a), biomassa de parte aérea (b), relação raiz/parte aérea (c) e área foliar (d) em soja no estádio V2.



Continua

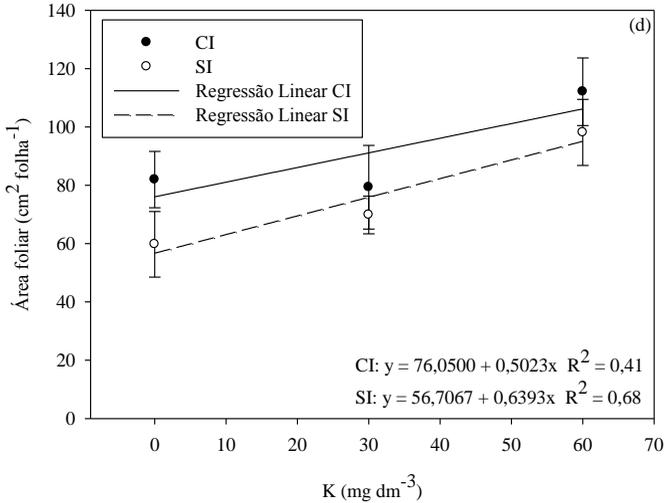
Continuação

Figura 29- Suplementação de K na biomassa radicular (a), biomassa de parte aérea (b), relação raiz/parte aérea (c) e área foliar (d) em soja no estágio V2.



## Conclusão

Figura 29- Suplementação de K na biomassa radicular (a), biomassa de parte aérea (b), relação raiz/parte aérea (c) e área foliar (d) em soja no estágio V2.



Fonte: produção do próprio autor

Barras representam o desvio padrão das médias.

A relação entre a biomassa total de raiz e parte aérea não apresentou ajuste de regressão polinomial (ver Figura 29c). As plantas com baixa disponibilidade hídrica apresentaram maior relação raiz/parte aérea (0,49) em comparação as plantas de soja com alta disponibilidade hídrica (0,32). Com relação à área foliar, o K proporcionou maior taxa de expansão nas plantas submetidas à restrição hídrica ( $0,64 \text{ cm}^2 \text{ mg K dm}^{-3}$ ) em comparação as plantas de soja mantidas irrigadas no mesmo período ( $0,50 \text{ cm}^2 \text{ mg K dm}^{-3}$ ) (ver Figura 29d). Portanto, com base na expansão da área foliar, o K reduziu os efeitos da restrição hídrica.

## 5.5 DISCUSSÃO

A proposta do trabalho foi determinar o efeito da suplementação de K no crescimento radicular e de parte aérea em soja submetida à restrição hídrica no início do período vegetativo. Com esta intenção as plantas de soja foram conduzidas em vasos na casa de vegetação onde a suplementação do K e a imposição da restrição hídrica foram realizadas em ambiente controlado. As situações criadas são totalmente artificiais e não tem a intenção de simular uma condição de restrição hídrica a campo. Entretanto, o crescimento radicular e o padrão de crescimento sob condições de restrição hídrica e K permitem definir modelos válidos também para condições de campo (ASCH et al., 2005).

O crescimento radicular em soja foi afetado diferentemente pelo teor de umidade do solo e K. De modo geral, o crescimento radicular foi maior sob condições ideais de teor de umidade do solo, ilustrando o requerimento da umidade do solo para o crescimento vegetativo da soja. Entretanto, no perfil de 20-40 cm do solo observou-se que na ausência de K a biomassa radicular ( $\text{g planta}^{-1}$ ) e a densidade do comprimento de raiz ( $\text{cm cm}^{-3}$ ) foram superiores nas plantas sob condição de restrição hídrica. Este resultado também foi observado na biomassa de raiz no perfil de 0-80 cm. Tais resultados mostraram o potencial das plantas de soja no início do período vegetativo de, em condições de restrição hídrica, promover o crescimento radicular. Isto ocorre devido ao maior crescimento radicular para extrair a água disponível do solo, indicando a precedência sobre o crescimento da parte aérea para superar a restrição hídrica. O crescimento da raiz foi mais extensivo em condições de baixo teor de umidade do solo (SANGAKKARA et al., 2000). Esta resposta da planta ao baixo teor de umidade do solo exibe a plasticidade da raiz a partição de matéria seca entre as estruturas da planta, favorecendo o acúmulo de biomassa radicular. Outros autores encontraram maior

crescimento radicular em condições de restrição hídrica (SANGAKKARA et al., 1996; ASCH et al., 2005). De acordo com Fernández et al. (2011), a baixa disponibilidade hídrica é mais efetiva na proliferação radicular de soja no estágio V5 do que a restrição por K.

