

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

Guilherme Vestena Cassol

**SISTEMAS DE IMPLANTAÇÃO, IRRIGAÇÃO E ALTERAÇÕES
FISIOLÓGICAS DE PLANTAS DE SOJA SOB CULTIVO EM TERRAS
BAIXAS**

**Santa Maria, RS
2017**

Guilherme Vestena Cassol

**SISTEMAS DE IMPLANTAÇÃO, IRRIGAÇÃO E ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS
DE PLANTAS DE SOJA SOB CULTIVO EM TERRAS BAIXAS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Agronomia.**

Orientador: Prof^o Dr. Enio Marchesan

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Cassol, Guilherme Vestena
Sistemas de implantação, irrigação e alterações fisiológicas de plantas de soja sob cultivo em terras baixas / Guilherme Vestena Cassol.- 2017.
140 p.; 30 cm

Orientador: Enio Marchesan
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, RS, 2017

1. Glycine max L. (Merril) 2. Sistemas de Implantação
3. Estresse Hídrico 4. Fixação Biológica de Nitrogênio 5.
Rotação de Culturas I. Marchesan, Enio II. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Guilherme Vestena Cassol. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

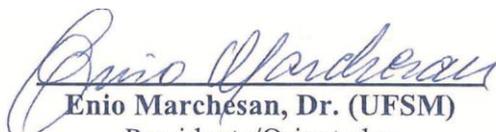
E-mail: guilhermევcassol@hotmail.com

Guilherme Vestena Cassol

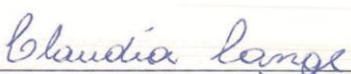
**SISTEMAS DE IMPLANTAÇÃO, IRRIGAÇÃO E ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS
DE PLANTAS DE SOJA SOB CULTIVO EM TERRAS BAIXAS**

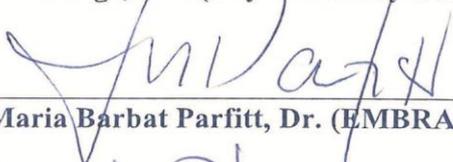
Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Agronomia**.

Aprovado em 22 de fevereiro de 2017:


Enio Marchesan, Dr. (UFSM)
Presidente/Orientador


Carlos Eduardo Schaedler, Dr. (Unipampa)


Cláudia Erna Lange, Dr^a. (Oryza and Soy Consultoria)


José Maria Barbat Parfitt, Dr. (EMBRAPA)


Mirta Teresinha Petry, Dr^a. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho para meus pais Florindo e Ana Cassol que me ensinaram a ter humildade, perseverança e buscar a realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela proteção, amparo e luz durante esta caminhada, pois sem ele nada seria possível.

À minha mãe Ana Cassol, meu pai Florindo Cassol, minhas irmãs Ana Paula e Renata, os quais estiveram sempre presentes e compartilharam deste momento comigo.

À minha esposa Carla pelo companheirismo, auxílio e incentivo durante a realização do trabalho de tese.

Ao meu orientador, professor Enio Marchesan, pelos ensinamentos, amizade, exemplo de profissionalismo e de conduta para a minha formação pessoal e profissional.

Ao pesquisador Joseph Harry Massey e sua esposa Karen Massey pelo auxílio, amizade e acolhimento durante o período nos Estados Unidos.

Aos professores, Luis Antonio de Avila, Fernando Teixeira Nicoloso, Adroaldo Dias Robaina, José Maria Barbat Parfitt e Paulo Ivonir Gubiani pelo auxílio em diversas fases da tese.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade na realização do curso de Doutorado.

Ao CNPq pela concessão de bolsas de estudo e auxílio financeiro para realização da pesquisa.

Aos bolsistas de iniciação científica Vinicius Severo Trivisiol, Isabel Werle e Cristiano Fontoura pelo auxílio incansável na realização dos trabalhos de tese.

A todos os colegas do Grupo de Pesquisas em Arroz Irrigado e Uso Sustentável de Áreas de Várzea (GPAi), agradeço pela amizade, pelas aprendizagens, pela troca de experiências e o convívio durante a realização do curso.

Aos Laboratórios de Fisiologia Vegetal e Irrigação e Drenagem pelo auxílio na realização dos trabalhos de tese.

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

SISTEMAS DE IMPLANTAÇÃO, IRRIGAÇÃO E ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS DE PLANTAS DE SOJA SOB CULTIVO EM TERRAS BAIXAS

AUTOR: Guilherme Vestena Cassol
ORIENTADOR: Enio Marchesan

A soja tem sido a principal cultura utilizada em rotação com o arroz irrigado no Rio Grande do Sul. No entanto, o cultivo da soja em terras baixas constitui-se em uma atividade de alto risco devido aos estresses que geralmente atuam neste ambiente. Estes estresses podem reduzir significativamente o crescimento e desenvolvimento das plantas de soja através da limitação de processos fisiológicos importantes como por exemplo, a fotossíntese e a fixação biológica de nitrogênio. Em vista do exposto, o trabalho de tese teve como objetivo determinar a influência de diferentes sistemas de implantação e de irrigação no crescimento do sistema radicular, nodulação, estresse oxidativo, fotossíntese, armazenamento de água no solo, eficiência do uso de água e rendimento de grãos de soja em terras baixas. Foram realizados dois experimentos em condições de campo e um em casa de vegetação na área Experimental de Várzea da Universidade Federal de Santa Maria, RS, durante os anos agrícolas de 2014/15 e de 2015/16. O experimento 1 consistiu de épocas de dessecação do azevém, as quais foram realizadas entre 20 e 90 dias antes da semeadura da soja em camalhões. O experimento envolvendo sistemas de implantação e irrigação constituiu-se das combinações entre camalhões e sem camalhões com ou sem irrigação suplementar. O experimento 2 foi realizado em casa de vegetação e caracterizou-se pela implementação de 10 dias de déficit hídrico nos estádios fenológicos V6 (seis trifólios expandidos), R2 (florescimento pleno) e R5 (enchimento de grãos). Com base nos principais resultados, observou-se que intervalos de dessecação e semeadura da soja menores de 60 dias ou quantidades de palha de azevém remanescente na superfície do solo superiores a 1000 kg ha⁻¹ aumentam significativamente a retenção de umidade no momento de semeadura. O uso de camalhões para o cultivo da soja aumenta o rendimento de grãos e reduz o uso de água para irrigação comparado ao sistema sem camalhões. A deficiência hídrica durante o período de enchimento de grãos reduz significativamente o rendimento de grãos de soja em terras baixas.

Palavras-chave: *Glycine max* L. (Merril). Sistemas de Implantação. Estresse Hídrico. Fixação Biológica de Nitrogênio. Rotação de Culturas.

ABSTRACT

CROPPING SYSTEMS, IRRIGATION AND PHYSIOLOGICAL CHANGES OF SOYBEAN PLANTS GROWN IN LOWLAND

AUTHOR: Guilherme Vestena Cassol

ADVISOR: Enio Marchesan

Soybean has been the main crop used in rotation with irrigated rice in Rio Grande do Sul. However, soybean cultivation in lowland represents a high-risk activity due to stresses that generally occur in this environment. These stresses may significantly reduce growth and development of soybean plants by limiting important physiological processes such as photosynthesis and biological nitrogen fixation. In view of the above, the thesis work aimed to determine the influence of different cropping and irrigation systems on root growth, nodulation, oxidative stress, photosynthesis, soil water holding capacity, water use efficiency and grain yield of soybean in lowlands. Two experiments were carried out under field conditions and one under greenhouse conditions in the Várzea Experimental area of the Federal University of Santa Maria, RS, during 2014/15 and 2015/16 growing seasons. For the burndown timing of ryegrass experiment, applications were carried out between 20 and 90 days before soybean planting on raised seedbeds. The experiment 1 involving cropping systems and irrigation consisted of combinations between raised seedbeds flat planting with or without the practice of irrigation. The experiment 2, was carried out under greenhouse conditions and was characterized by the implementation of 10 days water deficit during V6 (six expanded trifoliolate), R2 (full flowering) and R5 (grain filling) growth stages. Based on the main results, it was observed that desiccation and sowing intervals of soybean less than 60 days or quantities of ryegrass straw remaining on the soil surface higher than 1000 kg ha⁻¹ significantly increase soil moisture retention at the sowing time. Growing soybeans using raised seedbeds increase crop yield and reduce irrigation water use when compared to flat-planting of soybean in a rice-soybean rotation. Water shortage during the grain filling period significantly reduces grain yield of soybean in lowlands.

Keywords: *Glycine max* L. (Merril). Planting systems. Water Stress. Biological Nitrogen Fixation. Crop Rotation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ARTIGO 1

- Figure 1. Partição do nitrogênio assimilado pela planta de soja durante o estágio R5 (Enchimento de grãos) em função do rendimento de grãos obtido em terras baixas. Santa Maria, RS, 2016. * A partição do nitrogênio foi estimada através da metodologia para determinação da abundância relativa de ureídeos (HERRIDGE et al., 1990).....35
- Figure 2. Relações entre compactação do solo (densidade e percentagem de macroporos), matéria seca de nódulos em V6 (seis trifólios expandidos) e o rendimento de grãos de soja em terras baixas. Santa Maria, RS, 2016. Adaptado de SARTORI et al., 2015.....37
- Figure 3. Relações entre a temperatura média diária do solo na camada de 0 a 5 cm de profundidade e o número de nódulos por planta, matéria seca de nódulos em V6 (seis trifólios expandidos) de soja em terras baixas. Santa Maria, RS, 2016. * A temperatura do solo variou em função da quantidade de palha de azevém na superfície do mesmo durante o período de emergência ao estágio V6.....40

ARTIGO 2

- Figure 1 - Shoot dry matter of ryegrass at the moment of soybean planting (A) and amount of straw remaining above the soil surface (B) as affected by the killing time of ryegrass during the off-season in 2014/15 and 2015/16. Santa Maria, RS, 2016. *p* values were obtained from ANOVA.....69
- Figure 2 - Soil cover (A and C) and weed population (B and D) at moment of soybean planting as affected by the killing time of ryegrass during the off-season in the 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016. *p* values were obtained from ANOVA.....70
- Figure 3 - Soil moisture in the 0-0.05, 0.05-0.10 e 0.10-0.20 m layers at the moment of soybean planting in 2014/15 (A) and 2015/16 (B) as affected by the killing time of ryegrass during the off-season. Santa Maria, RS, 2016. *p* values were obtained from ANOVA. Vertical lines represent the average field capacity. ^{NS} not significant (*p*>0.05). *p* values were obtained from ANOVA.....71

Figure 4 - Soil bulk density (A and B) and penetration resistance (C and D) at moment of soybean planting as affected by the killing time of ryegrass during the 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016. *p* values were obtained from ANOVA. ^{NS} not significant ($p > 0.05$). *p* values were obtained from ANOVA.....72

Figure 5 - Soil temperature (A e B), soil moisture (C e D) in the 0-0.05 m layer and rainfall distribution (E and F) during the emergence and crop maturity in the 2014/15 growing season. Santa Maria, RS, 2015. Field capacity = $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$76

Figure 6 - Soil temperature (A e B), soil water content (C e D) in the 0-0.05 m soil depth layer and rainfall distribution (E and F) during the emergence and crop maturity in the 2015/16 growing season. Santa Maria, RS, 2016. Field capacity = $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$77

ARTIGO 3

Figure 1 - Seasonal rainfall (bars) and irrigation events (bars plus arrows) during the 2014/15 and 2015/16 growing seasons of soybean rotated with rice. Santa Maria, RS, 2016. Grey lines represent duration of main soybean growth stages. Total represents accumulated rainfall between planting and harvest for each season.....96

Figure 2 - Average soil water content in the 0-0.10 and 0.10-0.20 m depth layers for non-irrigated raised beds (A), non-irrigated flat planting (B), furrow irrigated raised beds (C) and flood irrigated flat planting (D) between irrigation events in the 2014/15 growing season. Santa Maria, RS, 2016. The dashed line indicates the critical soil water content (CC) used to determine irrigation timings.....97

Figure 3 - Average soil water content in the 0-0.10 and 0.10-0.20 m depth layers for non-irrigated raised beds (A), non-irrigated flat planting (B), furrow irrigated raised beds (C) and flood irrigated flat planting (D) between irrigation events in the 2015/16 growing season. Santa Maria, RS, 2016. The dashed line indicates the critical soil water content (CC) used to determine irrigation timings. 98

ARTIGO 4

Figura 1. Matéria seca da parte aérea (A), estatura de plantas (B), número de nódulos por planta (C), viabilidade de nódulos (D), massa seca de nódulos (E) e abundância relativa de ureídos (F) em função da deficiência hídrica em três estádios fenológicos das plantas de soja. Santa Maria, RS, 2016.....118

Figura 2 . Taxa de assimilação líquida (A), taxa de transpiração (B), condutância estomática (C) e concentração interna de CO ₂ (D) em folhas de plantas de soja submetidas à deficiência hídrica em três estádios fenológicos da cultura. Santa Maria, RS, 2016.....	120
Figura 3. Peroxidação lipídica (Tbars) (A), atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) (B), conteúdo de carotenoides (C) e atividade da enzima peroxidase (POD) (D) em função dos dias após a emergência na cultura da soja. Santa Maria, RS, 2016.....	122
Figura 4. Rendimento de grãos (A) e massa de 1000 grãos (B) em de plantas de soja submetidas à deficiência hídrica em três estádios fenológicos da cultura. Santa Maria, RS, 2016.....	123

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 2

- Table 1 - Plant Population, emergence index, nodule number, dry weight of nodules, ureides and grain yield of soybean as affected by the killing time of ryegrass during the 2014/15. Santa Maria, RS, 2016. 74
- Table 2 - Plant Population, emergence index, nodule number, dry weight of nodules, ureides and grain yield of soybean as affected by the killing time of ryegrass during the 2015/16. Santa Maria, RS, 2016. 75

ARTIGO 3

- Table 1 - Particle size distribution, field capacity (FC), wilting point (WP), soil bulk density (Ds) and available water content (AWC) in the 0-0.10 to 0.10-0.20 m depth soil layers. Santa Maria, RS, 2016. 91
- Table 2 - Plant population and shoot dry matter at R5 growth stage of soybean as affected by cropping systems and irrigation in the 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016. 95
- Table 3 - Irrigation applied per each irrigation event, total irrigation applied and irrigation water use efficiency (IWUE) for soybean produced using raised seedbed and flat-planting systems during 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016. 99
- Table 4 - Nodule number, viability, dry weight of nodules and relative abundance of N-ureides at R5 growth stage as affected by cropping system and irrigation in the 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016. 100
- Table 5 - Grain yield of soybean rotate with rice as affected by cropping systems and irrigation during 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016. 101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
3	DESENVOLVIMENTO	31
3.1	ARTIGO 1 - Fatores que influenciam a fixação biológica de nitrogênio e a contribuição deste processo para a produção de soja em terras baixas	31
3.2	ARTIGO 2 - Influence of killing timing and straw of ryegrass on soil physical properties and agronomics of raised beded soybean rotated with rice	60
3.3	ARTIGO 3 – Do raised seedbeds and irrigation improve yield of soybean in lowland conditions of southern brazil?	85
3.4	ARTIGO 4 - Alterações fisiológicas em plantas de soja submetidas à deficiência hídrica em terras baixas	109
4	DISCUSSÃO	131
5	CONCLUSÕES	135
	REFERÊNCIAS	137

1 INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul possui 5,4 milhões de hectares de áreas de terras baixas, sendo cerca de 1,1 milhões cultivados anualmente com o arroz irrigado. Nesse estado, o cultivo do arroz concentra-se principalmente na metade Sul em virtude da disponibilidade hídrica e do relevo relativamente plano, condições que viabilizam a irrigação da cultura. Na região, o arroz é tradicionalmente cultivado no sistema arroz-pousio, no qual o cereal é cultivado no verão e a resteva é utilizada como fonte de alimento para pecuária de corte ou simplesmente manejada com as práticas de preparo antecipado da área.

Apesar de ser uma prática bastante consolidada, o sistema de produção arroz-pousio caracteriza-se pelo baixo retorno econômico devido à subutilização das áreas de várzea durante o período de inverno e ao monocultivo do arroz durante o verão. Nesse contexto, a rotação de culturas constitui-se em prática de manejo fundamental para promover a intensificação do uso da terra, a diversificação de culturas e de renda para o produtor rural, além da utilização sustentável das terras baixas do Rio Grande do Sul (RS).

Entre as culturas com potencial para rotação com o arroz irrigado, destaca-se a soja, em função do seu elevado valor econômico, maior tolerância às condições de drenagem natural deficiente, quando comparada a culturas como o milho, e emprego de máquinas e equipamentos similares aos utilizados no cultivo do arroz irrigado. Além desses aspectos, o cultivo da soja oferece à possibilidade do uso de herbicidas não seletivos para controle do arroz-vermelho resistente e outras plantas daninhas de difícil controle na cultura do arroz.

Frente a este cenário, o cultivo da soja apresentou um crescimento expressivo em áreas de rotação com arroz nos últimos anos. No RS, mais de 280 mil hectares de áreas de várzea foram semeados com essa oleaginosa na safra 2015/16 (IRGA, 2016). Entretanto, apesar da expansão de cultivo, as características das áreas de várzea como relevo plano, drenagem deficiente e presença de camada compactada próxima à superfície, predispõem a ocorrência de estresses que podem desencadear restrições severas ao crescimento e desenvolvimento da cultura nesse ambiente.

Desse modo, práticas de manejo como o cultivo em camalhão, a introdução de plantas de cobertura durante o período de inverno e a suplementação hídrica via irrigação podem ser exploradas como alternativas para minimizar estresses, promover a adoção de sistemas conservacionistas e garantir a estabilidade produtiva da soja em áreas de rotação com o arroz. Para tanto, torna-se necessário conduzir estudos em nível local a fim de examinar a execução

e a viabilidade técnica dessas práticas, uma vez que o conhecimento existente na literatura é, em sua grande maioria, proveniente de terras altas ou de outros países.

Dessa forma, as hipóteses deste trabalho são que a utilização do azevém como cultura de cobertura do solo durante o inverno aumenta o armazenamento de água no solo, reduzindo a ocorrência de déficit hídrico durante o cultivo da soja em áreas de arroz, a irrigação proporciona maior desenvolvimento do sistema radicular das plantas de soja, aumenta a nodulação e a fixação biológica de nitrogênio e a produtividade de grãos, o déficit hídrico promove estresse oxidativo nas folhas e nas raízes, limitando a fotossíntese e a fixação biológica de nitrogênio nas plantas de soja.