O K não promoveu o maior acúmulo de biomassa radicular nas plantas sob restrição hídrica. No entanto, as plantas sob condições ideais de disponibilidade hídrica apresentaram incrementos na matéria seca radicular com a suplementação de K nos perfis de 0-20 e 20-40 cm. O K aumenta o movimento de carbono em direção às raízes pelo floema (SANGAKKARA et al., 2001), além de aumentar a taxa fotossintética em condições de baixa e alta disponibilidade hídrica (SANGAKKARA et al., 2000). O impacto do potássio, na soja no início de desenvolvimento vegetativo, diminuiu com o aumento da dose. Entretanto, os resultados mostram claramente o efeito do K em promover o acúmulo de matéria seca em condições ideais de disponibilidade hídrica.

Em relação ao padrão de crescimento radicular, o K proporcionou melhor distribuição da raiz em subsuperfície nas plantas irrigadas. O K reduziu a proporção no perfil de 0-20 cm e aumentou a proporção de raízes no perfil de 20-40 cm. O K é efetivo em promover o crescimento radicular em diferentes regimes hídricos. Segundo Sangakkara et al. (1996), a suplementação de potássio aumenta o crescimento radicular em diferentes regimes hídricos, porém devido a interação entre o K e o teor de umidade do solo a resposta da raiz é diferenciada em condições de baixa e alta disponibilidade hídrica.

O K foi efetivo no aumento da densidade de comprimento de raiz nas plantas mantidas irrigadas nos perfis de 0-20 e 20-40 cm e nas plantas sem irrigação no perfil de 0-20 cm. O aumento da densidade de comprimento de raiz ilustra um sistema radicular mais extenso, o qual possibilita a maior potencial de absorção de água, principalmente em condições de baixa disponibilidade hídrica. No perfil de 40-60 cm as plantas

em condições de baixa disponibilidade hídrica apresentaram maior densidade de comprimento de raiz (27%) em comparação as plantas mantidas irrigadas. O K foi efetivo em promover o crescimento radicular em diferentes regimes hídricos, no entanto, o impacto do potássio na soja em início de desenvolvimento vegetativo foi reduzido com o aumento da dose. Portanto, o K auxilia no crescimento radicular nas plantas submetidas à restrição hídrica através de um sistema radicular mais extenso no início do desenvolvimento vegetativo, o qual é um importante parâmetro para reduzir a restrição hídrica. Outros trabalhos tem ilustrado o efeito do K no crescimento radicular em diferentes regimes hídricos (SANGAKKARA et al., 1996; 2000; 2001). Entretanto, a disponibilidade de água no solo é crítico para maximizar os benefícios do K (FERNÁNDEZ et al., 2011).

O K, no geral, promoveu maior crescimento radicular em termos de acúmulo de matéria seca e densidade de comprimento de raiz nas plantas impostas ao maior teor de umidade no solo. Isto ilustra a importância da adequada disponibilidade hídrica para o crescimento radicular e absorção de K pela soja. Em adição ao teor de água no solo, a concentração de K no solo, também foi fator preponderante para a absorção do nutriente no solo, pois a difusão governa o contato entre K e raiz. A difusão é o principal mecanismo de transporte de K no solo (ROSOLEM et al., 2003). Baixo teor de umidade no solo reduz a mobilidade do potássio por difusão no solo (KUCHENBUCH et al., 1986). Em condições de baixo teor de umidade no solo a proximidade do K a superfície radicular é importante para a sua absorção (FERNÁNDEZ et al., 2011). Isto ilustra a importância da suplementação de K na absorção do nutriente.