Assim, o trabalho de tese teve como objetivo geral determinar o efeito de diferentes sistemas de implantação e de irrigação no armazenamento de água no solo, eficiência do uso de água, crescimento do sistema radicular, nodulação, estresse oxidativo, fotossíntese e produtividade de grãos de soja em áreas de rotação com o arroz irrigado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os solos de terras baixas no Rio Grande do Sul (RS) ocupam área de aproximadamente 5,4 milhões de hectares, o que representa cerca de 20% da área desse estado (MARCHEZAN et al., 2002; GOMES et al., 2006). Esses solos estão predominantemente localizados na região das Planícies Costeiras, Externa e Interna, e no Litoral Sul junto as Lagoas dos Patos e Mirim, nas Planícies dos rios da Depressão Central, como os rios dos Sinos, Caí, Taquari e Jacuí, e nas regiões da Campanha e Fronteira-Oeste, ao longo dos rios Ibicuí, Santa Maria, Quaraí e outros menores (PINTO et al., 2004).

Dentre as classes de solo encontradas em terras baixas do RS, destacam-se os Planossolos, os quais estão presentes em 56% das áreas, seguindo-se em ordem decrescente, pelas classes dos Chernossolos (16%), Neossolos (11,6%), Plintossolos (8,3%), Vertissolos (9%) e Gleissolos (7,1%) (PINTO et al., 2004). Como característica comum, os solos de várzea apresentam formação em condição de drenagem deficiente ou hidromórfica, o que lhes confere determinadas peculiaridades nos atributos físicos e químicos em relação aos demais tipos de solo existentes no estado, principalmente os de terras altas.

Do ponto de vista físico, os solos de terras baixas são caracterizados pela baixa porosidade total, com predominância de microporos, camada compactada próxima à superfície, baixa estabilidade de agregados e tendência à formação de encrostamento superficial (GOMES et al., 2006). Essas características fazem com que estes solos apresentem baixa condutividade hidráulica e velocidade de infiltração de água, dificultando o processo de drenagem do perfil (GOMES et al., 2006). Por outro lado, durante períodos de estiagem que tradicionalmente ocorrem no verão, os solos de terras baixas apresentam baixa capacidade de armazenamento de água, limitando a disponibilidade de água para as culturas de sequeiro.

Em relação aos atributos químicos, a ocorrência de ciclos de oxidação-redução afetam diretamente o pH, a disponibilidade de nutrientes, como fósforo, cálcio e magnésio, redução dos óxidos de ferro e manganês e a condutividade elétrica (SOUZA et al., 2010). De modo geral, o processo de redução, que ocorre em função do alagamento do solo, causa um aumento nos valores de pH. Além disso, a solubilização de óxidos de ferro libera íons Fe^{+2} para a solução do solo, aumentando sua concentração. Neste processo, uma parte do fósforo adsorvido também é liberada, o que pode aumentar sua concentração na solução do solo. Embora o Ca, Mg e K não estejam diretamente envolvidos no processo de redução, o maior

teor de Fe^{+2} na solução do solo pode deslocar parte desses cátions que estavam adsorvidos na fase sólida, aumentando sua disponibilidade para as plantas (SILVA & RANNO, 2005).

2.1 O cultivo da soja em terras baixas

Embora o arroz irrigado seja a principal atividade agrícola explorada em áreas de terras baixas do RS, o cultivo da soja tem experimentado crescimento expressivo em áreas de rotação com o cereal nos últimos anos (MARCHESAN, 2013). De acordo com o Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA), no Rio Grande do Sul, a área de soja em ambiente de várzea passou de 80.000 hectares na safra 2010/11 para mais de 270.000 hectares na safra de 2015/16 (IRGA, 2016).

As razões para o incremento do cultivo da oleaginosa nessas áreas devem-se, em um primeiro momento, a alta infestação das áreas de arroz com arroz-vermelho, o qual é um dos principais limitantes para o aumento de produtividade da cultura no estado (AGOSTINETTO et al., 2001; MARCHESAN et al., 2011; SARTORI et al., 2013). Nesse cenário, a rotação com soja viabiliza o controle do arroz-vermelho pela possibilidade da utilização de herbicidas com mecanismos de ação alternativos, como por exemplo, o glifosato (ZEMOLIN et al., 2014).

Além do controle de arroz-vermelho, em rotação com o arroz irrigado, o cultivo da soja pode proporcionar melhorias na adequação e na qualidade do solo, otimização do uso de máquinas e mão-de-obra, quebra de ciclos de pragas e doenças e diversificação de renda da propriedade (VERNETTI JÚNIOR et al., 2009). Associado aos benefícios agronômicos no sistema produtivo, os preços atuais da soja, sua produtividade em áreas de arroz e o preço dos insumos utilizados para produção tem garantido rentabilidade para o produtor rural (MARCHESAN, 2013).

Por outro lado, o cultivo da soja em áreas de terras baixas ainda envolve inúmeros desafios. Entre eles, a necessidade de entender melhor as exigências ao crescimento e desenvolvimento da planta e as limitações impostas pelos mais variados tipos de estresses que atuam nesse ambiente.

2.2 Compactação do solo

Nas terras baixas do RS, é frequente a presença de camada compactada próxima à superfície, principalmente em áreas cultivadas sucessivamente com arroz irrigado (MARCHESAN, 2013). Neste cenário, a compactação resulta da operação de máquinas e

implementos pesados em condições de umidade excessiva do solo (MUNARETO et al., 2010). Essas operações reduzem o volume de solo em decorrência de um arranjo mais denso de suas partículas, o que ocasiona uma diminuição do espaço poroso entre elas (GOMES et al., 2006). Como resultado, a compactação também concorre para reduzir a condutividade hidráulica do solo, aumentando as dificuldades de drenagem do perfil (SATO et al., 2012).

Nesse contexto, a compactação do solo é um dos principais fatores limitantes ao cultivo da soja em áreas de várzea. Em áreas compactadas, a ocorrência de estresses causados tanto pelo excesso como pelo déficit hídrico é potencializada. Dessa forma, diversos processos relacionados ao crescimento e desenvolvimento da planta de soja são diretamente afetados (MARCHESAN, 2013). Entre os principais, destaca-se o crescimento do sistema radicular em profundidade (GOMES et al., 2006), a absorção de água e nutrientes (FANTE et al., 2010), a fotossíntese e a fixação biológica de nitrogênio (OLIVEIRA et al., 2013).

2.3 Fixação biológica de nitrogênio na cultura da soja

O nitrogênio (N) é um dos principais nutrientes para o crescimento e desenvolvimento das plantas (TUBIC et al., 2011). Na soja, o N é componente indispensável para vários processos fisiológicos, além de fazer parte da estrutura de enzimas e proteínas. Por ser elemento essencial, seu balanço afeta a formação de raízes, a fotossíntese, a produção e a translocação de assimilados, a taxa de crescimento entre folhas e raízes e a produtividade de grãos (FAGAN et al., 2008; KING et al., 2014).

A cultura da soja apresenta grande demanda de nutrientes, especialmente o nitrogênio, sendo esse extraído predominantemente através da fixação biológica por bactérias fixadoras (*Bradyrhizobium japonicum* e *Bradyrhizobium elkanii*) (SCHOLLES & VARGAS, 2004). Como exemplo dessa demanda, estima-se que são necessários cerca de 80 kg de N para cada tonelada de grãos de soja produzida (SFREDO, 2008). Do total de N absorvido pela soja, aproximadamente 57% é fornecido pela fixação biológica (SALVAGIOTTI et al., 2008) e, o restante, suprido pelo solo na forma de NH_4^+ ou de NO_3^- (FAGAN et al., 2007).

Apesar de importante, a fixação biológica de N é um processo complexo que, por sua vez, compreende a adaptação da bactéria à planta e as interações da mesma com o solo, sendo sua eficiência controlada, em parte, por fatores endógenos como sinais químicos e hormonais (SICZEK & LIPIEC, 2011). Além desses fatores, a ocorrência de estresses durante o período de cultivo da soja pode reduzir a eficiência de nodulação e, por consequência, a fixação biológica de nitrogênio.

2.4 Estresses e seus efeitos no crescimento e desenvolvimento de plantas de soja

Os solos de terras baixas apresentam naturalmente uma série de restrições físicas e químicas que podem limitar o desempenho agrônomo e o potencial produtivo da cultura da soja. A seguir, serão descritos os principais tipos de estresse que ocorrem nesse ambiente e seus efeitos em aspectos do crescimento, desenvolvimento e fisiologia da planta de soja.

O excesso hídrico ou alagamento do solo é um fenômeno comum em áreas compactadas ou com deficiência de drenagem natural, como áreas de terras baixas no RS. Nesta situação, há redução das trocas gasosas entre o sistema radicular das plantas e os espaços porosos do solo, uma vez que a taxa de difusão do oxigênio é 10.000 vezes menor no meio aquoso em relação ao solo seco (ARMSTRONG et al., 1994). Dessa forma, a baixa disponibilidade de oxigênio, sob condições de excesso hídrico (hipóxia), restringe a respiração das raízes (LANZA et al., 2013).

Em soja, o estresse por hipóxia reduz em primeira instância a taxa de ATP/ADP, o que indica restrição da fosforilação oxidativa (DENNIS et al., 2000; KUKOBUN, 2014). Concomitantemente, ocorre a inibição do sistema de transporte de íons, o qual é responsável pela criação do potencial hídrico através da endoderme, inviabilizando a absorção de água e nutrientes pelas raízes (SAIRAM et al., 2008). Em detrimento do rendimento energético, a planta de soja altera o metabolismo aeróbio para a via anaeróbica, utilizando a glicólise e a fermentação para produzir substratos alternativos como o etanol e o lactato (FANTE et al., 2010).

Além desses processos, o alagamento do solo afeta significativamente a fixação biológica de nitrogênio (THOMAS & SODEK, 2005; YUN et al., 2008). A deficiência de oxigênio no solo provoca diminuição no conteúdo de leghemoglobina nos nódulos, reduzindo a atividade da enzima nitrato reductase, a qual é fundamental para a fixação do N₂ atmosférico (OLIVEIRA et al., 2013). Como consequência, o nitrogênio que é fixado nos nódulos e convertido para NH₃⁺ deixa de ser transportado para a parte aérea via xilema, limitando a disponibilidade de N para a formação de proteínas e outros compostos essenciais (AMARANTE et al., 2006; FAGAN et al., 2007).

O déficit hídrico é um dos fatores ambientais mais limitantes para a produção de soja no mundo (MASTRODOMENICO et al., 2013). Essa limitação ocorre por que a água está envolvida em praticamente todos os processos bioquímicos e fisiológicos da planta, além de representar cerca de 90% da sua massa fresca (KING et al., 2014). Sob condições de estresse hídrico, as plantas de soja apresentam uma série de mudanças morfológicas, bioquímicas e

fisiológicas que refletem negativamente no seu crescimento e produtividade de grãos (SOUZA et al., 2013). Entre as alterações morfológicas, destacam-se a redução da área foliar e o aceleração da abscisão e senescência das folhas, desencadeada pelo aumento da síntese de etileno (CATUCHI, 2011). Com relação às respostas fisiológicas, o estresse hídrico caracteriza-se, entre outras alterações, pela redução do turgor celular, o qual diminui a condutância estomática e a expansão das células, restringindo a fotossíntese e o crescimento das plantas (RIES et al., 2012).

O déficit hídrico afeta também a fixação biológica de nitrogênio, sendo esse considerado o processo metabólico mais sensível à deficiência de água em plantas de soja (SERRAJ et al., 1999; KING et al., 2014). Em condições de baixa disponibilidade de água no solo, a atividade da enzima nitrato redutase é reduzida em função da desidratação do nódulo e os danos causados no tecido nodular (TINT et al., 2011). Além disso, sob estresse hídrico, ocorre redução no fluxo de fotoassimilados com acúmulo de compostos nitrogenados e ureídios nas folhas, inibindo a retroalimentação do processo de fixação biológica (PURCELL et al., 2004; KING & PURCELL, 2005).

2.5 Alternativas de manejo para a supressão de estresses no cultivo da soja em terras baixas

A adequação das áreas de terras baixas para o cultivo da soja juntamente com a adoção de práticas de manejo que possibilitem a supressão de estresses e, promovam a conservação do solo, são medidas de extrema importância para garantir a estabilidade produtiva da cultura nesse ambiente. Dentre as alternativas de manejo que podem ser exploradas para atingir esse objetivo, destaca-se o cultivo em camalhões, a utilização de plantas de cobertura durante o período de inverno e a adoção da irrigação.

Nas terras baixas do RS, cerca de 200.000 hectares estão sistematizados sem declividade do terreno ou “cota zero” como também se denomina este sistema (OLIVEIRA, 2006). Nessas áreas, o sistema de drenagem superficial com a utilização de drenos internos na lavoura, na maioria das vezes, não é suficiente para retirar o excesso de água das mesmas (SILVA et al., 2008). Nesse contexto, a utilização de camalhões apresenta-se como uma alternativa para melhorar o processo de drenagem das áreas de várzea, pois permite o escoamento de água através dos sulcos formados entre os camalhões (SILVA et al., 2008; RAM et al., 2013). Além da drenagem, a estruturação da lavoura com o sistema de camalhões

permite a irrigação por sulcos da cultura durante períodos de déficit hídrico, evitando perdas de produtividade (JAT et al., 2011).

O sistema de camalhão tem sido reportado na literatura por reduzir também a mortalidade de plântulas durante o período de germinação e emergência, aumentar a eficiência de uso da água e do nitrogênio e a qualidade do solo (ZHANG et al., 2012). Entre os benefícios adicionais, a utilização desse sistema proporciona redução da compactação do solo, aumento da macroporosidade e da capacidade de retenção de água, favorecendo o crescimento e desenvolvimento radicular das plantas (CHOUDHARY et al., 2013). Estudos relatam ainda que o cultivo em microcamalhão reduz a incidência de doenças de solo, como por exemplo, as podridões causadas por fungos do gênero *Phytophthora* (SANOGO & JI, 2013).

De acordo com um levantamento realizado para várias localidades no Rio Grande do Sul, constatou-se que é frequente a presença de déficit hídrico durante o período crítico de desenvolvimento da soja (MATZENAUER et al., 2003). Além disso, existe elevada probabilidade de redução significativa na produtividade de grãos de soja em nove a cada vinte safras agrícolas (MATZENAUER et al., 2003). Dessa forma, a irrigação torna-se prática importante para garantir a estabilidade produtiva dessa cultura em anos com ocorrência de estiagem prolongada.

Nas terras baixas do RS, a irrigação de culturas que antes eram de sequeiro ainda é pouco difundida e praticada, sendo realizada principalmente através do sistema de faixas ou banhos com a inundação intermitente dos quadros ou talhões. Em outras regiões do mundo, como nos Estados Unidos, sistemas alternativos de irrigação têm sido adotados para reduzir o volume de água aplicado na soja e aumentar a uniformidade de distribuição da lâmina na lavoura (HEATHERLY & SPURLOCK, 2000).

Entre os métodos de irrigação por superfície, o sistema de sulcos tem sido o mais utilizado (HEATERLY & SPURLOCK, 2000). A irrigação por sulcos pode proporcionar redução de até 30% no volume de água aplicado quando comparado ao sistema de faixas com inundação intermitente (FAHONG et al., 2004). Além da economia de água, esse sistema apresenta baixo custo inicial e de consumo de energia, facilidade de operação após a implantação e menor interferência da ação do vento (KOECH et al., 2014).

A introdução de plantas de cobertura durante o período de inverno pode proporcionar uma série de benefícios para o sistema produtivo no ambiente de terras baixas. Por exemplo, a adição de resíduos vegetais à superfície do solo diminui o impacto das gotas de chuva,

reduzindo o transporte de sedimentos e a intensidade do processo erosivo (WARD et al., 2012). Além disso, a presença de palhada sobre a superfície do solo minimiza as oscilações de temperatura, proporcionando melhores condições para a atividade biológica do solo e o desenvolvimento das culturas agrícolas (ZHANG et al., 2012).

A ciclagem de nutrientes é outro aspecto importante associado à utilização de plantas de cobertura. O emprego de espécies gramíneas durante o período de inverno, como o azevém, possibilita a ciclagem de nutrientes como o nitrogênio e o potássio devido à absorção elevada desses elementos por essa forrageira (SCHOENFELD, 2011). Além de espécies gramíneas, o uso de espécies leguminosas pode incrementar o teor de N no solo através da fixação biológica de nitrogênio (MENEZES et al., 1994). Ainda, a exploração do perfil do solo por espécies que apresentam sistemas radiculares distintos, pode auxiliar na descompactação do solo e melhorar a distribuição vertical de nutrientes no perfil (ANGHINONI, 2007).

O aumento na capacidade de armazenamento de água no solo é outro benefício importante associado ao uso de plantas de cobertura. Isso ocorre porque o desenvolvimento do sistema radicular das culturas de cobertura auxilia na descompactação e na formação de agregados, facilitando a infiltração de água no perfil do solo (WARD et al., 2012). Além disso, a presença de resíduos na superfície do solo minimiza as perdas de água por evaporação, mantendo a umidade do solo por maior período de tempo (WARD et al., 2012).

Em vista do exposto, o uso sustentável dos solos de várzea depende de um planejamento adequado de sua utilização. Para alcançar a sustentabilidade, é de fundamental importância a identificação de sistemas produtivos que possibilitem a rotação de culturas e a adoção de práticas conservacionistas, a fim de melhorar a qualidade do solo, a rentabilidade do produtor, e reduzir os impactos ambientais ocasionados pela atividade agrícola

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 ARTIGO 1

Fatores que influenciam a fixação biológica de nitrogênio e a contribuição deste processo para a produção de soja em terras baixas

Factors affecting biological nitrogen fixation and BNF contribution to soybean production in lowland areas

Guilherme Vestena Cassol ^{1*}, Enio Marchesan ¹, Gerson Meneghetti Sarzi Sartori ¹, Carla Rejane Zemolin ¹, Vinícius Severo Trivisoli ¹, Isabel Werle ¹

-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA-

Revista Ciência Rural

RESUMO

A produção de soja em terras baixas tem apresentado crescimento expressivo nos últimos 10 anos no estado do Rio Grande do Sul. Contudo, o cultivo da soja em rotação com o arroz caracteriza-se pela ocorrência frequente de estresses que, dependendo da sua intensidade, podem impactar diretamente o processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN) e, conseqüentemente, o rendimento de grãos da cultura. Desse modo, a presente revisão tem como objetivos descrever os principais tipos de estresses que ocorrem em terras baixas e como os mesmos influenciam a dinâmica do processo de fixação biológica de nitrogênio em plantas de soja cultivadas neste ambiente.