Quanto ao peso específico de raiz, o K proporcionou aumento nas raízes nas plantas com baixa disponibilidade hídrica nos perfis 0-20 e 20-40 cm. O aumento do peso específico de raiz possibilita indicar a formação de raízes mais

finas, as quais são mais efetivas na absorção da água, devido a maior relação superfície/peso de raiz. Restrição hídrica aumenta o peso específico de raiz e aumenta a absorção de água (SANGAKKARA et al., 1996). Isto é, provavelmente, parte do mecanismo adaptativo das raízes das plantas para aumentar a absorção de água. O maior comprimento específico de raiz durante os estádios iniciais do desenvolvimento vegetativo da soja submetida à restrição hídrica pode permitir maior expansão foliar uma vez que há maior absorção de água pela planta. Portanto, o maior comprimento específico de raiz pode atenuar os efeitos da restrição hídrica nos estádios iniciais das plantas. Os maiores valores de comprimento específico de raiz indicam maior absorção de água e menor efeito da restrição hídrica sobre a soja. Segundo Sangakkara et al. (1996), K aumenta o número de raízes mais finas em plântulas de feijão, as quais facilitam a absorção de água, especialmente em condições de baixa disponibilidade hídrica, evitando a desidratação dos tecidos.

Quanto à biomassa de parte aérea, o K não promoveu maior taxa de crescimento nas plantas com baixa disponibilidade hídrica no início do período vegetativo. Entretanto, nas plantas mantidas irrigadas houve acúmulo de matéria seca na parte aérea com o aumento da dose de K, sendo que para as maiores doses o ganho foi menor. Porém, quando analisado apenas o efeito da restrição hídrica sem a suplementação de K não foi observado diferença entre a biomassa de parte aérea com e sem irrigação. Portanto, a restrição hídrica não alterou o acúmulo de biomassa da parte aérea na ausência de K. Com relação à área foliar, o K proporcionou aumento linear na taxa de expansão foliar em ambos os regimes hídricos. Em adição, o K foi efetivo na mitigação da restrição hídrica, pois com sua suplementação, as folhas apresentaram maior taxa de expansão quando comparado às plantas com e sem irrigação. O K é essencial para o carregamento dos fotossintatos, abertura dos estômatos e

a manutenção do potencial de membrana e transporte através das membranas dos cloroplastos. (MARSCHNER et al., 1996; TALBOTT; ZEIGER, 1996; CHEN et al., 2012). A retenção do potássio no mesófilo foliar pode conferir tolerância à restrição hídrica em soja (MAK et al., 2014). De acordo com os mesmos autores, o fluxo de potássio apresentou correlação positiva com o conteúdo de água na folha, taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub>, condutância estomática, taxa de transpiração e matéria seca de parte aérea. Elevados suprimentos de K aumentam o teor de K nas folhas as quais podem aumentar o conteúdo intracelular de solutos e manutenção do turgor foliar (PREMACHANDRA et al., 1993).

## 5.6 CONCLUSÃO

A restrição hídrica sem a suplementação de K no início do desenvolvimento vegetativo aumenta a biomassa radicular e a densidade de comprimento de raiz em plantas de soja em subsuperfície. Os resultados do trabalho permitem assegurar que a adequada disponibilidade de K precocemente no desenvolvimento da soja aumenta a tolerância à restrição hídrica. A suplementação de K nos estádios iniciais da soja aumenta a densidade de comprimento de raiz e o peso específico de raiz em condições de baixa disponibilidade hídrica. Em adição o K proporcionou incrementos na biomassa radicular e densidade de comprimento de raiz na soja em condições ideais de disponibilidade hídrica.

## REFERÊNCIAS

ASCH, F. et al. Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice. **Field Crops Research**, v. 93, n. 2–3, p. 223-236, 2005.

Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037842900400259X> >. Acesso em: 24 abr. 2014.

CATUCHI, T. A. et al. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos.

**Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 519-527,

2012. Disponível em: <

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2012000400007&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2012000400007&nrm=iso) >. Acesso em: 18 abr. 2013.

CHEN, Z. H. et al. Systems dynamic modeling of the stomatal guard cell predicts emergent behaviors in transport, signaling, and volume control. **Plant Physiology**, v. 159, n. 3, p. 1235-1251, 2012. Disponível em: <

<http://www.plantphysiol.org/content/159/3/1235.abstract> >.

Acesso em: 18 abr. 2013.

FERNÁNDEZ, F. et al. Soybean shoot and root response to localized water and potassium in a split-pot study. **Plant and Soil**, v. 344, n. 1-2, p. 197-212, 2011. Disponível em: <

<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-011-0740-z> >. Acesso em: 18 abr. 2013.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Special Report 80, Iowa Agricultural Experiment Station, Ames, IA, 11 p.

KASHIWAGI, J. et al. Variability of root length density and its contributions to seed yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under terminal drought stress. **Field Crops Research**, v. 95, n. 2–3, p. 171-181, 2006. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429005000675>>. Acesso em: 27 mai. 2013.