Palavras chave: *Glycine max.* (L.), rotação de culturas, estresses abióticos, nitrogênio.

¹ Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: guilhermecassol@hotmail.com*Autor de correspondência.

ABSTRACT

Soybean production in lowland areas has shown significant growth in the last 10 years in Rio Grande do Sul. However, soybean grown in rotation with rice is characterized by the frequent occurrence of stresses that, depending on their intensity, may directly affect the biological nitrogen fixation process (BNF) and, consequently, crop grain yield. Thus, the current review aims to describe the main types of stresses that occur in lowland areas and how they influence the dynamics of biological nitrogen fixation process of soybean plants grown in this environment.

Keywords: *Glycine max.* (L.), crop rotation, abiotic stresses, nitrogen.

1. INTRODUÇÃO

A produção de soja em terras baixas tem sido impulsionada, principalmente, pela necessidade de alternativas que visem o manejo de plantas daninhas de difícil controle, como por exemplo, o arroz vermelho, capim-arroz e as ciperáceas. Estas espécies tem desenvolvido resistência aos herbicidas inibidores da enzima Aceto Lactato Sintase (ALS). Por pertencer à família Fabaceae, a rotação com soja permite que sejam utilizados herbicidas com mecanismos de ação distintos aos empregados no arroz irrigado, facilitando o controle dessas plantas daninhas (ZEMOLIN et al., 2014).

Além disso, a rotação de culturas possibilita adequar o manejo de insetos-praga e patógenos em decorrência da quebra de seus ciclos de desenvolvimento e, melhoria das condições físico-químicas do solo. Essa rotação permite ainda, um aumento na renda do produtor, devido à intensificação de uso das áreas, uma vez que dos três milhões de hectares estruturados para o cultivo de arroz irrigado, apenas um milhão é ocupado anualmente com a cultura do arroz (VERNETTI JÚNIOR et al., 2009).

Por outro lado, cultivar soja em áreas de arroz irrigado constitui-se em uma atividade de alto risco. Os solos de terras baixas são caracterizados pelo seu caráter hidromórfico, oriundo da heterogeneidade do material de origem, proximidade do lençol freático à superfície, presença de uma camada subsuperficial impermeável e relevo plano, características estas que dificultam a drenagem da área. Ainda, parte dessas áreas, em decorrência do preparo do solo para cultivo do arroz irrigado ser realizado em condições de umidade excessiva, apresentam uma camada compactada (MARCHESAN, 2016) que reduz a quantidade de macroporos (VALICHESKI et al., 2012), a porosidade total (DRESCHER et al., 2011), interferindo nas relações solo-ar-água-plantas (SARTORI et al., 2015).

Neste ambiente, as plantas de soja estão constantemente submetidas a estresses, os quais podem afetar negativamente o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular e da planta como um todo. Entre os processos fisiológicos mais sensíveis a ocorrência de estresses, destaca-se a fixação biológica de nitrogênio (BNF), a qual está diretamente correlacionada com o rendimento de grãos da cultura (SALVAGIOTTI et al., 2008). Diante da importância da BNF para a soja, o entendimento da participação deste processo fisiológico na composição do rendimento de grãos bem como dos fatores que o afetam são de suma importância para adequar o manejo e garantir a expressão do potencial produtivo da cultura em terras baixas. Assim, esta revisão tem por objetivo descrever os principais tipos de estresses que ocorrem em terras baixas e como os mesmos influenciam a dinâmica do processo de fixação biológica de nitrogênio em plantas de soja cultivadas neste ambiente.

2. FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO E RENDIMENTO DE GRÃOS DE SOJA EM TERRAS BAIXAS

O rendimento médio de grãos de soja cultivada em terras baixas no Rio Grande do Sul é de 2.200 kg ha⁻¹ e tem se mantido estagnado durante as últimas cinco safras (IRGA, 2016).

No entanto, trabalhos de pesquisa evidenciam que o potencial de rendimento da soja em rotação com o arroz irrigado pode variar de 5.500 a 6.900 kg ha⁻¹ de acordo com as condições edafoclimáticas de cada região de cultivo (ZANON et al., 2016). Portanto, há uma lacuna existente entre o potencial produtivo observado pela pesquisa e os números obtidos em lavouras comerciais.

A fixação biológica de nitrogênio (BNF) é um dos processos fisiológicos de maior importância para a obtenção de altos rendimentos na cultura da soja (PURCELL et al., 2014). Em terras altas, estima-se que a soja necessite de 80 Kg de N para produzir uma tonelada de grãos, sendo a demanda de N suprida em sua maior parte, (65%-85%), pela BNF e o restante, 15 a 35%, fornecidos pela mineralização do material orgânico do solo (HUNGRIA et al., 2000). Na literatura, trabalhos de pesquisa citam a contribuição média da fixação biológica de nitrogênio em aproximadamente 57% para soja cultivada em ambientes de baixo e alto potencial produtivo (SALVAGIOTTI et al., 2008).

No ambiente de terras baixas, diversos tipos de estresses podem atuar concomitantemente e, dependendo de sua frequência e intensidade, reduzir significativamente a eficiência da BNF e o rendimento de grãos de soja. Em contrapartida, em condições de estresse menos severas, se observa o crescimento da participação do processo de BNF na assimilação de nitrogênio pelas plantas de soja para a obtenção de níveis maiores de rendimentos de grãos (Figura 1). Esta análise ressalta que, em termos de suprimento de nitrogênio, a mineralização de N no solo possui capacidade limitada para atender a demanda da planta para rendimentos de grãos mais elevados. Dessa forma, cresce a importância de participação da BNF para aumentar o potencial produtivo da cultura neste ambiente. De acordo com a análise, 67% do nitrogênio assimilado pela planta de soja é proveniente da BNF para produzir cerca 3000 a 3500 kg ha⁻¹. Porém, para se incrementar 1000 kg ha⁻¹ é necessário que a BNF forneça 81% do nitrogênio assimilado pela planta de soja. Tais resultados

evidenciam a importância de maior contribuição da BNF à medida que se almeja níveis de produtividade mais elevados em terras baixas.

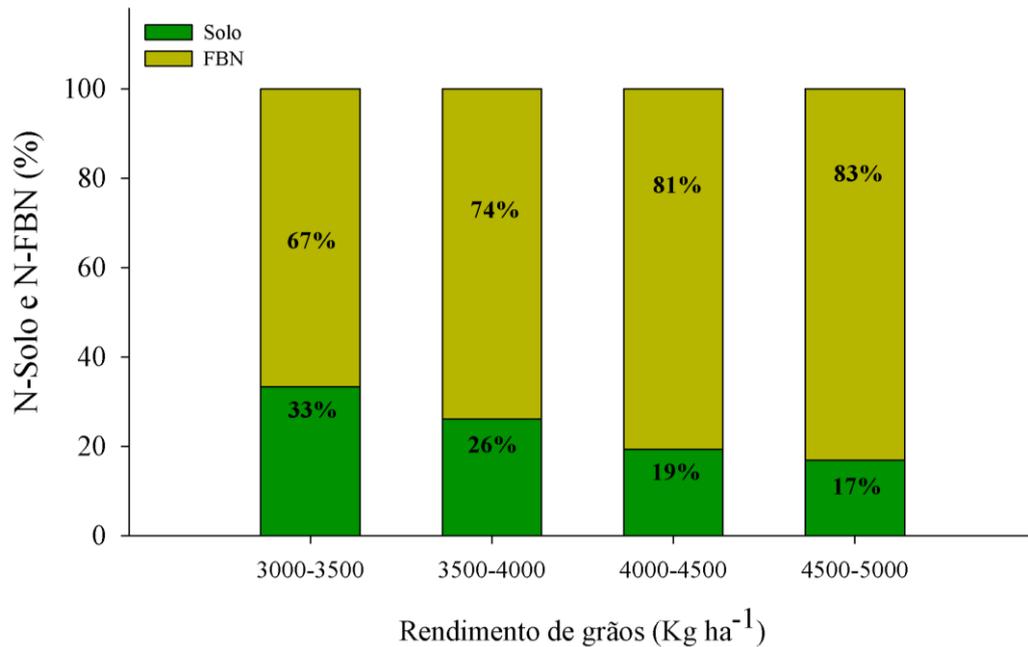


Figura 1. Partição do nitrogênio assimilado pela planta de soja durante o estágio R5 (Enchimento de grãos) em função do rendimento de grãos obtido em terras baixas. Santa Maria, RS, 2016. * A partição do nitrogênio foi estimada através da metodologia para determinação da abundância relativa de ureídeos (HERRIDGE et al., 1990).

3. ESTRESSES E FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM TERRAS BAIXAS

O ambiente de terras baixas é caracterizado pela ocorrência frequente de estresses a cultivos alternativos empregados em rotação com o arroz irrigado. A seguir serão detalhados os principais tipos de estresses que frequentemente ocorrem neste ambiente, bem como seus efeitos na dinâmica da fixação biológica de nitrogênio.

3.1 Compactação do solo

Solos cultivados com arroz irrigado apresentam como uma importante característica o caráter hidromórfico. Além do hidromorfismo, as operações de preparo da área para o cultivo do arroz, quando realizadas com teor de umidade inadequado, tendem a formar uma camada compactada próximo à superfície do solo (MARCHESAN, 2016), causando aumento da densidade do solo, redução da macroporosidade e da porosidade total (MENTGES et al., 2013). Como resultado, ocorre aumento da resistência do solo à penetração (SPERA et al., 2012) e modificando a habilidade das raízes em extrair água e nutrientes (CALONEGO et al., 2011). Aliado a isso, a compactação reduz a taxa de infiltração de água no solo (LIPIEC & HATANO, 2003), a condutividade hidráulica (OZCOBAN et al., 2013), permeabilidade de ar e difusão gasosa (CHEN et al., 2014; KUNCORO et al., 2014).

Dessa forma, com a presença de uma camada compactada, somado à desuniformidade que pode ocorrer nos atributos físico-químicos do solo em função da sistematização das áreas, o cultivo da soja em rotação com o arroz irrigado pode ser prejudicado (SARTORI et al., 2016), sendo a FBN um dos processos fisiológicos mais sensíveis a este tipo de estresse. Em terras baixas, constatou-se estreita relação entre alterações na macroporosidade, massa seca de nódulos em V6 (seis trifólios expandidos) e rendimento de grãos de soja (Figura 2). Redimentos de grãos de soja mais elevados foram observados com valores de macroporosidade superiores a 10% e valores de matéria seca de nódulos acima de 160 g planta⁻¹. A redução na macroporosidade e o aumento da densidade do solo resultaram em redução no número, na massa seca de nódulos por planta e no rendimento de grãos.

Corroborando com estes resultados, em estudo realizado para avaliar os efeitos da compactação, umidade e tipo de solo no crescimento e nodulação de soja e feijão, BUTTERY et al. (1998) observaram que o aumento na densidade aparente do solo provocou uma redução no número de nódulos das culturas. Alterações na distribuição espacial dos nódulos no solo

(LINDEMANN et al., 1982; VOORHEES et al., 1976) e redução na atividade da nitrogenase (SICZEK & LIPIEC, 2011) também foram observadas em condições de solo compactado em estudos semelhantes.

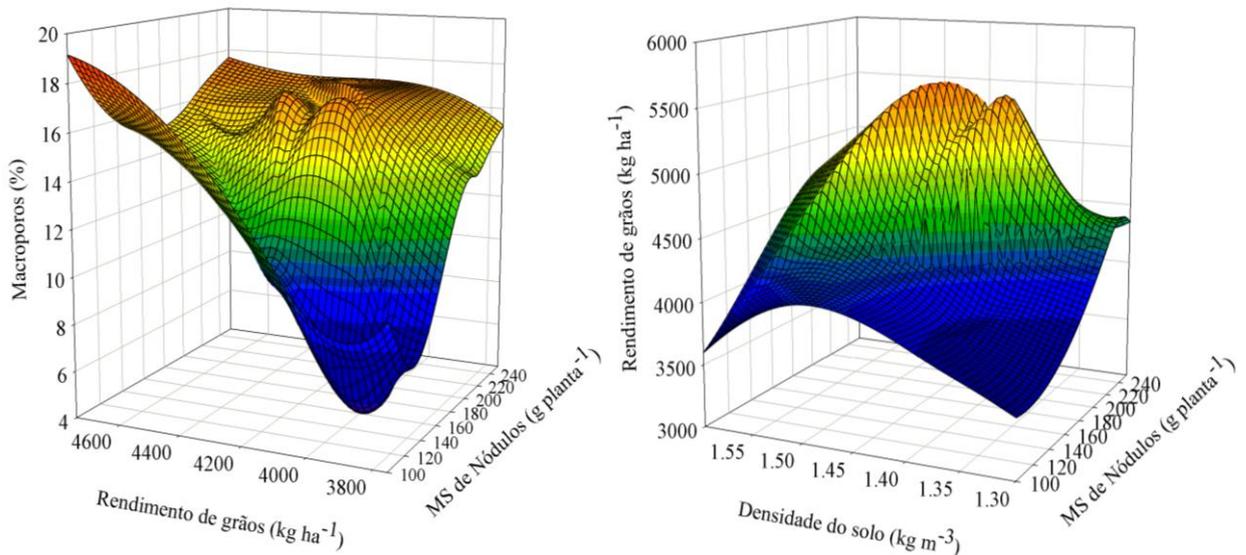


Figura 2. Relações entre compactação do solo (densidade e percentagem de macroporos), matéria seca de nódulos em V6 (seis trifólios expandidos) e o rendimento de grãos de soja em terras baixas. Santa Maria, RS, 2016. Adaptado de SARTORI et al., 2015.

3.2 Acidez do solo (pH)

Os solos cultivados com arroz irrigado no RS são, na sua maioria (84,5%) ácidos, com pH inferior a 5,5 (REIS, 2008). Essa característica é de fundamental importância no processo de nodulação de leguminosas, uma vez que o pH do solo apresenta grande influência na sobrevivência e multiplicação do rizóbio, podendo afetar ambos os envolvidos no processo simbiótico (LEBRAZI & BENBRAHIM, 2014).

As estirpes de rizóbio apresentam um bom crescimento em uma margem de pH levemente ácido (5,5) a levemente alcalino (8,0) (FARISSI et al., 2014), no entanto, o pH ótimo para o crescimento situa-se entre 6,0-7,0 (HUNGRIA & VARGAS, 2000) pois essa

faixa de pH tende a favorecer a exsudação de carbono pelo sistema radicular das plantas, o qual se constitui em substrato para os microrganismos que vivem na rizosfera (MOREIRA & SIQUEIRA, 2002).

Em estudo realizado, BROCKWELL et al. (2005) observaram que quando plantas de acácia foram submetidas a pH do solo entre 5,0 e 5,5 não apresentaram nodulação. Nessas condições de acidez, ocorre diminuição na disponibilidade de cálcio magnésio, potássio, molibdênio e fósforo (FRANCHINI et al., 2001; TORQUATO, 2009; SANDIM, 2012) e uma maior solubilidade de cátions tóxicos, como alumínio e manganês. O Al^{+3} provoca uma redução na atividade das células do rizóbio próximo à etapa de divisão celular, acarretando em queda na população, uma vez que a taxa de mortalidade torna-se maior que a taxa de multiplicação (HUNGRIA & VARGAS, 2000; WATKIN et al., 2003). Associado a isso, as bactérias diazotróficas enfrentam dificuldades em sobreviver e se desenvolver, especialmente pela incapacidade em manter o pH intracelular, a fim de proteger os componentes internos das células (MACCIÓ et al., 2002). As trocas de sinais moleculares entre a planta e as bactérias bem como a aderência ao sistema radicular também são afetadas pelo baixo pH (HUNGRIA & VARGAS, 2000). HUNGRIA & STACEY (1997) relataram ainda, que a liberação dos indutores dos genes de nodulação por raízes de soja e de feijoeiro-comum foi reduzida em pH 4,5 em comparação com pH 5,8.

3.3 Oscilações de Temperatura do solo

A temperatura do solo é um fator crítico para a BNF, uma vez que regula o metabolismo da planta, da bactéria, bem como da associação planta-bactéria (YOUNG et al., 2006), sendo que a faixa de temperatura para o crescimento da maioria das bactérias está situada entre 25° e 30°C (ZHANG et al., 1995).

Baixas temperaturas podem afetar a associação simbiótica por comprometer o crescimento do sistema radicular da planta hospedeira. NAEEM et al. (2008), observaram que quando plantas de *Pisum sativum* foram expostas à temperatura de 5°C, o crescimento dos pelos radiculares e o número de pelos por cm de comprimento de raiz foram reduzidos. Ainda segundo os autores, o crescimento do bacterióide e a liberação das células do rizóbio para as células da planta hospedeira, apesar de formar a zona de infecção dentro do nódulo, também são inibidos nessa faixa de temperatura. A síntese e a secreção de sinais da planta para a bactéria igualmente são afetadas, como observado em plantas de soja, onde a exsudação radicular de genisteína, foi fortemente reduzida em temperatura abaixo de 17,5°C (ZHANG & SMITH, 1994, 1996; ZHANG et al., 1995; PAN & SMITH, 1998). Zhang et al. (2014) observaram uma redução no metabolismo simbiótico e uma redução de mais de 60% na atividade da nitrogenase em nódulos funcionais quando submetidos a temperatura de 4°C por um período de 24 horas.

Da mesma forma que as baixas temperaturas, as altas temperaturas também afetam a FBN por apresentarem efeito inibitório na formação dos pelos radiculares, reduzindo o número de sítios para nodulação (FRINGS, 1976), na aderência das bactérias aos pelos radiculares, na diferenciação do bacterióide, na estrutura do nódulo (ZAHRAM, 1999; ALEXANDRE & OLIVEIRA, 2013), bem como no funcionamento dos nódulos devido à diminuição na síntese de leghemoglobina ou redução da atividade da nitrogenase (KAJIC et al., 2016). De acordo com MICHIELS et al. (1994), a associação simbiótica pode não ser efetiva quando a temperatura for maior que 40°C em decorrência da deleção do plasmídeo simbiótico.

Em terras baixas, a variação na temperatura média do solo na camada de 0 a 5 cm influenciou o número de nódulos e matéria seca de nódulos por planta de soja no estágio V6 (seis folhas trifolioladas) (Figura 3). O aumento de temperatura média do solo na ordem de

1°C diminuiu o número de nódulos de 44 para 26, redução de aproximadamente 40%.

Comportamento semelhante foi observado para a matéria seca de nódulos por planta.