KUCHENBUCH, R.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Potassium availability in relation to soil moisture. **Plant and Soil**, v. 95, n. 2, p. 221-231, 1986. Disponível em: <  
<http://dx.doi.org/10.1007/BF02375074>>. Acesso em: 16 abr. 2013.

KUSAKA, M.; LALUSIN, A. G.; FUJIMURA, T. The maintenance of growth and turgor in pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] Leeke) cultivars with different root structures and osmo-regulation under drought stress. **Plant Science**, v. 168, n. 1, p. 1-14, 2005. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945204002808>>. Acesso em: 16 abr. 2013.

MAK, M. et al. Leaf mesophyll K, H<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> fluxes are involved in drought-induced decrease in photosynthesis and stomatal closure in soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v. 98, n. 1, p. 1-12, 2014. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847213001470>>. Acesso em: 5 jun. 2014.

MARSCHNER, H.; KIRKBY, E. A.; ÇAKMAK, I. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. Special Issue, p. 1255-1263, 1996. Disponível em: < [http://jxb.oxfordjournals.org/content/47/Special\\_Issue/1255.abstract](http://jxb.oxfordjournals.org/content/47/Special_Issue/1255.abstract) >. Acesso em: 5 jun. 2014.

NANDWAL, A. S.; HOODA, A.; DATTA, D. Effect of substrate moisture and potassium on water relations and C, N and K distribution in *Vigna Radiata*. **Biologia Plantarum**, v. 41, n. 1, p. 149-153, 1998. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1001745423649> >. Acesso em: 18 abr. 2013.

PREMACHANDRA, G. S. et al. Water stress and potassium fertilization in field grown maize (*Zea mays* L.): effects on leaf water relations and leaf rolling. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 170, n. 3, p. 195-201, 1993. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-037X.1993.tb01075.x> >. Acesso em: 10 jun. 2014.

ROSOLEM, C. A. et al. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 875-884, 2003. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832003000500012&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000500012&nrm=iso) >. Acesso em: 22 abr. 2013.

SANGAKKARA, U. R.; FREHNER, M.; NÖSBERGER, J. Effect of soil moisture and potassium fertilizer on shoot water potential, photosynthesis and partitioning of carbon in Mungbean and Cowpea. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 185, n. 3, p. 201-207, 2000. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1046/j.1439-037x.2000.00422.x> >. Acesso em: 22 abr. 2013.

SANGAKKARA, U. R.; FREHNER, M.; NÖSBERGER, J. Influence of soil moisture and fertilizer potassium on the vegetative growth of Mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) and Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 186, n. 2, p. 73-81, 2001. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1046/j.1439-037x.2001.00433.x> >. Acesso em: 22 abr. 2013.

SANGAKKARA, U. R.; HARTWIG, U. A.; NÖSBERGER, J. Root and shoot development of *Phaseolus vulgaris* L. (French beans) as affected by soil moisture and fertilizer potassium. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 177, n. 3, p. 145-151, 1996. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-037x.1996.tb00231.x> >. Acesso em: 22 abr. 2013.

SOLTANI, A. et al. Thresholds for chickpea leaf expansion and transpiration response to soil water deficit. **Field Crops Research**, v. 68, n. 3, p. 205-210, 2000. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037842900001222> >. Acesso em: 28 mai. 2013.

TALBOTT, L. D.; ZEIGER, E. Central roles for potassium and sucrose in guard-cell osmoregulation. **Plant Physiology**, v. 111, n. 4, p. 1051-1057, 1996. Disponível em: < <http://www.plantphysiol.org/content/111/4/1051.abstract> >. Acesso em: 12 jun. 2014.

TENNANT, D. A. Test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, n. 3, p. 995-1001, 1975. Disponível em: < <http://www.jstor.org/stable/2258617> >. Acesso em: 26 jun. 2014.

WALKER, D. J.; BLACK, C. R.; MILLER, A. J. The role of cytosolic potassium and ph in the growth of barley roots. **Plant Physiology**, v. 118, n. 3, p. 957-964, 1998. Disponível em: < <http://www.plantphysiol.org/content/118/3/957.abstract> >. Acesso em: 22 abr. 2013.

## 6 CONCLUSÃO GERAL

As alterações nas taxas de crescimento variam de acordo com o estágio de imposição da restrição hídrica e está associado à capacidade de manter o conteúdo relativo de água. A menor sensibilidade do período de floração está relacionada à capacidade de manter o conteúdo relativo de água e do aumento da relação raiz/parte aérea. Além disso, as cultivares de soja de hábito de crescimento indeterminado nos estádios iniciais do desenvolvimento reprodutivo apresentam à capacidade de após o período de restrição hídrica a planta retomar o crescimento e a formação de vagens, pela redução da área foliar específica, incrementos na relação raiz/parte aérea, devido à soja ser responsiva a disponibilidade de água na formação de vagens e enchimento de grãos. Além disso, a restrição de água no período final de formação de vagens e enchimento de grãos reduz a força de dreno, pois reduz o número de vagens e de grãos até o estágio R8.

Os resultados do presente trabalho permitem afirmar que o gesso é efetivo na redução da restrição hídrica no período de enchimento de grãos em solos com baixa concentração de alumínio trocável, pois promove o crescimento radicular em subsuperfície através do incremento nas concentrações de cálcio e redução no alumínio. Os resultados do trabalho permitem assegurar que a adequada disponibilidade de K precocemente no desenvolvimento da soja aumenta a tolerância à restrição hídrica, devido ao aumento da densidade de comprimento de raiz e do peso específico de raiz em condições de baixa disponibilidade hídrica.

## APÊNDICES

APÊNDICE A - Análise conjunta de variância referente à biomassa de parte aérea, de raiz e a relação raiz/parte aérea na cultivar NS 4823 RR.

Fonte	GL	Quadrado médio		
		PA	R	R/PA
E	5	17,431**	1,8342**	1,2343**
RH	1	0,6664**	0,1045	0,4203**
E x RH	5	0,0488	0,1134*	0,2537**
E x RH [R1]	1	0,1872	0,0937	1,5708**
E x RH [R2]	1	0,0682	0,0008	0,0416
E x RH [R3]	1	0,0028	0,0073	0,0682
E x RH [R4]	1	0,1066	0,0322	1E-5
E x RH [R5]	1	0,0793	0,2204*	0,0048
E x RH [R6]	1	0,4662*	0,3174**	0,0032

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

E – estágio fenológico; RH – regime hídrico; PA – parte aérea; R – raiz; R/PA – relação raiz/parte aérea.

APÊNDICE B - Análise conjunta de variância referente ao número de vagens e grãos por planta, peso de 100 grãos e peso de grãos/planta na cultivar NS 4823 RR.

Fonte	GL	Quadrado médio			
		NVP	NGP	P100	PGP
E	7	366,61*	1756,2*	77,561*	71.628**

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

E – estágio fenológico; NVP – número de vagens/planta; NGP – número de grãos/planta; P100 – peso de 100 grãos; PGP – peso de grãos/planta.

APÊNDICE C - Análise conjunta de variância referente às taxas relativas da área foliar, número de folhas, estatura, número de nós e da área foliar específica na cultivar BMX Magna RR.

Fonte	GL	Quadrado médio		
		AF	NF	ET
E	5	0,0403**	0,0012**	3E-4**
RH	1	0,0159**	0,0002	1E-4*
E x RH	5	0,0026**	0,0001	2E-5
E x RH [R1]	1	0,0205**	1E-6	9E-5*
E x RH [R2]	1	0,0020*	0,0002	1E-4 *
E x RH [R3]	1	2E-5	0,0005*	2E-5
E x RH [R4]	1	0,0002	3E-5	4E-6
E x RH [R5]	1	0,0057**	6E-5	2E-6
E x RH [R6]	1	0,0006	9E-34	1E-7

Fonte	GL	Quadrado médio	
		NN	AFE
E	5	9E- 4**	191604**
RH	1	0,0003	201773**
E x RH	5	5E-5	39778**
E x RH [R1]	1	1E-4	194994**
E x RH [R2]	1	3E-5	188612**
E x RH [R3]	1	3E-4	9180,6
E x RH [R4]	1	5E-7	5286,6
E x RH [R5]	1	6E-5	2564,7
E x RH [R6]	1	5E-33	27,520

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

E – estágio fenológico; RH – regime hídrico; AF – área foliar; NF – número de folhas; ET – estatura; NN – número de nós; AFE – área foliar específica.

APÊNDICE D - Análise conjunta de variância referente às taxas relativas da área foliar, número de folhas, estatura, número de nós e da área foliar específica na cultivar BMX Magna RR.