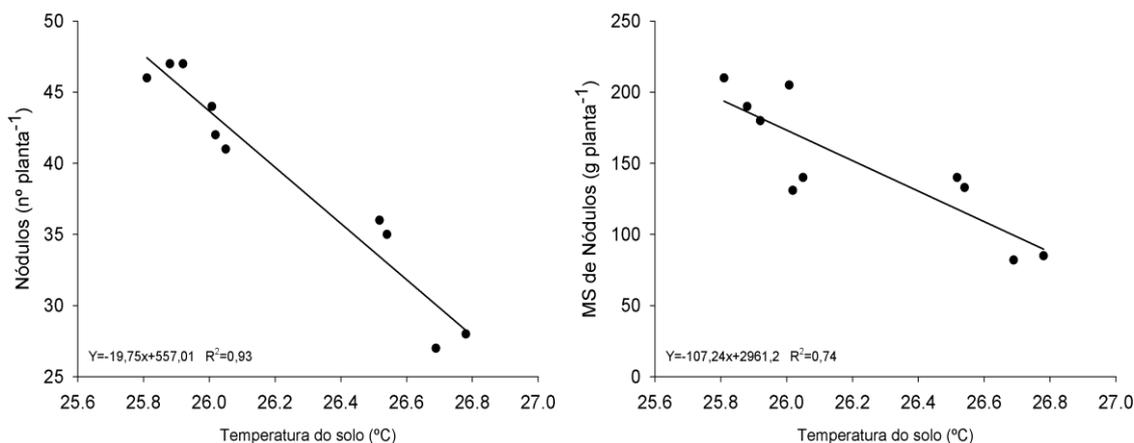


Figura 3. Relações entre a temperatura média diária do solo na camada de 0 a 5 cm de profundidade e o número de nódulos por planta, matéria seca de nódulos em V6 (seis trifólios expandidos) de soja em terras baixas. Santa Maria, RS, 2016. * A temperatura do solo variou em função da quantidade de palha de azevém na superfície do mesmo durante o período de emergência ao estágio V6.

3.4 Excesso Hídrico

No Brasil, estima-se que existam aproximadamente 28 milhões de hectares de solos sujeitos a alagamento (MAGALHÃES et al., 2005) e destes, 5,4 milhões de hectares encontram-se localizados no Estado do Rio Grande do Sul (GAZOLLA-NETO et al., 2012). Solos de terras baixas caracterizam-se pela topografia plana e difícil drenagem, permanecendo saturados em períodos de maior precipitação pluvial. A má drenagem não está apenas relacionada com a topografia plana mas, também, à ocorrência de horizontes subsuperficiais argilosos com baixa condutividade hidráulica, o que dificulta a percolação de água no perfil (SOSBAI, 2014).

Em áreas alagadas ou sujeitas ao alagamento temporário, ocorrem modificações na atmosfera do solo acarretando deficiência de oxigênio (DENNIS et al., 2000), acúmulo de gás carbônico (BORU et al., 2003), metano, etileno, gás sulfídrico, hidrogênio (COSTA, 1996) e restrição da respiração aeróbica (GIBBS & GREENWAY, 2003; FUKAO & BAILEY-SERRES, 2004). A difusão de gases da atmosfera para o solo é fortemente afetada (DENNIS et al., 2000) e as trocas gasosas são reduzidas a níveis extremamente baixos (BLOKHINA et al., 2003; JACKSON & COLMER, 2005) tornando o ambiente radicular hipóxico (FRIES, et al. 2007).

Nessas condições, onde ocorre a diminuição da difusão do oxigênio e das trocas gasosas entre o sistema radicular e o espaço poroso do solo (ZABALZA et al., 2009), o metabolismo energético é afetado, reduzindo a síntese de ATP, o crescimento e desenvolvimento vegetal (HORCHANI et al., 2008), a absorção de água e nutrientes (ROSA, et al, 2015) e a fixação de nitrogênio (THOMAS & SODEK, 2005). Em decorrência da formação de gases tóxicos, pode ocorrer redução da área foliar, perda da turgescência celular e em casos mais severos necrose na parte aérea das plantas (BECKER & ASCH, 2005). Na ausência de oxigênio, segundo KOLB & JOLY (2009), ocorre o desvio do metabolismo aeróbio para a via anaeróbia, o que induz mudanças no metabolismo respiratório do sistema radicular, produzindo substâncias tóxicas como o etanol e o lactato, além de baixo rendimento energético.

Dentre os processos afetados pelo alagamento, a BNF parece ser um dos mais sensíveis (SOUZA et al., 2016) uma vez que a planta tende a reverter sua energia para garantir a sobrevivência da espécie (THOMAS & COSTA, 2010). Sob inundação, a atividade da nitrogenase, enzima-chave na redução do nitrato, é paralisada quase que de forma imediata (AMARANTE & SODEK, 2006; JUSTINO & SODEK, 2013) devido os nódulos precisarem de O₂ para manter a respiração aeróbica e suprir a demanda de ATP, indispensável à atividade

da enzima (LOUREIRO et al., 1998). Com a inibição na nitrogenase, alterações no metabolismo de amino ácidos nos nódulos também são esperadas (SOUZA et al., 2016).

Indicações dessas alterações foram observadas por AMARANTE & SODEK (2006) na exportação de produtos da fixação de N₂ via xilema. Os autores relatam uma redução do teor de glutamina na seiva do xilema quando plantas de soja foram submetidas ao alagamento, sendo esse declínio altamente correlacionado com o teor de ureídeos na seiva xilema. Plantas de soja simbióticas transportam mais de 80% dos compostos nitrogenados na forma de ureídeos (alantoína e ácido alantóico) para a parte aérea (WINKLER et al., 1987), estando portanto, esse transporte, intimamente correlacionado com a FBN (McCLURE et al., 1980).

A sensibilidade das estirpes de bactéria simbióticas ao estresse hídrico também se constitui em um fator importante no processo de BNF. Em estudo realizado para avaliar morfológicamente a eficiência da nodulação de plantas de soja inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium* em condições de alagamento do solo, ZENZEN et al. (2007) relataram que a estirpe SEMIA 5079 de *Bradyrhizobium elkanii* apresentou maior sensibilidade ao alagamento, demonstrado pela diminuição severa do número de nódulos em relação às estirpes SEMIA 587 e SEMIA 5019.

3.5 Déficit hídrico

O déficit hídrico é um dos principais fatores limitantes para a fixação biológica de nitrogênio (GIL-QUINTANA et al., 2013), sendo esta, o primeiro processo a ser prejudicado, antes mesmo da transpiração e da fotossíntese (KING & PURCELL, 2005; SINCLAIR et al., 2007; ARRESE-IGOR et al., 2011). A escassez de água no solo compromete a sobrevivência e a persistência do rizóbio, a colonização e a infecção do sistema radicular (ZAHARAN, 1999; MHADHBI et al., 2011) bem como a síntese da leghemoglobina (HUNGRIA & VARGAS, 2000) e a atividade da nitrogenase (DEL CASTILLO et al., 1994). De acordo com

LADRERA et al. (2007), estudos têm associado a sensibilidade da BNF ao estresse por déficit hídrico à limitação de oxigênio, a escassez de carbono e a regulação pelo metabolismo do nitrogênio.

O papel da limitação do oxigênio na resposta da atividade da nitrogenase à seca tem sido discutido extensivamente na literatura (DEL CASTILLO & LAYZELL, 1995, SERRAJ & SINCLAIR, 1996, MINCHIN, 1997). A redução na atividade da enzima, sob condições de deficiência hídrica, acontece primeiramente, pela diminuição na permeabilidade cortical do nódulo, impondo uma limitação no fornecimento de oxigênio para a zona do bacterióide, restringindo a respiração, resultando em uma diminuição simultânea da atividade da enzima (SPRENT, 1976, DURAND et al., 1987, WALSH, 1995). Além disso, quando a atividade nodular já está drasticamente reduzida, a atividade de nitrogenase pode ser limitada pelo teor de leghemoglobina (SERRAJ et al., 1999), uma hemoproteína que regula a concentração de O₂ no interior do nódulo, evitando seu excesso, uma vez que a nitrogenase é irreversivelmente inativada pelo O₂ (CÂMARA, 2014).

O metabolismo de carbono e nitrogênio atuam na regulação da BNF e são afetados pelo déficit hídrico (LADRERA et al., 2007; ARRES-IGOR et al., 2011) devido a disponibilidade de água ser essencial aos processos de importação e assimilação de fotoassimilados para os nódulos e, exportação e degradação de compostos nitrogenados na parte aérea (CEREZINI, 2013). A principal fonte de carbono transportada a partir da parte aérea para os nódulos é a sacarose, a qual pode ser hidrolisada pelas enzimas sacarose sintase (SS) e invertase alcalina (AI) (LADERA et al., 2007). Uma redução na atividade da SS, resulta em concentração de sacarose e redução na concentração de ácidos orgânicos, principalmente malato (GÁLVEZ et al., 2005), responsável por suprir o bacterióide em energia e esqueleto de carbono. Essa redução na atividade da enzima limita o fluxo de carbono e, conseqüentemente, a respiração do bacterióide (MARINO et al., 2007).

Quando em condição de estresse hídrico, o metabolismo do nitrogênio tende a ser afetado devido a dependência da atividade nodular ao fluxo de água. O fluxo do xilema é essencial para a exportação de compostos nitrogenados, como os ureídeos, dos nódulos para a parte aérea da planta (CEREZINI et al., 2014). O floema, por sua vez, é responsável por fornecer água e fotoassimilados aos nódulos, sustentando a BNF, um processo altamente exigente em termos energéticos (SINCLAIR & VADEZ, 2012). De acordo com CEREZINI et al. (2014), a hipótese de regulação da BNF pelo metabolismo de N pode ser suportada, uma vez que a restrição hídrica em soja altera as concentrações de ureídeos em diversas partes da planta, especialmente nos nódulos, onde podem atuar negativamente sobre a BNF em um efeito de realimentação. O acúmulo de ureídeos em nódulos de plantas de soja submetidas ao estresse hídrico também foi observado por LADRERA et al. (2007), sendo que esse acúmulo resultou em inibição da atividade da nitrogenase e, conseqüentemente, no suprimento de N para a cultura.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fixação biológica de nitrogênio é um dos processos fisiológicos mais importantes para a produção de soja em terras baixas. A mitigação de estresses como o déficit e/ou excesso hídrico, compactação do solo, acidez e oscilações bruscas de temperatura do solo mediante de práticas de manejo é fundamental para a maximização da eficiência deste processo e conseqüentemente do rendimento de grãos de soja neste ambiente. A contribuição da FBN na assimilação de nitrogênio para atender a demanda da soja aumenta à medida que se almeja obter níveis superiores de produtividade da cultura em terras baixas.

5. REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, A.; OLIVEIRA, S. Response to temperature stress in rhizobia. **Critical Reviews in Microbiology**, v. 39, n. 3, p. 219-228, 2013. Disponível em <http://dx.doi.org/10.3109/1040841X.2012.702097>>. Acesso em: 29 dez. 2016. doi: 10.3109/1040841X.2012.702097.
- AMARANTE, L.; SODEK, L. Waterlogging effect on xylem sap glutamine of nodulated soybean. **Biologia Plantarum**, v. 50, n. 3, p. 405-410, 2006. Disponível em <http://link.springer.com/article/10.1007/s10535-006-0057-6>. Acesso em 22 dez. 2016. doi: 10.1007/s10535-006-0057-6.
- ARRESE-IGOR, C. et al. Physiological responses of legume nodules to drought. **Plant Stress**, v. 5, n. 1, p. 24-31, 2011. Disponível em [http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/2011/PS_5SI1/PS_5\(SI1\)24-31o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/2011/PS_5SI1/PS_5(SI1)24-31o.pdf). Acesso em 21 dez. 2016.
- BECKER, M.; ASCH, F. Iron toxicity in rice-conditions and management concepts. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 68, n. 4, p. 558-573, 2005. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/227780657>. Acesso em 20 nov. 2016. doi: 10.1002/jpln.200520504.
- BLOKHINA, O. et al. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. **Annals of Botany**, v. 91, p. 79-194, 2003. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4244988/>. Acesso em 30 nov. 2016. doi: 10.1093/aob/mcf118.
- BORU, G. et al. Responses of soybean to oxygen deficiency and elevated root-zone carbon dioxide concentration. **Annals of Botany**, v. 91, n. 4, p. 447-453, 2003. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4241062/>. Acesso em 25 nov. 2016. doi: 10.1093/aob/mcg040.

BROCKWELL, J. et al. Nitrogen fixation in Acacias: an untapped resource for sustainable plantations, farm forestry and land reclamation. **Australian Centre for International Agricultural Research**, p. 132, 2005. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/227365007>. Acesso em 23 out. 2016.

BUTTERY, B. R. et al. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean. **Canadian Journal of Plant Science** v. 78, n. 4, p. 571–576, 1998. Disponível em <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.4141/P97-132>. Acesso em 18 out. 2016. doi: 10.4141/P97-132.

CALONEGO, J. C. et al. Desenvolvimento de plantas de cobertura em solo compactado. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 2, p. 289-296, 2011. Disponível em <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7632/7235>. Acesso em 21 out. 2016.

CÂMARA, G. M. S. Fixação biológica de nitrogênio em soja. Informações Agrônomicas. **International Plant Nutrition Institute**, n. 147, 9p., 2014. Disponível em [http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/B7FB85D4FAD745CF83257D660046A90D/\\$FILE/Page1-9-147.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/B7FB85D4FAD745CF83257D660046A90D/$FILE/Page1-9-147.pdf). Acesso em 03 nov. 2016.

CEREZINI, P. **Efeito da restrição hídrica na fixação biológica de nitrogênio em soja**. 2013. 57f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Microbiologia, Universidade Estadual de Londrina.

CEREZINI, P. et al. Gas exchanges and biological nitrogen fixation in soybean under water restriction. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 26, p. 4011-4017, 2014. Disponível em http://file.scirp.org/pdf/AJPS_2015010114505160.pdf. Acesso em 19 out. 2016. doi: 10.4236/ajps.2014.526419.

CHEN, G. et al. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil & Tillage Research**, v. 136, p. 61 –69, 2014. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004>. Acesso em 01 set. 2016. doi: 10.1016/j.still.2013.09.004.

CONAB. 2016. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2015/2016 – Décimo segundo levantamento**, 2016, 184 p. Disponível em http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_09_06_09_03_20_boletim_12_sete_mbro.pdf. Acesso em 05 out. 2016.

COSTA, J. A. **Cultura da soja**. Porto Alegre, 1996, 233 p.

DENNIS, E.S. et al. Molecular strategies for improving waterlogging tolerance in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.51, p. 89-97, 2000. Disponível em <http://jxb.oxfordjournals.org/content/51/342/89.full.pdf+html>. Acesso em 12 set. 2016. doi: 10.1093/jexbot/51.342.89.

DEL CASTILLO, L. D. et al. The role of oxygen in the regulation of nitrogenase activity in drought-stressed soybean nodules. **Plant Physiology**, v. 106, n. 3, p. 949-955, 1994. Disponível em <http://www.plantphysiol.org/content/106/3/949.full.pdf+html>. Acesso em 18 out. 2016. doi: 10.1104/pp.106.3.949.

DEL CASTILLO L. D.; LAYZELL, D. B. Drought stress, permeability to O₂ diffusion and the respiratory kinetics of soybean roots nodules. **Plant Physiology**, v. 107, n. 4, p. 1187–1194, 1995. Disponível em <http://www.plantphysiol.org/content/107/4/1187>. Acesso em 17 nov. 2016. doi: 10.1104/pp.107.4.1187.

DRESCHER, M. S. et al. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1713-1722, 2011. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v35n5/a26v35n5.pdf>. Acesso em 25 nov. 2016. doi: 10.1590/s0100-06832011000500026.

DURAND, J. L. et al. Nitrogenase activity, photosynthesis and nodule water potential in soybean plants experiencing water deprivation. **Journal of Experimental Botany**, v. 38, n. 2, p. 311-321, 1987. Disponível em <http://jxb.oxfordjournals.org/content/38/2/311.full.pdf+html>.

Acesso em 23 dez. 2016. doi: 10.1093/jxb/38.2.311.

FARISSI, M. et al. Isolation and screening of rhizobial strains nodulating alfalfa for their tolerance to some environmental stresses. **Pacesetter Journal of Agricultural Science Research**, v. 2, n. 2, p. 09-19, 2014. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/260787791>. Acesso em 13 nov. 2016.

FRANCHINI1, J. C. et al. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 357-360, 2001. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/sa/v58n2/4428.pdf>. Acesso em 23 dez. 2016. doi: 10.1590/S0103-90162001000200020.

FRIES, D. D. et al. Crescimento de plântulas do milho 'saracura' e atividade de α -amilase e invertases associados ao aumento da tolerância ao alagamento exercido pelo cálcio exógeno. **Bragantia**, v. 66, n. 1, p. 1-9, 2007. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/brag/v66n1/01.pdf>. Acesso em 22 dez. 2016. doi: 10.1590/S0006-87052007000100001.

FRINGS, J. F. J. 1976. **The *Rhizobium*-pea symbiosis as affected by high temperatures**. Thesis Medelingen Landbouwoeschool, Wageningen Agricultural University, Wageningen. Disponível em <http://edepot.wur.nl/285822>. Acesso em 21 dez. 2016.

FUKAO, T.; BAILEY-SERRES, J. Plant responses to hypoxia. Is survival a balancing act? **Trends in Plant Science** v. 9, p. 449-456, 2004. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/8374016>. Acesso em 22 dez. 2016. doi: 10.1016/j.tplants.2004.07.005.

GÁLVEZ, L. et al. Evidence for carbon flux shortage and strong carbon/nitrogen interactions in pea nodules at early stages of water stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 419, p. 2551–2561, 2005. Disponível em <http://jxb.oxfordjournals.org/content/56/419/2551.full.pdf+html>. Acesso em 22 dez. 2016. doi:10.1093/jxb/eri249.

GAZOLLA-NETO, A. et al. Níveis de umidade do solo de várzea e seus efeitos sobre a emergência e crescimento inicial de plântulas de soja. **Informativo ABRATES**, v. 22, n. 2, 2012. Disponível em http://www.abrates.org.br/images/Informativo/v22_n2/Artigo_5.pdf. Acesso em 21 dez. 2016.

GIBBS, J.; GREENWAY, H. Review: Mechanisms of anoxia tolerance in plants. I. Growth, survival and anaerobic catabolism. **Functional Plant Biology**. v. 30, p. 1-47, 2003. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1071/PP98095>. Acesso em 22 nov. 2016. doi: 10.1071/PP98095.