Fonte	GL	Quadrado médio			
		PA	PAV	PAR	R
E	6	5172,4**	1287,2**	1997,3**	166,09**
RH	1	2638,4**	1265,4**	249,42**	116,91**
E x RH	6	90,852*	35,298	33,055**	13,134
R1 x RH	1	207,91*	200,73**	0,0628	2,9620
R2 x RH	1	151,44*	146,09**	0,0463	5,5080
R3 x RH	1	85,546*	60,256*	2,2104	6,6901
R4 x RH	1	407,86**	206,00**	34,144**	6,7650
R5 x RH	1	680,26**	342,40**	57,465**	34,273**
R6 x RH	1	1376,8**	497,29**	219,22**	61,246**
R7 x RH	1	273,70**	24,424	134,60**	28,274

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

E – estágio fenológico; RH – regime hídrico; PA – parte aérea; PAV – parte aérea vegetativa; PAR – parte aérea reprodutiva; R – raiz.

APÊNDICE E - Análise conjunta de variância referente à relação entre a biomassa de raiz/parte aérea, biomassa reprodutiva/parte aérea e biomassa reprodutiva/raiz na cultivar BMX Magna RR.

Fonte	GL	Quadrado médio		
		R/PA	REP/PA	REP/R
E	6	0,3490**	0,4993**	9.6136**
RH	1	0,1594**	0,0104**	0.3053*
E x RH	6	0,0254**	0,0009	0.0495
E x RH [R1]	1	0,0444*	9E-5	0.0003
E x RH [R2]	1	0,2002**	7E-5	0.0007
E x RH [R3]	1	0,0040	0,0042*	0.0341
E x RH [R4]	1	0,0074	0,0083**	0.3315
E x RH [R5]	1	0,0033	0,0005	0.0413
E x RH [R6]	1	0,0027	0,0004	0.1941
E x RH [R7]	1	0,0002	0,0026	0.0001

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

E – estágio fenológico; RH – regime hídrico; R/PA – relação raiz/parte aérea; REP/PA – relação biomassa reprodutiva/parte aérea; REP/R relação biomassa reprodutiva/raiz.

APÊNDICE F - Análise conjunta de variância referente às taxas relativas da área foliar, número de folhas, estatura, número de nós e da área foliar específica na cultivar BMX Potência RR.

Fonte	GL	Quadrado médio		
		AF	NF	EP
E	5	0,0429**	0,0009**	0,0007**
RH	1	0,0415**	0,0014**	0,0006**
E x RH	5	0,0039**	4E-5	0,0001**
E x RH [R1]	1	0,0377**	0,0002	0,0006**
E x RH [R2]	1	0,0056**	0,0004*	0,0003**
E x RH [R3]	1	0,0114**	0,0004*	9E-5*
E x RH [R4]	1	0,0028*	0,0002*	1E-5
E x RH [R5]	1	0,0031*	0,0002	6E-6
E x RH [R6]	1	0,0001	4E-6	1E-32

Fonte	GL	Quadrado médio	
		NN	AFE
E	5	0,0009**	64541**
RH	1	0,0011**	62540**
E x RH	5	6E-5	80942**
E x RH [R1]	1	0,0003*	29258**
E x RH [R2]	1	0,0004*	22326**
E x RH [R3]	1	0,0004*	47531**
E x RH [R4]	1	4E-5	31075*
E x RH [R5]	1	0,0002	7866,2
E x RH [R6]	1	4E-6	7,3704

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

E – estágio fenológico; RH – regime hídrico; AF – área foliar; NF – número de folhas; ET – estatura; NN – número de nós; AFE – área foliar específica.

APÊNDICE G - Análise conjunta de variância referente à biomassa de parte aérea, parte aérea vegetativa e reprodutiva e de raiz na cultivar BMX Potência RR.

Fonte	GL	Quadrado médio			
		PA	PAV	PAR	R
E	6	7617,6**	1560,4**	0,4354**	235,92**
RH	1	1493,2**	608,63**	0,0249**	42,046*
E x RH	6	59,498	47,912	0,0023	15,282
R1 x RH	1	192,00*	183,92*	0,0001	0,0936
R2 x RH	1	86,564	63,204	0,0034	20,829
R3 x RH	1	321,16**	203,52**	0,0071	25,066
R4 x RH	1	226,80*	60,480	0,0134*	1,0092
R5 x RH	1	810,82**	286,65**	0,0079*	1,9440
R6 x RH	1	11,860	17,617	0,0081*	0,2581
R7 x RH	1	200,98*	80,704	0,0005	24,538

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

E – estágio fenológico; RH – regime hídrico; PA – parte aérea; PAV – parte aérea vegetativa; PAR – parte aérea reprodutiva; R – raiz.