GIL-QUINTANA, E. et al. Local inhibition of nitrogen fixation and nodule metabolism in drought-stressed soybean. **Journal of Experimental Botany**, V. 64, N. 8, p. 2171–2182, 2013. Disponível em <http://jxb.oxfordjournals.org/content/64/8/2171.full.pdf+html>. Acesso em 29 ago. 2016. doi:10.1093/jxb/ert074.

HORCHANI, F. et al. Prolonged root hypoxia induces ammonium accumulation and decreases the nutritional quality of tomato fruits. **Journal of Plant Physiology**, v.165, n.13, p.1352-1359, 2008. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/222300677>. Acesso em 30 out. 2016. doi: 10.1016/j.jplph.2007.10.016.

HUNGRIA, M.; STACEY, G. Molecular signals exchanged between host plants and rhizobia: basic aspects and potential application in agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 29, n. 5-6, p. 819-830, 1997. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/223783778>. Acesso em 17 set. 2016. doi: 10.1016/S0038-0717(96)00239-8.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. **Field Crops Research**, n. 65, n. 2-3, p. 151-164, 2000. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/238634727>. Acesso em 17 set. 2016. doi: 10.1016/S0378-4290(99)00084-2.

HUNGRIA, M. et al. Fixação biológica de nitrogênio com a cultura da soja. In: Workshop nitrogênio na sustentabilidade de sistemas intensivos de produção agropecuária, 2000, Dourados, MS. **Anais...Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste**, 2000. p. 51-75.

IRGA. 2016 **Safras – soja em rotação com arroz**. Disponível em http://www.irga.rs.gov.br/upload/20160819164909soja_safra_2015_2016.pdf. Acesso em 15 nov. 2016.

JACKSON, M.B.; COLMER, T.D. Response and adaptation by plants to flooding stress. **Annals of Botany**, v.96, p.501- 505, 2005. Disponível em <http://aob.oxfordjournals.org/content/96/4/501.full.pdf+html>. Acesso em 13 nov. 2016. doi:10.1093/aob/mci205.

JUSTINO, G. C., SODEK, L. Recovery of nitrogen fixation after short- term flooding of the nodulated root system of soybean. **Journal of Plant Physiology**, v.170, n. 3, p. 235–241, 2013. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161712004804>. Acesso em 14 nov. 2016. doi: 10.1016/j.jplph.2012.10.006.

KAJIC, S. et al. Environmental stress response and adaptation mechanisms in rhizobia. **Agriculturae Conspectus Scientificus**, v. 8, n. 1, p.15-19, 2016. Disponível em <http://hrcak.srce.hr/168427?lang=en>. Acesso em 29 dez. 2016.

KING, C. A.; PURCELL, L. C. Inhibition of N₂ fixation in soybean is associated with evaluated ureides and amino acids. **Plant Physiology**, v. 137, n. 4, p. 1389-1396, 2005.

Disponível em <http://www.plantphysiol.org/content/137/4/1389.full.pdf+html>. Acesso em 28 dez. 2016. doi: 10.1104/pp.104.056317.

KOLB, R.M.; JOLY, C.A. Flooding tolerance of *Tabebuia cassinoides*: Metabolic, morphological and growth responses. **Flora**, v. 204, n. 7, p. 528-535, 2009. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/240511533>. Acesso em 27 dez. 2016. doi: 10.1016/j.flora.2008.07.004.

KUNCORO, P. H. et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. **Soil & Tillage Research**, v. 143, p. 172–179, 2014. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198714000282>. Acesso em 21 nov. 2016. doi: 10.1016/j.still.2014.02.006.

LADRERA, R. et al. Reduced carbon availability to bacteroids and elevated ureides in nodules, but not in shoots, are involved in the nitrogen fixation response to early drought in soybean. **Plant Physiology**, v. 145, n. 2, p. 539–546, 2007. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2048725/>. Acesso em 27 nov. 2016. doi: 10.1104/pp.107.102491.

LEBRAZI, S.; BENBRAHIM, K. F. Environmental stress condition affecting the N₂ fixing *Rhizobium*-legume symbiosis and adaptation mechanisms. **African Journal of Microbiology Research**, v. 8, n. 53, p. 4053-4061, 2014. Disponível em http://www.academicjournals.org/article/article1421860863_Lebrazi%20and%20Fikri%20Benbrahim.pdf. Acesso em 19 set. 2016. doi: 10.5897/AJMR2014.7213.

LINDEMANN, W. C. et al. Soil compaction effects on soybean nodulation, N₂ (C₂H₄) fixation and seed yield. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 2, p. 307–311, 1982. Disponível em <https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/74/2/AJ0740020307?access=0&view=pdf>. Acesso em 13 ago. 2016. doi:10.2134/agronj1982.00021962007400020012x.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effect on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v. 116, n. 1-2, 107–136, 2003. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/223346846>. Acesso em 09 ago. 2016. doi: 10.1016/S0016-7061(03)00097-1.

LOUREIRO, M. F. et al. Nitrogen fixation by legumes in flooded regions. **Oecologia Brasiliensis**, v. 4, n. 1, p. 195-233, 1998. Disponível em <http://www.oecologiaaustralis.org/ojs/index.php/oa/article/viewfile/286/356>. Acesso em 05 set. 2016.

MACCIÓ, D. et al. Acidity and calcium interaction affect the growth of *Bradyrhizobium* sp. and the attachment to peanut roots. **Soil Biology and Biochemistry**, v.34, n.2, p.201-208, 2002. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071701001742>. Acesso em 14 nov. 2016. doi: 10.1016/S0038-0717(01)00174-2.

MAGALHÃES, P. C. et al. Avaliação dos ciclos de seleção da variedade BRS 4154 – Saracura para tolerância ao encharcamento do solo. Embrapa Milho e Sorgo. **Circular Técnica**, 67, 4p. 2005. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/489278/avaliacao-dos-ciclos-de-selecao-da-variedade-de-milho-brs-4154---saracura-para-tolerancia-ao-encharcamento-do-solo>. Acesso em 11 ago. 2016.

MARCHESAN, E. Desenvolvimento de tecnologias para cultivo de soja em terras baixas. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 2, n. 1, p. 4-19, 2016. Disponível em <http://codaf.tupa.unesp.br:8082/index.php/recodaf/article/view/22/33>. Acesso em 23 nov. 2016.

MARINO, D. et al. Nitrogen fixation control under drought stress localized or systemic?. **Plant Physiology**, v. 143, n. 4, p. 1968–1974, 2007. Disponível em <http://www.plantphysiol.org/content/143/4/1968.full.pdf+html>. Acesso em 23 nov. 2016. doi: 10.1104/pp.107.097139.

McCLURE, P. R. et al. Evaluation of the relative ureide content of xylem sap as an indicator of N₂ fixation in soybeans. **Plant Physiology**, v. 66, n. 4, p.720- 725, 1980. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC440710/pdf/plntphys00527-0190.pdf>. Acesso em 23 dez. 2016.

MENTGES, M. I. et al. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.37, n.1, p. 221-231, 2013. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v37n1/v37n1a23.pdf>. Acesso em 13 dez. 2016. doi: 10.1590/S0100-06832013000100023.

MHADHBI, H. et al. A highly osmotolerant rhizobial strain confers a better tolerance of nitrogen fixation and enhances protective activities to nodules of *Phaseolus vulgaris* under drought stress. **African Journal of Biotechnology** v. 10, n. 22, p. 4555-4563, 2011. Disponível em <http://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/94117/83518>. Acesso em 10 out. 2016. doi: 10.5897/AJB10.1991.

MICHIELS, J. et al. Effects of temperature stress on bean nodulating *Rhizobium* strains. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 60, n. 4, p. 1206–1212, 1994. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC201460/pdf/aem00021-0166.pdf>. Acesso em 23 dez. 2016.

MINCHIN, F. R. Regulation of oxygen diffusion in legume nodules. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 29, n. 5–6, p. 881-888, 1997. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071796002040>. Acesso em 13 nov. 2016. doi:10.1016/S0038-0717(96)00204-0.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2002, 625p.

NAEEM, F. et al. *Pisum sativum-rhizobium* interactions under different environmental stresses. **Pakistan Journal of Botany**, v. 40, n. 6, p. 2601-2612, 2008. Disponível em [http://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/40\(6\)/PJB40\(6\)2601.pdf](http://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/40(6)/PJB40(6)2601.pdf). Acesso em 11 nov. 2016.

OZCOBAN, M. S. et al. Hydraulic conductivity and removal rate of compacted clays permeated with landfill leachate. **Desalination and Water Treatment** v. 51, v. 31-33, p. 6148–6157, 2013. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2013.769662>. Acesso em 11 nov. 2016. doi: 10.1080/19443994.2013.769662.

PAN, B.; SMITH, D. L. Genistein and daidzein concentrations and contents in seedling roots of three soybean cultivars grown under three root zone temperatures. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.180, n. 2, p.77–82, 1998. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/229691913>. Acesso em 12 nov. 2016. doi: 10.1111/j.1439-037X.1998.tb00374.x.

REIS, C. E. S. **Caracterização química e disponibilidade de enxofre em solos de várzea do Rio Grande do Sul**. 2008. 86f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas.

ROSA, T. D. et al. Alagamento do solo: efeito no crescimento inicial da aveia branca (*Avena sativa* L.). **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 14, n. 2, p. 127-131, 2015. Disponível em <http://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/10101/8558>. Acesso em 12 nov. 2016. doi: 10.18188/1983-1471/sap.v14n2p127-131.

SANDIM, A. S. **Disponibilidade de fósforo em função da aplicação de calcário e silicatos em solos oxídicos**. 2012. 99f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

SARTORI, G. M. S. et al. Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 50, n. 12, p.1139-1149, 2015. Disponível em

<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/21852/13129>. Acesso em 20 nov. 2016. doi: 10.1590/S0100-204X2015001200003.

SARTORI, G. M. S. et al. Sistemas de preparo do solo e de semeadura no rendimento de grãos de soja em área de várzea. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 492-498, 2016. Disponível em http://www.scielo.br/pdf/cr/2015nahead/1678-4596-cr-0103_8478cr20150676.pdf. Acesso em 20 dez. 2016. doi: 10.1590/0103-8478cr20150676.

SERRAJ, R., SINCLAIR, T. R. Inhibition of nitrogenase activity and nodule oxygen permeability by water deficit. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. 301, p. 1067-1073, 1996. Disponível em <http://jxb.oxfordjournals.org/content/47/8/1067.full.pdf>. Acesso em 20 dez. 2016. doi: 10.1093/jxb/47.8.1067.

SERRAJ, R. et al. Symbiotic N₂ fixation response to drought. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 331, p. 143-155, 1999. Disponível em <http://jxb.oxfordjournals.org/content/50/331/143.full.pdf+html>. Acesso em 13 out. 2016. doi: 10.1093/jxb/50.331.143.

SICZEK, A.; LIPIEC, J. Soybean nodulation and nitrogen fixation in response to soil compaction and surface straw mulching. **Soil & Tillage Research**, v. 114, n. 1, p. 50-56, 2011. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198711000791>. Acesso em 12 nov. 2016. doi: 10.1016/j.still.2011.04.001.

SINCLAIR, T. R. et al. Drought tolerance and yield increase of soybean resulting from improved symbiotic N₂ fixation. **Field Crops Research**, v. 101, n. 1, p. 68-71, 2007. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429006001936>. Acesso em 24 out. 2016. doi: 10.1016/j.fcr.2006.09.010.

SINCLAIR, T. R.; VADEZ, V. The future of grain legumes in cropping systems. **Crop and Pasture Science**, v. 63, n. 6, p. 501-512, 2012. Disponível em <http://www.publish.csiro.au/cp/pdf/CP12128>. Acesso em 25 set. 2016. doi: 10.1071/CP12128.

SOSBAI – Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil/XXX **Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**. Bento Gonçalves, RS. 192p. 2014.

SOUZA, S. C. R. et al. Flooding of the root system in soybean: biochemical and molecular aspects of N metabolism in the nodule during stress and recovery. **Amino Acids**, v. 48, n. 5, p.1285–1295, 2016. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/292342529>. Acesso em 25 set. 2016. doi: 10.1007/s00726-016-2179-2.

SPERA, S.T. et al. Efeito de sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto em alguns atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, n.3, p.388-393, 2012. Disponível em <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119024529003>. Acesso em 05 set. 2016. doi: 10.5039/agraria.v7i3a1227.

SPRENT, J. I. Water defcits and nitrogen-fxing root nodules. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.), **Water Defcits and Plant Growth**. Academic Press, New York, pp. 291-315, 1976.

THOMAS, A. L., COSTA, J. Soja: **Manejo para alta produtividade de grãos**. Porto Alegre: Evangraf, 2010. 248p.

THOMAS, A. L., SODEK, L. Development of the nodulated soybean plant after flooding of the root system with different sources of nitrogen. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 3, p. 291-297, 2005. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/bjpp/v17n3/a03v17n3.pdf>. Acesso em 02 set. 2016. doi: 10.1590/S1677-04202005000300003.

TORQUATO, J. P. P. **Interação de fósforo e molibdênio nas concentrações de nutrientes e na produção de “feijão caupi**. 2009. 102f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal do Ceará.

VALICHESKI, R.R. et al. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n. 09, p.969-977, 2012. Disponível em

<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v16n9/v16n9a07.pdf>. Acesso em 12 set. 2016. doi: 10.1590/S1415-43662012000900007.

VERNETTI JÚNIOR, F. J. et al. Sucessão de culturas em solos de várzea implantadas nos sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 15, n. 1-4, p. 37-42, 2009. Disponível em <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CAST/article/view/1984/1805>. Acesso em 09 dez. 2016.

VOORHEES, W. B. et al. Soybean nodulation as affected by wheel traffic. **Agronomy Journal**, v. 68, n. 6, p. 976-979, 1976. Disponível em <https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/68/6/AJ0680060976>. Acesso em 29 nov. 2016. doi: 10.2134/agronj1976.00021962006800060034x.

WALSH, K. B. Physiology of the legume nodule and its response to stress. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, n. 4-5, p. 637-655, 1995. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038071795986444>. Acesso em 17 set. 2016. doi: 10.1016/0038-0717(95)98644-4.

WATKIN, E. L. J. et al. Physiological responses to acid stress of an acid-soil tolerant and acid-soil sensitive strain of *Rhizobium leguminosarum* biovar trifolii. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 4, p. 621-624, 2003. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071703000129>. Acesso em 23 out. 2016. doi: 10.1016/S0038-0717(03)00012-9.

WINKLER, R. D. et al. Ureide catabolism in soybeans. II. Pathway of catabolism in intact leaf tissue. **Plant Physiology**, v. 83, n. 3, p. 585-591, 1987. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1056409/pdf/plntphys00611-0137.pdf>.

Acesso em 22 nov. 2016. doi: 10.1104/pp.83.3.585.

YOUNG, J. P.W. et al. The genome of *Rhizobium leguminosarum* has recognizable core and accessory components. **Genome Biology**, v. 7, n. 6, R34, 2006. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1557990/>. Acesso em 22 nov. 2016. doi: 10.1186/gb-2006-7-4-r34.

ZABALZA, A. et al. Regulation of respiration and fermentation to control the plant internal oxygen concentration. **Plant Physiology**, v.149, n. 2, p.1087-1098, 2009. Disponível em <http://www.plantphysiol.org/content/149/2/1087.full.pdf+html>. Acesso em 21 out. 2016. doi: 10.1104/pp.108.129288.

ZAHRAN, H.H. *Rhizobium*-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**. v. 63, n. 4, p. 968–989, 1999. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC98982/pdf/mr000968.pdf>. Acesso em 11 ago. 2016.

ZENZEN, I. L. et al. Nodulação em soja inoculada com diferentes estirpes de *Bradyrhizobium* sob alagamento. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, supl. 2, p. 606-608, 2007. Disponível em <http://www.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/view/528/451>. Acesso em 13 ago. 2016.

ZHANG, F.; SMITH, D. L. Effects of low root zone temperatures on the early stages of symbiosis establishment between soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] and *Bradyrhizobium japonicum*. **Journal of Experimental Botany**, v. 45, n. 10, p. 1467–1473, 1994. Disponível em <http://jxb.oxfordjournals.org/content/45/10/1467.full.pdf+html>. Acesso em 11 nov. 2016. doi: 10.1093/jxb/45.10.1467.

ZHANG F. et al. Impact of low root temperatures in soybean [*Glycine max* (L) Merr] on nodulation and nitrogen fixation. **Environmental and Experimental Botany**, v. 35, n. 3, p. 279-285, 1995. Disponível em

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847295000177>. Acesso em 15 nov. 2016. doi: 10.1016/0098-8472(95)00017-7.

ZHANG, F.; SMITH, D. L. Genistein accumulation in soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) root systems under suboptimal root zone temperature. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. 299, p. 785–792, 1996. Disponível em <http://jxb.oxfordjournals.org/content/47/6/785.full.pdf+html>. Acesso em 30 dez. 2016. doi: 10.1093/jxb/47.6.785.

ZHANG, S. et al. Identification of cold-responsive mirnas and their target genes in nitrogen-fixing nodules of soybean. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 15, n. 8, p. 13596-13614, 2014. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4159813/>. Acesso em 30 dez. 2016. doi: 10.3390/ijms150813596.

3.2 ARTIGO 2

INFLUENCE OF KILLING TIMING AND STRAW OF RYEGRASS ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND AGRONOMICS OF RAISED BEDED SOYBEAN ROTATED WITH RICE

Revista Bragantia

Guilherme Vestena Cassol^{a,*}, Enio Marchesan^a, Joseph Harry Massey^b, Vinícius Severo
Trivisiol^a, Isabel Werle^a, Robson Giacomeli^a, Lucas Lopes Coelho^a

^a Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, 1000, 97105900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil.

^b Delta Water Management Research Unit, USDA-ARS, 504 University Loop East, 724010000, Jonesboro, Arkansas, United States.

* Corresponding author at: Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, 1000, 97105900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil.

Abstract – The killing time of ryegrass is an alternative to control the amount of straw at the moment of soybean planting in rotation with rice. However, research involving this practice and its effects on soil properties and soybean development in rice fields are limited for the Rio Grande do Sul State. Thus, this work aimed to determine the influence of killing timing of ryegrass on soil physical properties and field performance of soybean rotated with rice. In order to achieve these objectives, a field experiment was carried out during the 2014/15 and 2015/16 growing seasons in a randomized block design and four replications. The treatments

were composed by the killing time of ryegrass ranging from 90 to 20 days before soybean planting (DAS). Evaluations consisted of shoot dry matter of ryegrass before treatment applications and the amount of straw remaining above the soil surface at the soybean planting. Also, soil bulk density and penetration resistance were determined at the soybean planting. Moreover, plant population, nodulation and soybeans yield were evaluated. Intervals shorter than 60 days between the straw burndown and soybean planting significantly increased the amount of straw remaining above the soil surface and soil water content in the 0-0.05 and 0.05-0.10m layers. On the other hand, soil bulk density, plant population and soybean yield were not affected by the killing timing of ryegrass. These results indicate that ryegrass straw might be benefit for soybean production in rice fields, however, farmers need to pay close attention for not losing the optimal planting window due to higher soil water content.