APÊNDICE H - Análise conjunta de variância referente à relação entre a biomassa de raiz/parte aérea, biomassa reprodutiva/parte aérea e biomassa reprodutiva/raiz na cultivar BMX Potência RR.

Fonte	GL	Quadrado médio		
		R/PA	REP/PA	REP/R
E	6	0,2518**	0,4354**	7,9951**
RH	1	0,0987**	0,0249**	0,7146**
E x RH	6	0,0453**	0,0023	0,1070
E x RH [R1]	1	0,3201**	0,0001	0,0011
E x RH [R2]	1	0,0012	0,0034	0,0181
E x RH [R3]	1	8E-6	0,0071*	0,0430
E x RH [R4]	1	0,0192	0,0134*	0,3882*
E x RH [R5]	1	0,0300	0,0059	0,7003**
E x RH [R6]	1	7E-32	0,0081*	0,2032
E x RH [R7]	1	0,0002	0,0005	0,0024

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

E – estágio fenológico; RH – regime hídrico; R/PA – relação raiz/parte aérea; REP/PA – relação biomassa reprodutiva/parte aérea; REP/R relação biomassa reprodutiva/raiz.

APÊNDICE I - Análise conjunta de variância referente à concentração de cálcio, enxofre, magnésio e alumínio nos diferentes perfis do solo, considerando a aplicação de gesso.

Fonte	GL	Quadrado médio			
		Cálcio	Enxofre	Magnésio	Alumínio
G	2	112,67**	3,0387**	9,7465**	0,6423*
PS	5	11,301	0,0242	17,923**	0,5212
G x PS	10	12,229	0,0919	4,2675*	0,1212
G x 0-20	2	3,5594	0,1858*	9,6848**	0,0560
G x 20-40	2	8,4100	0,3673**	2,0725	0,1844
G x 40-60	2	28,675*	0,8176**	8,1784*	0,5523
G x 60-80	2	28,705*	0,8341**	1,6136	0,0353
G x 80-100	2	27,816*	0,7047**	2,7261	0,1552
G x 100-120	2	76,651**	0,5889**	6,8086*	0,2651

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

G – gesso; PS – Perfil do solo.

APÊNDICE J - Análise conjunta de variância referente ao crescimento radicular nos diferentes perfis do solo, considerando a aplicação de gesso e regime hídrico.

Fonte	GL	Quadrado médio	
		Peso de raiz	Dist. rel. de raiz
G	2	1,1820**	5E-5
RH	1	1,2376**	0,0012
PS	5	15,0607**	7622,9**
G x RH	2	0,0647	0,0006
G x PS	10	0,4017**	87,196**
RH x PS	5	0,2162**	25,106
G x RH x PS	10	0,1096	26,461
G x PS [CI]	5	9,2266**	1157,7**
G x PS [SI]	5	6,0503**	1158,5**

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

G – gesso; RH – regime hídrico; PS – Perfil do solo; CI – com irrigação; SI – sem irrigação.

APÊNDICE K - Análise conjunta de variância referente ao crescimento radicular e de parte aérea, considerando a aplicação de gesso e regime hídrico.

Fonte	GL	Quadrado médio			
		Peso raiz	Peso PA	R/PA	NF
G	2	7,0752**	183,54**	0,0057*	105,33**
RH	1	7,4165**	85,994**	4E-5	69,444**
G x RH	2	0,4007	6,7834	0,0005	5,444
G x [CI]	2	4,4272**	93,3361**	0,0014	75,055**
G x [SI]	2	3,0487**	96,9901**	0,0048*	35,722**

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

G – gesso; RH – regime hídrico; CI – com irrigação; SI – sem irrigação.

APÊNDICE L - Análise conjunta de variância referente à concentração foliar de cálcio, enxofre, magnésio e nitrogênio, considerando a aplicação de gesso e regime hídrico.