Keywords: lowland, *Glycine max* (L.), crop rotation, cover crops, conservation systems.

Resumo – A época de dessecação do azevém é uma alternativa para regular a quantidade de palha no momento da semeadura da soja em áreas de rotação com arroz irrigado. Contudo, pesquisas envolvendo essa prática, seus efeitos sobre as propriedades do solo e desenvolvimento da soja em terras baixas são limitadas para o Rio Grande do Sul. Assim, esse trabalho teve como objetivo determinar a influência da época de dessecação do azevém sobre as propriedades físicas do solo e desempenho da soja em rotação com arroz irrigado. Para atingir esses objetivos, um experimento de campo foi conduzido durante as safras 2014/15 e 2015/16 em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos compreenderam épocas de dessecação do azevém variando entre 90 e 20 dias antes da semeadura da soja (DAS). As avaliações consistiram da matéria seca da parte aérea do azevém antes da aplicação dos tratamentos e da quantidade de palha remanescente na

superfície do solo no momento da semeadura da soja. A densidade do solo e resistência à penetração foram determinados por ocasião da semeadura. População de plantas, nodulação e rendimento também foram avaliados. Intervalos inferiores a 60 dias entre a dessecação e a semeadura proporcionaram maior quantidade de palha na superfície do solo bem como a umidade nas camadas de 0-0,05 e 0.05-0.10m. A densidade do solo, população de plantas e rendimento da soja não foram afetados pelas épocas de dessecação. Esses resultados indicam que a palha de azevém pode beneficiar a produção de soja em terras baixas, entretanto, é necessário estar atento para não perder a época de semeadura pela excessiva umidade do solo em função da palhada.

Palavras-chave: terras baixas, *Glycine max* (L.), rotação de culturas, plantas de cobertura, sistemas de conservação.

INTRODUCTION

Over the last ten years, several advances involving the adoption of better management practices and new technologies allowed producers to increase soybean production in rotation with rice in the Rio Grande do Sul State. The raised seedbed system improved initial drainage and allowed farmers to provide water for soybean through furrow irrigation during drought periods (Fiorin et al. 2009; Bruns and Young 2012). Furthermore, tillage practices use to build beds provide breaking of the compacted layer located near to the soil surface, enhancing root system development and reducing the occurrence of water stresses in this production system (Calonego and Rosolem 2010; Zhang et al. 2012).

Despite of these benefits, conventional tillage with little or no cover crops during the off-season has been the main cropping system used in rice-soybean rotation (IRGA 2016). Although it has been widely used, conventional tillage with intensive soil mobilization is

reported for increasing nutrients losses (Marchesan et al. 2001), susceptibility to erosion and sediment transport (Machado et al. 2006), soil compaction (Pedrotti et al. 2001) and organic matter degradation (Rosa et al. 2011) compared to systems with minimal or no-tillage.

The introduction of cover crops during the off-season of the rice-soybean rotation appears to be an alternative in terms of management to reduce soil and nutrients losses and alleviate physical limitations that naturally occur in paddy fields to upland crops. Ryegrass (*Lolium multiflorum* (L.)) is a cover crop that might be potentially used to address this issue. As part of some benefits, this species has wide adaptability to lowlands areas in the Rio Grande do Sul State, provides high quality forage during the winter months and early spring, competition with seasonal weeds and offers natural reseeding (Moraes et al. 2009).

In upland areas, research studies have shown that the use of cover crops during the off season may reduce soil and nutrient losses up to 87% compared to bare soil (Wendt and Burwell 1985; Amado et al. 2002). Other studies showed that cover crops during the winter reduces soil bulk density and penetration resistance on the surface layers providing better growth and development of soybean in the summer season (Acuña and Villamil 2014). In addition to these improvements, the use of cover crops might be useful to maintain the structure and function of raised seedbeds, allowing its use for more than one crop season (Ram et al. 2013).

On the other hand, the amount of ryegrass straw above the soil surface at planting is an important concern that farmers have for cropping soybean under no till systems in rotation with rice. High levels of crop residue may significantly increase soil moisture, reducing the optimum planting window for seeding operations and other cultural practices (Kasper and Singer 2011). Another important question involves the difficulty of establishing suitable seed-soil contact due to high soil moisture (Chen and Weil 2011; Acuña et al. 2014). Further, the immobilization of nitrogen caused by the decomposition of straw may impair the initial

establishment and development of planted crops in sequence to ryegrass (Balbinot JR et al. 2011; Ferreira et al. 2015).

As presented earlier, the killing timing of ryegrass is an alternative to regulate the amount of straw at the moment of soybean planting and allow producers to adopt better crop management practices such as no-till. However, research results involving this practice and its effects on soybean performance in rotation with rice are limited in the literature. Thus, this study aimed to determine the influence of killing timing and the amount of ryegrass straw on soil physical properties and agronomics of soybeans rotated with rice.

MATERIAL AND METHODS

The experiment was conducted in 2014/15 and repeated in 2015/16 growing season at the Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil. Fields used in the study have been historically grown with irrigated rice and were precision leveled in the past. Soybean was recently introduced as part of rotation system with rice. Albaqualf is the predominant soil type present in the area. These soils typically exhibit poor drainage and low water movement in the soil profile, reduced water holding capacity and elevated soil bulk density (Gomes 2006).

Fields used for the experiment were previously grown with soybean in a raised seedbed cropping system during the 2013/14 and 2014/15 crop seasons. In both years, beds were formed at moment of soybean planting by using a specific driller (brand KF, model Hyper Plus 6/5 A) developed to perform planting and bed shaping processes at the same time. Two rows 0.5 m spaced were used on each raised seedbed. Average bed height was 0.10 m and 1 m of furrow spacing.

At the end of the crop season in 2013/14 and 2014/15, soybean fields were harvested under dry soil conditions to maintain bed structure and allow its use in the next season. After

harvesting, ryegrass was broadcast seeded with 30 kg ha⁻¹ of seeds to protect the soil with cover crops during the soybean off-season. Nitrogen was applied twice during the winter with 30 kg ha⁻¹ of urea for each application timing. The first application was performed at the beginning of tillering and the second at the internode elongation, representing approximately 30 and 60 days after crop emergence, respectively.

A randomized block design with four replications was used in the study. Treatments were composed by the killing timing of ryegrass: T1= Burndown on 08/27/2014, 80 days before soybean planting (DAS); T2= Burndown on 09/10/2014, 65 days before soybean planting; T3= Burndown on 09/25/2014, 50 days before soybean planting; T4= Burndown on 10/10/2014, 35 days before soybean planting and T5= Burndown on 25/10/2014, 20 days before soybean planting in 2014/15 season. In 2015/16, treatments were: T1= Burndown on 08/27/2015, 90 days before soybean planting (DAS); T2= Burndown on 09/10/2015, 75 days before soybean planting; T3= Burndown on 09/25/2015, 60 days before soybean planting; T4= Burndown on 10/10/2015, 45 days before soybean planting and T5= Burndown on 25/10/2015, 30 days before soybean planting.

The burndown applications of ryegrass were performed using a backpack sprayer equipped with spray nozzles 110.015 calibrate to delivery 70 L ha⁻¹. A combination of glyphosate and clethodim were applied at 1440 g a.i ha⁻¹ and 20 g ai ha⁻¹, respectively. Plots were 12 m long and 6 m wide.

Soybean was planted on raised seedbeds on November 15, 2014 and November 25, 2015 with a 6 rows driller (brand Massey Ferguson, model MF 307). The determinate soybean variety Nidera 6209 Roundup Ready and 6.0 maturity group was used in the study. Fertilization was performed at the planting with 13 kg ha⁻¹ of nitrogen, 55 kg ha⁻¹ of phosphorus and 87 kg ha⁻¹ of potassium. Other cultural practices followed the research recommendation for soybean production in the Southern Brazil (Embrapa 2014).

All evaluations in the experiment were performed in order to determine the influence of killing timing and the amount of ryegrass straw on some of the soil physical properties and agronomic behavior of soybean rotated with rice. In the ryegrass crop season, shoot dry matter for each killing timing and at the time of soybean planting were quantified to determine the amount of remaining dry matter above soil surface. Both evaluations were performed taken two samples per plot by collecting up the aerial part of ryegrass plants in a 0,25m² area. After collection, samples were taken to the oven with forced air circulation and temperature of 65 ° C to quantify the dry matter.

The percentage of ground cover and presence of weeds in each plot at planting were determined by the analysis of photographs taken in a previously marked area of 2 m². Further, images were transferred to a computer and analyzed with the Siscob® software.

Soil bulk density, water content and penetration resistance were evaluated during the cropping season. For these determinations, small pits were digger and samples with preserved structure collected with metallic rings of 0.06 m diameter and 0.04 m height in three layers: 0-0.05 m, and 0.05-0.10 m 0.10-0.20 m. All determinations were carried out based on the procedures described in the manual and methods of soil analysis (Embrapa 2011). Soil penetration resistance was determined in the 0-0,20 m with a digital penetrometer (brand Falker, PenetroLOG model) and electronic data storage. Both collections of soil and penetration resistance were carried out at the time of soybean planting on 11/15/2014 and 11/25/2015.

Soil water content and temperature in the 0-0,05 m layer were monitored throughout the soybean crop season with sensors (brand Hobo, Ech₂o model) coupled to a data logger (brand Hobo , model U30). At the same time, gravimetric soil moisture in the 0-0.05 m, 0.05-0.10 m and 0.10-0.20 m was determined each 3 weeks of interval. The volume of rainfall was collected with a rain gauge installed in the experimental area.

Number, viability and dry weight of nodules per plant at R5 growth stage, grain yield were also evaluated. For nodule evaluations, a 0.40 m wide and 0.20 m depth soil sample was collected in the field. After collection, roots were manually washed in fresh water and taken to the laboratory. The nodule viability was determined according to methodology proposed by Vieira Neto et al. (2008). After that, nodules were dried in a forced air circulation oven at 65 °C to obtain the dry weight of nodules. Average content of ureides and nitrate in the stems and leaves of soybean plants were quantified following recommended procedures for microbiology studies (Embrapa 1994). Both analyses were performed in duplicate.

Plant population and and uniformity of emergence (IVE) was measured through the demarcation of a meter placed in the second row of planting. At the end of the crop emergence, plant population and the IVE were calculated based on the method proposed by Edmond and Drapala, 1958. Grain yield was determined by harvesting 10 m² of research plots. After harvest, samples were threshed, cleaned and weighed. Grain moisture at harvest was adjusted to 13%.

Data were analyzed for independence, homogeneity and normality and then subjected to analysis of variance ($p \leq 0.05$). Regression analyses were performed to determine the effect of killing timing of ryegrass on the evaluated parameters. Means of significant main effects of were separated by Fischer's Protected LSD test ($p \leq 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

Shoot dry matter production and the amount of remaining straw on the soil surface at the time of soybean planting were influenced by the killing timing of ryegrass (Figure 1). In 2014/15, the maximum accumulation of ryegrass dry matter (MS) was obtained with killing timings between 20 and 50 days before soybean sowing (DAS), being yields higher than 3500 kg ha⁻¹. Consequently, these treatments provided greater amount of remaining straw at the

soybean planting when compared to herbicide applications performed at 65 and 80 DAS. For the 20, 35, and 50 DAS treatments, the average amount of straw on the soil surface was 1780, 1630 and 1306 kg ha⁻¹ against 920 and 502 kg ha⁻¹ for 65 and 80 DAS, respectively. Similar trend was observed for 2015/16. However, dry matter accumulation of ryegrass reached over 4500 kg ha⁻¹ at 30 and 45 days before soybean sowing. Thus, these results suggest that there were an average increase of 21 kg ha⁻¹ in 2014/15 and 52 kg ha⁻¹ in 2015/16 on remaining straw of ryegrass above the soil surface at soybean planting for each day of delay in the interval between burndown and planting operations.

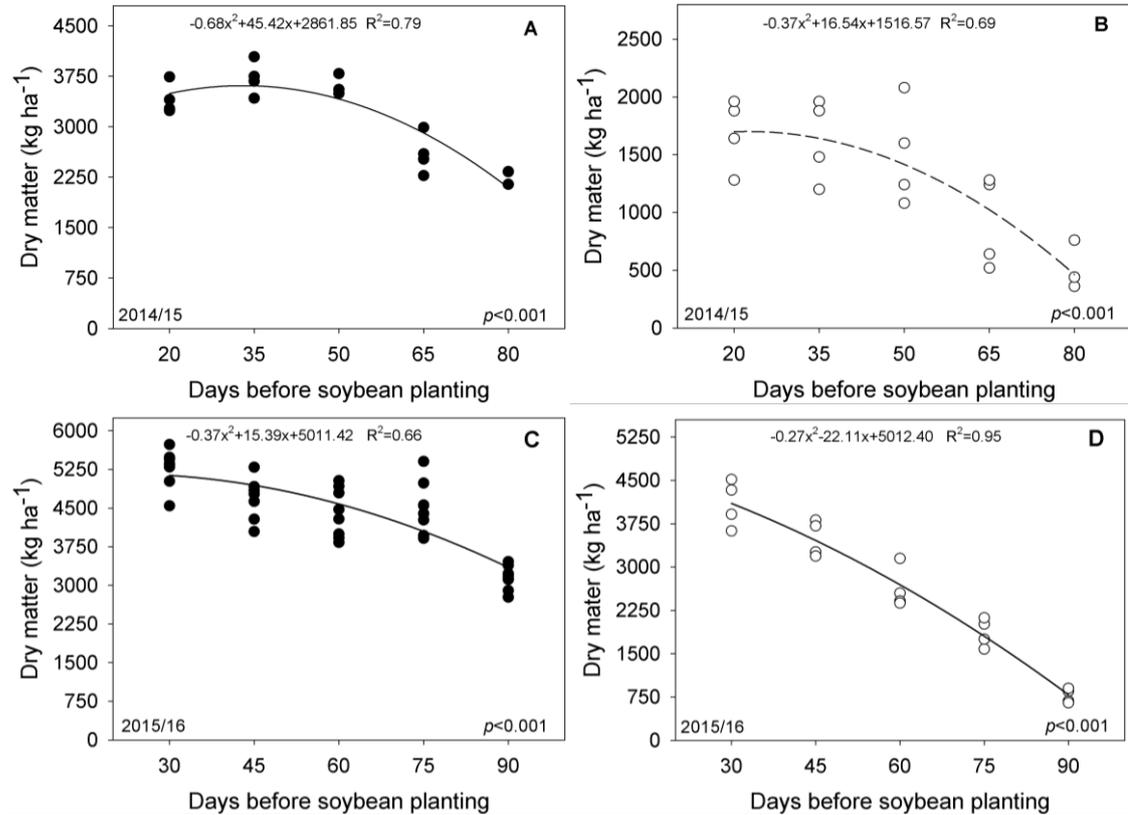


Figure 1. Shoot dry matter of ryegrass at the moment of soybean planting (A) and amount of straw remaining above the soil surface (B) as affected by the killing time of ryegrass during the off-season in 2014/15 and 2015/16. Santa Maria, RS, 2016. p values were obtained from ANOVA.

The increase in the amount of remaining straw on the soil surface provided higher percentage of covered soil at the soybean planting (Figures 2A and 2C). Soil cover indexes greater than 90% were obtained with herbicide applications at 20 and 35 DAS. For the killing timing at 80 DAS less than 60% of the sampled area was covered with ryegrass straw in 2014/15. Herbicide applications at 60 DAS or longer significantly reduced soil cover below 70% in 2015/16. Smaller amounts of straw and percentage of soil covered increased weed populations at the time of soybean planting (Figures 2B e 2D). Similar results were obtained in upland areas with ryegrass where herbicide application at intervals over 30 days before

maize planting reduced soil cover and provided higher biomass of weeds (Balbinot JR et al. 2007).

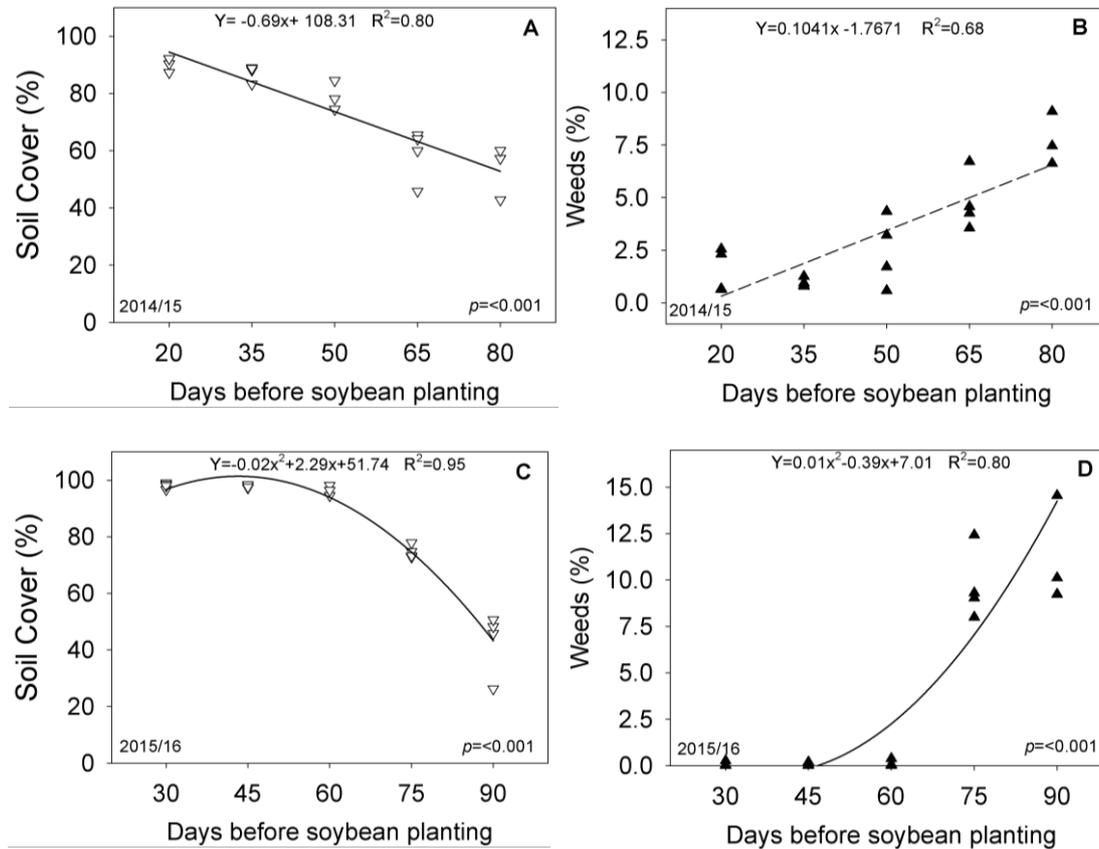


Figure 2. Soil cover (A and C) and weed population (B and D) at moment of soybean planting as affected by the killing time of ryegrass during the off-season in the 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016. p values were obtained from ANOVA.

Soil water content at planting was higher in the 0-0.05 and 0,05-0,10 m layers for the treatments with straw amounts exceeding 1000 kg ha^{-1} in 2014/15 (Figure 3A). Water contents near field capacity were observed for herbicide applications with intervals shorter than 50 DAS. In 2015/16, increased soil water content was observed for 75 DAS or shorter

intervals with above 1800 kg ha^{-1} of remaining straw of ryegrass (Figure 3B). Thus, these results show that the significant increase on soil moisture retention caused by elevated amounts of straw may directly affect the available planting window to perform the soybean seeding processes in rotation with rice. These conditions require advanced planning by farmers involving management of machinery and property, especially during years with frequent rainfall or above the historical average.

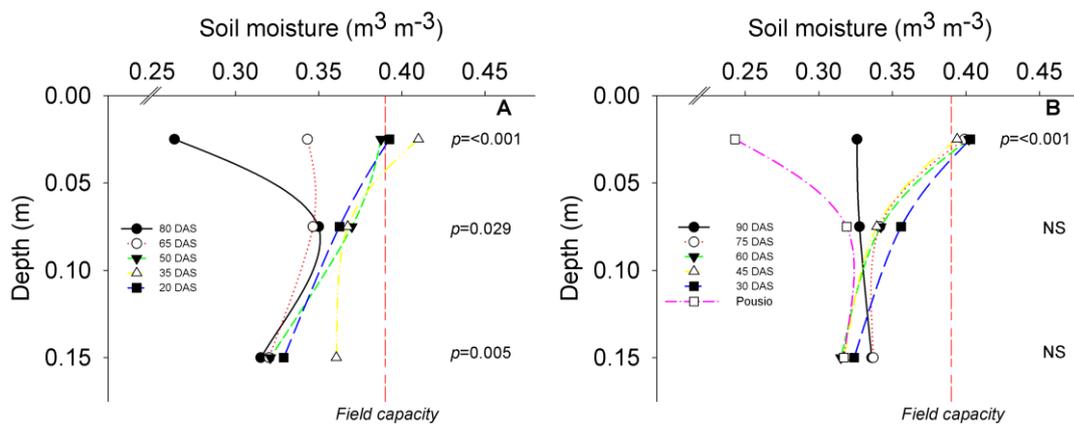


Figure 3. Soil water content in the 0-0.05, 0.05-0.10 e 0.10-0.20 m layers at the moment of soybean planting in 2014/15 (A) and 2015/16 (B) as affected by the killing time of ryegrass during the off-season. Santa Maria, RS, 2016. *p* values were obtained from ANOVA. Vertical lines represent the average field capacity. ^{NS} not significant ($p > 0.05$). *p* values were obtained from ANOVA.

The killing timing of ryegrass did not affect soil bulk density at the soybean planting in 2014/15 (Figure 4A). However, lowered soil bulk density resulted from 75 DAS or shorter intervals between planting and herbicide application (Figure 4B). Also, Penetration resistance decreased for the treatments containing planting closer to the herbicide application in both years of the study. These reductions may be explained by increased amount of remaining

straw on the soil surface and consequently maintenance of soil moisture. Also, root activity exploring deeper soil layers contribute to alleviate soil compaction and reduce penetration resistance (Acuña et al. 2014). Similar research found that soil penetration is highly dependent on the moisture content being it reduced with increased soil moisture (Chen and Weil 2011; Acuña et al. 2014).

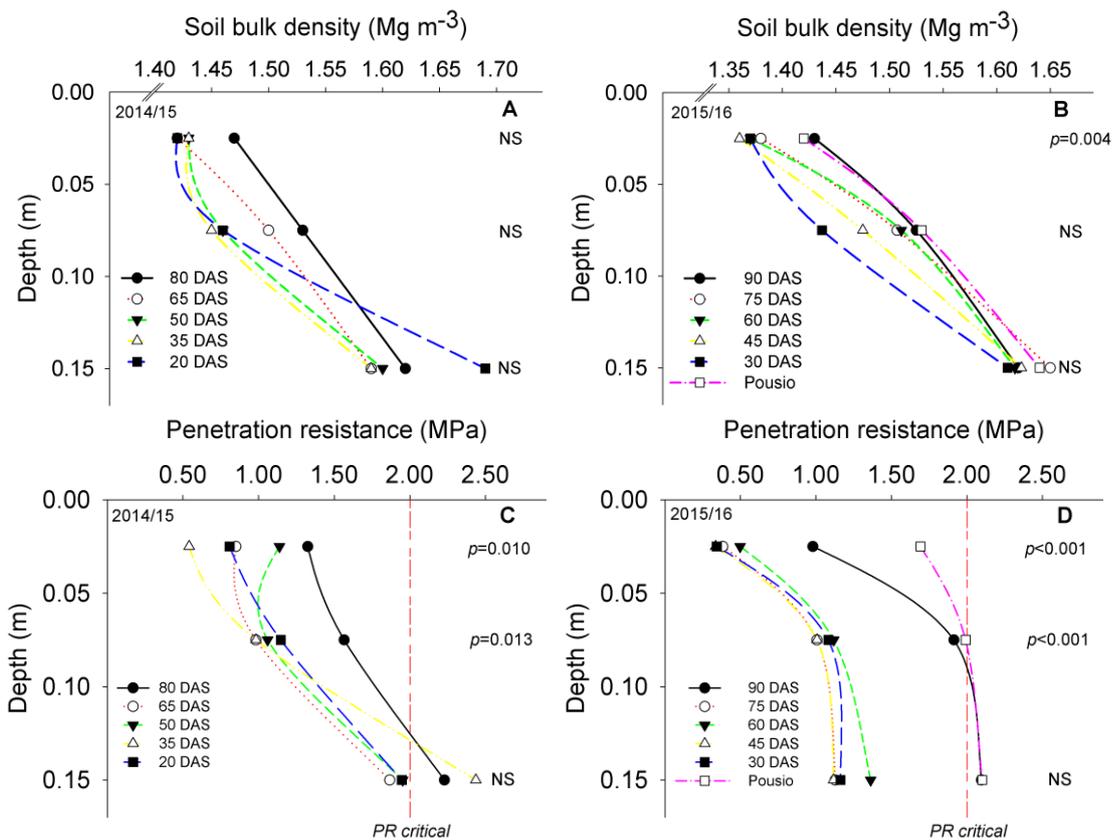


Figure 4. Soil bulk density (A and B) and penetration resistance (C and D) at moment of soybean planting as affected by the killing time of ryegrass during the 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016. *p* values were obtained from ANOVA. ^{NS} not significant (*p*>0.05). *p* values were obtained from ANOVA.

Plant population, emergence index and ureides were not affected by the killing timing and consequently the amount of straw at the soybean planting (Tables 1 and 2). However, the number and dry weight of nodules at V6 and R5 growth stages were directly influenced by the interval between the herbicide application and soybean planting. Treatments with higher amounts of straw above soil surface such as 20 and 35 DAS in 2014/15 and 30 DAS in 2015/16 provided an increase in the number and dry weight of nodules at V6 growth stage. This increase of nodulation may be related to lesser fluctuation in temperature and soil water content during the period involving soybean planting and the evaluation (Figures 5 and 6). Supporting this hypothesis, research reported that high temperatures associated with low soil moisture are the main causes of reduced nodulation process and biological nitrogen fixation, affecting all stages of the symbiosis process and limiting growth and survival of the bacteria in the soil (Hungary and Vargas 2000; Salvagiotti et al. 2008).

The killing timing of ryegrass did not impact grain yield of soybeans. Yields around 3500 kg ha⁻¹ were observed for all evaluated treatments in both years of study. These results are in agreement with other studies conducted in upland, where the killing timing of rye and other cover crops in winter period did not affect grain yield of corn, soy and black beans (Westgate et al. 2005; Balbinot JR et al. 2011;. Franchini et al. 2014).

Table 1. Plant Population, emergence index, nodule number, dry weight of nodules, ureides and grain yield of soybean as planting as affected by the killing time of ryegrass during the 2014/15. Santa Maria, RS, 2016.

		2014/15							
Killing timing	DAS ¹	Population	Emergence	Nodule Number		Dry Weight of Nodules		Ureides	Grain Yield
		(n°)	-	V6	R5	V6	R5	(%)	(kg ha ⁻¹)
08/28/2014	80	20 ^{NS}	1.20 ^{NS}	27 B*	89 ^{NS}	82 C	577 B	63 ^{NS}	3564 ^{NS}
09/10/2014	65	22	1.20	36 B	90	140 B	555 B	60	3638
09/25/2014	50	23	1.41	42 A	99	131 B	783 A	64	3568
10/10/2014	35	20	1.22	47 A	104	205 A	735 A	59	3678
10/25/2014	20	20	1.29	44 A	102	190 A	926 A	62	3401
Mean		22	1.26	118	97	149	715	62	3569
CV (%)		23.02	19.88	19.65	17.80	13.45	20.31	5.52	6.01

¹ Days before soybean planting.

^{NS} Non significant at 5% of error probability.

* Uppercase Letters indicate statistical difference between treatments in the columns.

Table 2. Plant Population, emergence index, nodule number, dry weight of nodules, ureides and grain yield of soybean as planting as affected by the killing time of ryegrass during the 2015/16. Santa Maria, RS, 2016.

		2015/16							
Killing timing	DAS ¹	Population	Emergence	Nodule Number		Dry Weight of Nodules		Ureides	Grain Yield
		(n°)	-	V6	R5	V6	R5	(%)	(kg ha ⁻¹)
Bare soil	-	25 ^{NS}	-	33 B*	190 A	167 B	343 ^{NS}	72 ^{NS}	3378 ^{NS}
08/28/2015	90	28	-	33 B	179 AB	152 B	379	70	3154
09/10/2015	75	25	-	44 AB	174 AB	206 A	379	70	3497
09/25/2015	60	28	-	35 AB	158 AB	206 A	354	73	3384
10/10/2015	45	26	-	39 AB	144 AB	216 A	371	67	3434
10/25/2015	30	27	-	50 A	120 B	213 A	448	69	3466
Mean		26	-	39	160	193	379	70	3368
CV (%)		17.15	-	14.09	15.51	19.83	17.57	12.52	10.47

¹ Days before soybean planting.

^{NS} Non significant at 5% of error probability.

* Uppercase Letters indicate statistical difference between treatments in the columns.

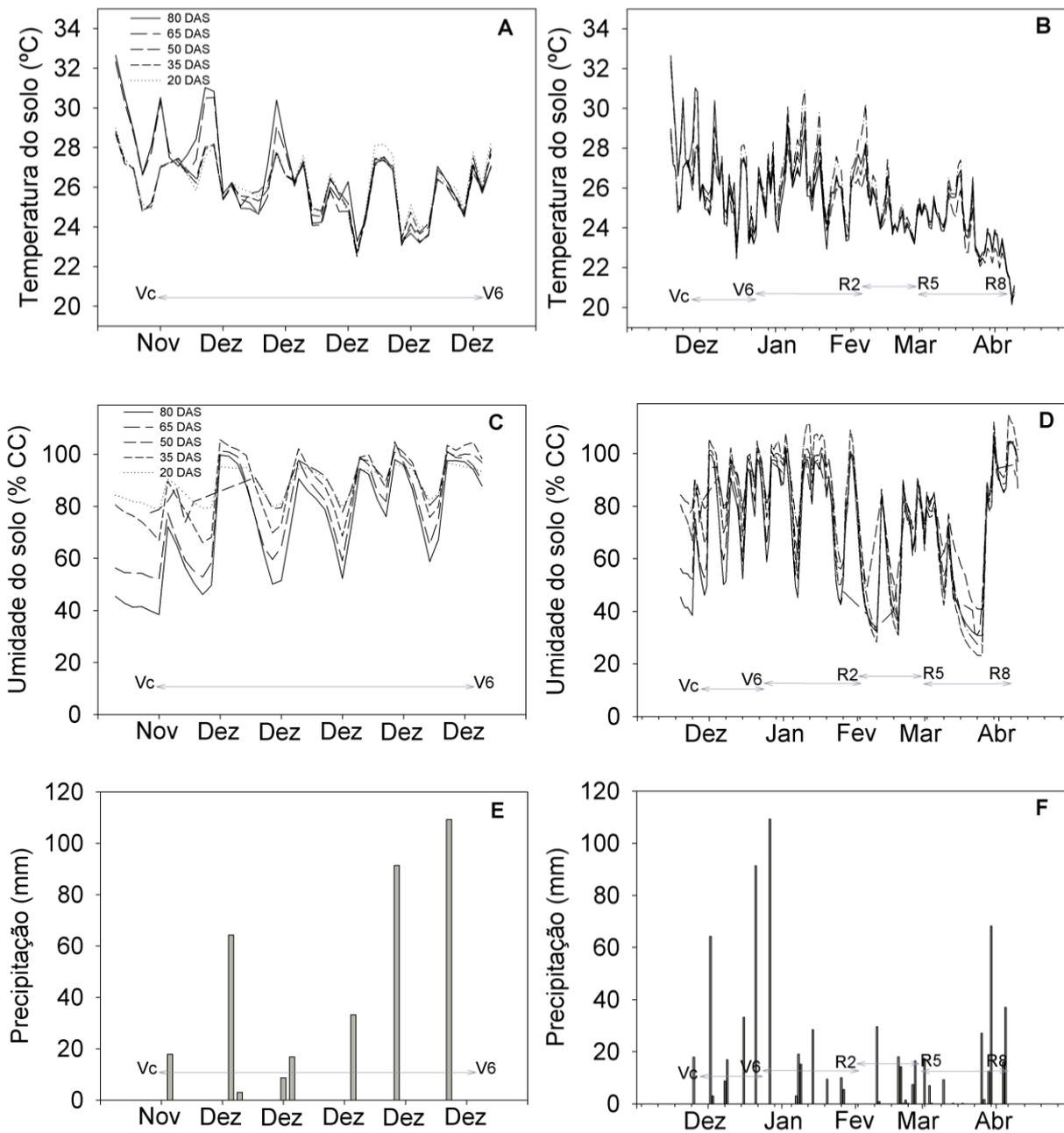


Figure 5. Soil temperature (A e B), soil moisture (C e D) in the 0-0.05 m layer and rainfall distribution (E and F) during the emergence and crop maturity in the 2014/15 growing season. Santa Maria, RS, 2015. Field capacity = $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

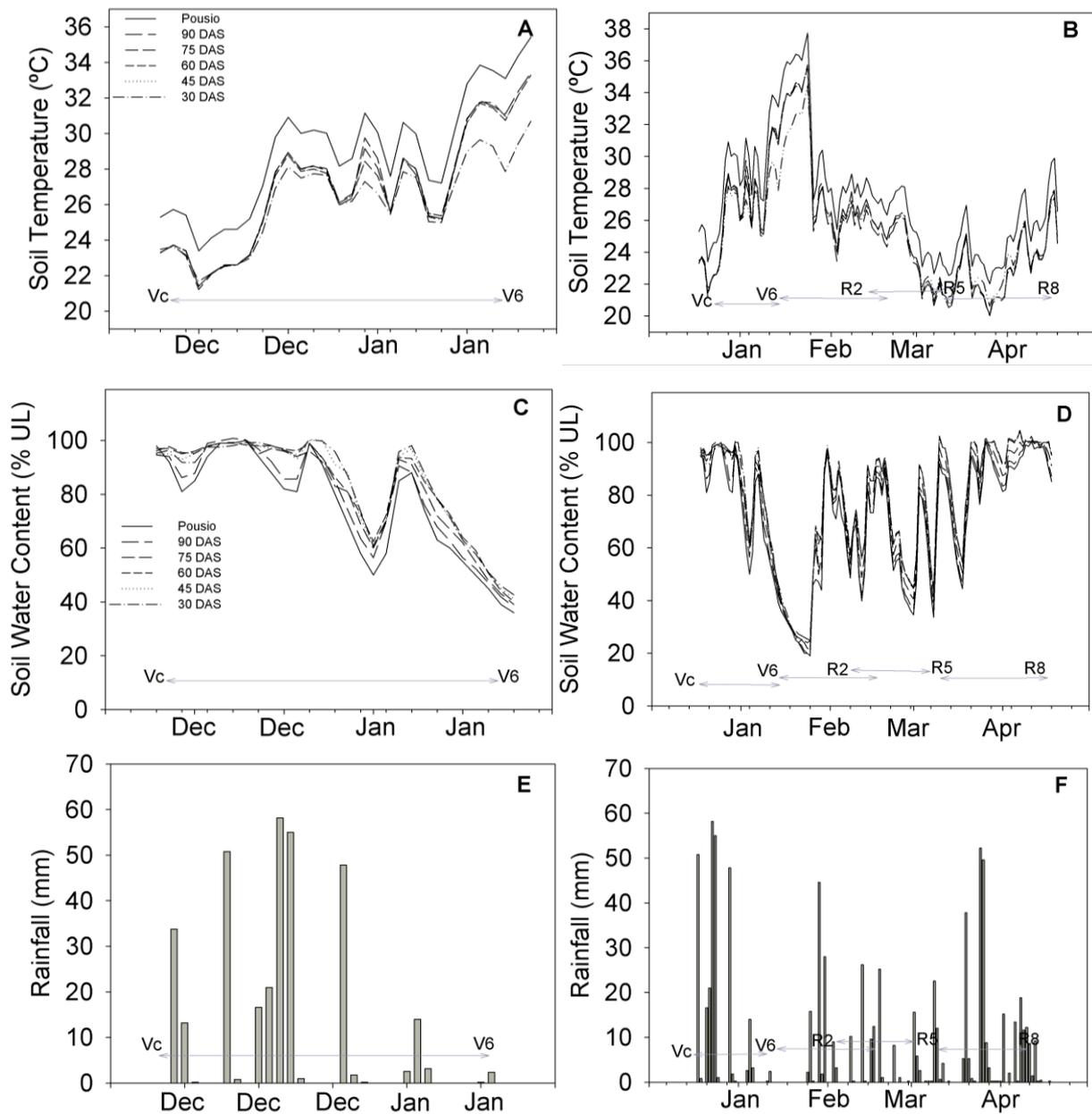


Figure 6. Soil temperature (A e B), soil water content (C e D) in the 0-0.05 m soil depth layer and rainfall distribution (E and F) during the emergence and crop maturity in the 2015/16 growing season. Santa Maria, RS, 2016. Field capacity = $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

CONCLUSIONS

The killing timing of ryegrass and consequently the amount of straw above the soil surface do not affect soybean yield in rotation with rice. However, intervals between herbicide application and soybean planting shorter than 60 days or that provides more than 1000 kg ha⁻¹ of remaining straw on the soil surface significantly increase soil moisture at the moment of soybean planting. The increased soil moisture may reduce the available planting window for seeding operations and other cultural practices in paddy fields.