Fonte	GL	Quadrado médio			
		Cálcio	Enxofre	Magnésio	Alumínio
G	2	5611956*	185068	900824**	0,1866
RH	1	8876088*	87640	31416	0,2450
G x RH	2	6948228*	60861	55028	0,0466
G x [CI]	2	11741757**	50928	257532	0,1633
G x [SI]	2	818428	195001	698320**	0,0700

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

G – gesso; RH – regime hídrico; CI – com irrigação; SI – sem irrigação.

APÊNDICE M - Análise conjunta de variância referente à concentração foliar de cálcio, enxofre, magnésio e nitrogênio, considerando a aplicação de gesso e regime hídrico.

Fonte	GL	Quadrado médio	
		Peso raiz	Dist. rel. raiz
K	2	0,0244*	0,0022
RH	1	0,0018	0,0003
PS	3	1,2062**	25637,5**
K x RH	2	0,0329**	0,0001
K x PS	6	0,0088	118,06**
RH x PS	3	0,0027	70,668
K x RH x PS	6	0,0114*	248,63**

Fonte	GL	Quadrado médio	
		Dens. comp. raiz	Peso esp. raiz
K	2	0,2202**	23124440**
RH	1	0,0101	3242790
PS	3	3,3415**	352002581**
K x RH	2	0,0253	2508540
K x PS	6	0,0941**	17483575**
RH x PS	3	0,0318*	4851563
K x RH x PS	6	0,0714**	12821549**

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

K – potássio; RH – regime hídrico; PS – perfil de solo.

APÊNDICE N - Análise conjunta de variância referente ao efeito da restrição hídrica e do K no crescimento radicular e de parte aérea de plantas de soja.

Fonte	GL	Quadrado médio			
		Peso raiz	Peso PA	R/PA	AF
K	2	0,1004	0,3855*	0,0102	3529,8**
RH	1	0,0064	3,1040**	0,2133**	1740,4**
K x RH	2	0,1310*	0,4627**	0,0094	103,43
K x [CI]	2	-	-	0,0039	1655,9**
K x [SI]	2	-	-	0,0157	1977,3**

Fonte: produção do próprio autor.

\*Significativo a  $P < 0,05$  e \*\*significativo a  $P < 0,01$ .

K – potássio; RH – regime hídrico; PS – perfil do solo; CI – com irrigação;

SI – sem irrigação.

## ANEXOS

ANEXO A - Descrição dos estádios fenológicos de soja  
proposto por Fehr e Caviness (1977)

Fase Vegetativa		
Estádio	Subtítulo	Descrição
V <sub>E</sub>	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo;
V <sub>C</sub>	Estádio cotiledonar	Desdobramento das folhas unifoliadas;
V <sub>1</sub>	Primeiro nó	Folhas unifoliadas expandidas;
V <sub>2</sub>	Segundo nó	Folhas trifoliadas desenvolvidas no nó acima das folhas unifoliadas;
V <sub>3</sub>	Terceiro nó	Três nós do caule com folhas desenvolvidas, começando com o nó das folhas unifoliadas;
V <sub>n</sub>	“n” nó	“n” número de nós no caule a partir das folhas unifoliadas;
Fase Reprodutiva		
R <sub>1</sub>	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó sobre a haste principal;
R <sub>2</sub>	Pleno florescimento	Flores abertas em um dos dois nós superiores da haste principal com folha completamente desenvolvida;
R <sub>3</sub>	Início da formação de vagens	Vagem com 5 mm de comprimento em um dos 4 nós superiores da haste principal com folha completamente desenvolvida;
R <sub>4</sub>	Vagem desenvolvida	Vagem com 2 cm de comprimento em um dos 4 nós superiores da haste principal com folha completamente desenvolvida;

Continua

## Conclusão

ANEXO A - Descrição dos estádios fenológicos de soja  
proposto por Fehr e Caviness (1977)

Fase Reprodutiva		
Estádio	Subtítulo	Descrição
R <sub>5</sub>	Início da formação de grãos	Grãos de 3 mm de comprimento em um dos 4 nós superiores da haste principal com folha completamente desenvolvida;
R <sub>6</sub>	Grãos desenvolvidos	Vagem contendo grãos verdes que preenchem totalmente a cavidade da vagem localizada em um dos 4 nós superiores da haste principal com folha completamente desenvolvida;
R <sub>7</sub>	Início da maturidade	Uma vagem normal na haste principal que tenha atingido a cor de vagem madura, normalmente marrom ou palha;
R <sub>8</sub>	Maturidade completa	95% das vagens apresentam a cor de vagem madura.