Soil bulk density is not influenced by the killing timing of ryegrass. However, penetration resistance decreases with increasing amount of straw at the moment of soybean planting.

Elevated amounts of ryegrass straw above soil surface reduce thermal oscillation and maintain soil moisture with potential to benefit the development of nodules in soybean, especially in the early growth stages.

REFERENCES

Acuña, J. C. M. and Villamil, M. B. (2014). Short-term effects of cover crops and compaction on soil properties and soybean production in Illinois. *Agronomy Journal*, 106, 860-870. [http://dx. doi:10.2134/agronj13.0370](http://dx.doi.org/10.2134/agronj13.0370).

Amado, T. C., Prochnow, D., and Eltz, F. F. (2002). Soil and water losses in periods of climatic anomalies: "El Niño" and "La Niña" in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26, 819-827. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832002000300028>.

Balbinot Júnior., A. A., Moraes, A., Backes, R. L., and Souza, A.M. (2007). Épocas de dessecação de coberturas de inverno em relação à semeadura de milho: infestação de plantas daninhas e produtividade da cultura. *Scientia Agraria*, 8, 111-117. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v8i2.8374>.

Balbinot Júnior, A. A., Vogt, G. A., Trezzi, M. M., and Veiga, M. (2011). Intervalos de tempo entre a dessecação da pastagem e a semeadura de feijão, soja e milho. *Scientia Agraria*, 12, 89-96. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v12i2.33741>.

Bruns, H. A., and Young, L. D. (2012). Raised seedbeds for soybean in twin rows increase yields over flat seedbeds. Online. *Crop Management*. [http://dx. doi:10.1094/CM-2012-0712-01-RS](http://dx.doi.org/10.1094/CM-2012-0712-01-RS).

Calonego, J. C., and Rosolem, C. A. (2010). Soybean root growth and yield with cover crops under chiseling and no-till. *European Journal of Agronomy*, 33, 1399-1407. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2010.06.002>.

Chen, G., and Weil, R. R. (2011). Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil and Tillage Research*, 117, 17-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2011.08.001>.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (1994). National Center of Soil Research. **Manual methods employed in agricultural microbiology studies**. 1.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos. 542p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2011). National Center of Soil Research. **Manual of soil analysis methods**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 230p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2014). Technical indications for the soybean crop in Rio Grande do Sul and Santa Catarina, harvest 2012/2013 and 2013/2014 / 39th ed Meeting of Soybean Research in the Southern Region – Passo Fundo, 2014. 142 p.

Ferreira, R. B., Marchesan, N., Coelho, L. L., Oliveira, M. L., Teló, G. M., Filho, A. C., and Sartori, G. M. S. (2015). Ryegrass management on the initial establishment of plants, nutrient cycling and grain yield of irrigated rice. *Ciência Rural*, 45, 2143-2149. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20131473>.

Fiorin, T. T., Spohr, R. B., Carlesso, R., Michelon, C. J., Santa, C. D., and David, G. de. (2009). Maize silage production on high ridges in lowland soil. *Revista Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, 2,148-153. [http://dx. doi: 10.5777/paet.v2i1.442](http://dx.doi.org/10.5777/paet.v2i1.442).

Franchini, J. C., Balbinot Júnior, A. A., Debiassi, H., and Conte, O. (2014). Soybean performance as affected by desiccation time of *Urochloa ruziziensis* and grazing pressures. *Revista Ciência Agronômica*, 45, 999-1005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902014000500015>.

Hungria, M., and Vargas, M. A. T. (2000). Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. *Field Crops Research*, 65, 151-164. . [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00084-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00084-2).

Kasper, T. C., and Singer, J. W. (2011). The use of cover crops to manage soil. USDA-ARS/UNL Faculty, 1382, 321-337.

King, C. A., Purcell, L. C., Bolton, A., and Specht, J. E. (2014). A possible relationship between shoot N concentration and the sensitivity of N₂ fixation to drought in soybean. *Crop Science*, 54, 746-756. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0271>.

Machado, S. L. O., Marchezan, E., Righes, A. A., Carlesso, R., Villa, S. C. C., and Camargo, E. R. (2006). Water use and nutrients and sediments losses on the initial water drainage on flooded rice. *Ciência Rural*, 36, 65-71. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000100010>.

Marchezan, E., Segabinazzi, T., Marzari, V., Villa, S. C. C., and Avila, L. A. de. (2001). Irrigated rice fertilization management on grain yield and nutrients loss through initial drain discharge in the pregerminated system. *Ciência Rural*, 31, 877-879. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782001000500023>.

Moraes, P. V. D., Agostinetto, D., Vignolo, G.K., Santos, L. S., and Panozzo, L.E. (2009). Cover crop management and weed control in corn. *Planta Daninha*, 27, 289-296. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582009000200011>.

Pedrotti, A., Pauletto, E. A., Gomes, A. S., Turatti, A. L., and Crestana, S. (2001). Tillage systems of irrigated rice and compaction of a Planosol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 6, 709-715. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2001000400015>.

Ram, H., Singh, Y., Saini, K. S., Kler, D. S., and Timsina, J. (2013). Tillage and planting methods effects on yield, water use efficiency and profitability of soybean–wheat system on a loamy sand soil. *Journal of Experimental Agriculture*, 49, 524-542. <http://dx.doi.org/10.1017/S0014479713000264>.

Rosa, C. M., Castilhos, R. M. V., Pauletto, E. A., Pillon, C. N., and Leal, O. A. (2011). Content of soil organic carbon in albaqualf soil: influence of irrigated rice management. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 1769-1776. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000500031>.

Salvagiotti, F., Cassman, K. G., Specht, J. E., Walters, D. T., Weiss, A., and Dobermann, A. (2008). Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 108, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001>.

Wendt, R. C., and Burwell, R. E. (1985). Runoff and soil losses for conventional, reduced and no-till corn. *Journal of Soil and Water Conservation*, 40, 450-454.

Westgate, L. R., Singer, J. W., and Kohler, K. A. (2005). Method and timing of rye control affects soybean development and resource utilization. *Agronomy Journal*, 97, 806-816. [http://dx. doi:10.2134/agronj2004.0223](http://dx.doi:10.2134/agronj2004.0223).

Vieira Neto, S. A., Pires, F. R., Menezes, C. C. E., Silva, A. G., Assis, R. L., Silva, G. P., and Menezes, J. F. S. (2008). Forms of inoculant application and the effects in soybean crop. *Bioscience Journal*, 24, 56-68.

Zhang, X., Ma, L., Gilliam, F. S., and Li, C. (2012). Effects of raised-bed planting for enhanced summer maize yield on rhizosphere soil microbial functional groups and enzyme activity in Henan Province, China. *Field. Crops Research*, 130, 28-37. [http://dx. doi:10.1016/j.fcr.2012.02.008](http://dx.doi:10.1016/j.fcr.2012.02.008).

3.3 ARTIGO 3

DO RAISED SEEDBEDS AND IRRIGATION IMPROVE YIELD OF SOYBEAN IN LOWLAND CONDITIONS IN SOUTHERN BRAZIL?

Guilherme Vestena Cassol^{a,*}, Enio Marchesan^a, Joseph Harry Massey^b, Adroaldo
Dias Robaina^a, Vinícius Severo Trivisio^a, Isabel Werle^a, Elisa Gollo^a, Robson
Giacomeli^a

Revista Field Crops Research

^a Departamento de Fitotecnia e Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa
Maria, Avenida Roraima, 1000, 97105900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil.

^b Delta Water Management Research Unit, USDA-ARS, 504 University Loop East,
724010000, Jonesboro, Arkansas, United States.

* Corresponding author at: Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de
Santa Maria, Avenida Roraima, 1000, 97105900, Santa Maria, Rio Grande do Sul,
Brazil.

Email addresses: guilhermevcassol@hotmail.com (G.V. Cassol),
eniomarchesan@gmail.com (E. Marchesan), joseph.massey@ars.usda.gov (J.M.
Massey), diasrobaina@gmail.com (A.D. Robaina), vinicius_trivisio@hotmail.com
(V.S. Trivisio), isabelwerle@outlook.com (I. Werle), elisagollo@hotmail.com (E.A.
Gollo), robsongiacomeli@yahoo.com.br (R. Giacomeli).

Abstract – The adoption of raised seedbeds and irrigation have improved yields in lowland crop rotation systems worldwide. However, research is limited for southern Brazil. Thus, field experiments were conducted in the 2014/15 and 2015/16 growing seasons to determine the effects of cropping systems (raised seedbed and flat planting) and irrigation (irrigated and non-irrigated) on yield of soybean rotated with rice. Water use, crop growth and nitrogen fixation were also evaluated. Water savings for raised seedbeds ranged from 14% ($151 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) in 2014/15 to 27% ($163 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) in 2015/16 compared to flat planting system. The numbers and viability of nodules were not affected by cropping systems in either years of study. However, irrigation increased nodule number per plant, dry weight of nodules and nitrogen fixation regardless of cropping system. Average grain yields of raised seedbeds were 10% (529 kg ha^{-1}) and 9% (362 kg ha^{-1}) higher than flat planting in 2014/15 and 2015/16, respectively. Irrigation improved yields by 5% (203 kg ha^{-1}) in 2014/15 and 7% (265 kg ha^{-1}) in 2015/16 compared to non-irrigated treatments. These results indicate that raised seedbeds and irrigation improve yields of soybean grown in rotation with rice in lowland conditions of southern Brazil.

Keywords: Rice, *Glycine max* (L.), crop rotation, cropping systems, water management.

1. INTRODUCTION

Irrigated rice (*Oryza sativa* L.) is the main crop grown in lowland areas of Santa Catarina and Rio Grande do Sul states in southern Brazil. The rice area across both states usually ranks over 1.3 million hectares every year, representing more than 70% of total Brazilian rice production (CONAB, 2016). In this region, rice has been

historically grown using a continuous rice cropping system or in a 1:1 or up to a 1:5 rice: cattle-grazing rotation (MARCHESAN et al., 2003). However, the development of weed resistance to herbicides has become a major issue in rice production over the past decade (MENEZES et al., 2009). For example, red rice (*Oryza sativa* L.) poses unique challenges as the rotation with grazing is only partially effective in its control (MARCHESAN et al., 2003). In order to overcome this and other weed resistance issues, producers have begun to include soybean in rotation with rice to allow chemical control of resistant weeds using herbicides with different modes of actions (ZEMOLIN et al., 2014).

The cultivation of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) in rotation with rice is rapidly increasing in southern Brazil. According to surveys conducted by the Rice Institute of Rio Grande do Sul (IRGA), the soybean area rotated with rice increased from 11,000 ha in the 2009/10 growing season to 280,000 ha in 2014/15 (IRGA, 2016). On the other hand, average soybean yields are relatively low at 2,200 kg ha⁻¹ and generally have not increased beyond this level (IRGA, 2016). Further, research indicates yield potentials of between 5,500 to 6,900 kg ha⁻¹, highlighting challenges with current farm practices (ZANON et al., 2016).

The stagnated yields have been attributed to the traditional practice of flat-planted soybean on Albaqualf soils of lowland areas common to rice production. These soils typically exhibit poor drainage, low hydraulic conductivity, low water holding capacity and elevated soil bulk density that restrict internal oxygen and water movement into the soil profile (GOMES et al., 2006). Also, a traffic-induced hardpan 15 to 20 cm below the soil surface has been formed owing to management practices particular to rice production (SARTORI et al., 2016). This increases both waterlogging during early soybean development and water stress later during reproduction with

concomitant effects on important physiological process such as photosynthesis and nitrogen fixation (LANZA et al, 2013, KING et al., 2014). Thus, need exists to devise improved practices for reducing water-related stresses and maximizing yields of soybean grown in rotation with rice in lowland areas of southern Brazil.

Raised seedbeds have been reported to effectively mitigate waterlogging of crops (FIORIN et al, 2009, BRUNS AND YOUNG, 2012; RAM et al, 2013) by lowering soil bulk density, increasing hydraulic conductivity, and increasing runoff owing to the presence of furrows (BAKER et al., 2005). These results in improved soybean stand establishment and increased yields when compared to flat planting (BRUNS and YOUNG, 2012). Moreover, furrows created between the beds facilitate use of furrow irrigation which can further improve yields with positive economic net results, if properly managed (BRUNS and YOUNG, 2012). Furrow irrigation provided the highest grain yield and economic net return of soybean when compared to flood irrigation (HEATHERLY and SPURLOCK, 2000).

In the rice producing areas of southern Brazil, flood irrigation of flat-planted soybean is the common production system (SARTORI et al., 2015) owing to fact that rice producers typically do not have equipment for making raised beds. The adoption of raised seedbeds could improve drainage and stand establishment, and facilitate adoption of furrow irrigation. Research determining the combined potential benefits of using raised beds and properly timed irrigation is needed for edaphic, climatic, and cultural conditions of this important crop region, where growers have more familiarity with rice than soybean production. Thus, this study was conducted to determine: 1) yield response of soybean as affected by cropping system (raised bed versus flat-planted), 2) irrigation (non-irrigated vs. flood vs. furrow irrigation), and 3) the effects, if

any, that these practices have on irrigation use, soybean growth, and nitrogen fixation.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Site description, experimental design and crop management

A two year field experiment was conducted during the 2014/15 and 2015/16 growing seasons at the Crop Science Research Station, Federal University of Santa Maria, Rio Grande do Sul state, Brazil. The experimental design for each growing season was a factorial scheme in a randomized block with four replications. Treatments were composed by a combination of two cropping systems (A1= raised seedbeds; A2= flat planting) and two soybean irrigation managements (D1= irrigated; D2= non-irrigated). Plots were 75 m long and 3 m wide.

Raised seedbeds were constructed at time of soybean planting by using a planter (Industrial KF, Hyper Plus 6/5 A, Cândido Godoi, RS, 98970-000) developed to perform both planting and bedding operations simultaneously. Each raised seedbed was planted with two rows of soybean and row spacing of 0.5 m. Average bed height and furrow spacing were 0.10 m and 1.0 m, respectively. The flat-planting system was performed using the same planter as used for the raised-beds but with no hippers attached. Soil berms were constructed around the irrigated plots so as to avoid irrigation leakage between irrigated and non-irrigated treatments as well as to facilitate water flow in the flat-planted plots.

Seedbed preparation in both growing seasons was performed between August and September using conventional tillage and precision leveling. Average field slope was approximately 0.03%. Soybean was planted on November 15th 2014 and November 22th 2015 using a seeding rate of 300,000 seeds ha⁻¹. Seeds were treated

with fipronil (250 g L^{-1}) and carbendazim + thiram ($150 \text{ g L}^{-1} + 350 \text{ g L}^{-1}$) using 150 mL and 200 mL per 100 kg^{-1} seeds, respectively. The seeds were also inoculated with *Bradyrhizobium japonicum* (100 g per 50 kg seeds). The determinate Roundup Ready soybean variety Nidera 6209 (maturity group 6.0) was used in the study. Fertilization was performed simultaneously at planting at rates of 13 kg ha^{-1} nitrogen, 55 kg ha^{-1} phosphorus and 87 kg ha^{-1} potassium. Weed and pest control followed recommended practices for soybean production in southern Brazil (EMBRAPA, 2014).

2.2 Soil water content and irrigation management

Water retention curves for the 0 to 0.10 and 0.10 to 0.20 m depth layers were determined using the Richards pressure chamber method (EMBRAPA, 2011). The parameters used in the study are presented on table 1. Also, soil samples from both cropping systems were taken 20 days after crop emergence to determine soil bulk density using the core method (EMBRAPA, 2011). In addition, advance times and soil water infiltration rates for raised seedbed and flat-planting systems were determined in order to properly manage surface irrigation in the watered plots. Rainfall was recorded by using a conventional rain gauge placed in the middle of the experimental field.

Table 1. Particle size distribution, field capacity (FC), wilting point (WP), soil bulk density (Ds) and available water content (AWC) in the 0-0.10 to 0.10-0.20 m depth soil layers. Santa Maria, RS, 2016.

Parameter	Soil depth (m)	
	0-0.10	0.10-0.20
Sand (g kg ⁻¹)	210	210
Silt (g kg ⁻¹)	540	520
Clay (g kg ⁻¹)	210	280
FC ¹ (m ³ m ⁻³)	0.36	0.33
WP ¹ (m ³ m ⁻³)	0.12	0.13
Ds ² (kg m ⁻³)	1.33	1.55
AWC (mm)	32	31

¹ Values obtained from soil water retention curve.

² Average soil bulk density for raised seedbed and flat-planted systems.

³ Average available water content considering the interval between the FC and WP limits and soil bulk density.

The irrigation demand was determined by monitoring soil water content using FDR (frequency domain reflectometry) sensors, model CS616 coupled to a data logger CR1000, all from Campbell Scientific, Inc. The FDR sensors were horizontally placed at 0.05 m and 0.15 m depth in both cropping systems. Soil samples were taken weekly to determine gravimetric soil moisture content. The irrigation events were triggered when soil-water depletion in the 0 to 0.20 m root zone exceeded 60% of soil water content at FC (ROSADI et al., 2005). The amount of water needed for each irrigation event was calculated by using the difference in soil moisture content the

day before the event and the water needed to replace the FC. The irrigation efficiency for both the raised seedbeds and flat-planted system was assumed to be 60%.

Irrigation water was distributed across irrigated plots using a 38-cm (diameter) x 254 microns (thickness) plastic tubing (Delta Plastics of the South, Little Rock, AR, 72206) with 7.6 cm plastic gates (Delta Plastics of the South LLC, Little Rock, AR, 72206). A flow meter (Ciasey, DN100, São Paulo, SP, 05056-020) was attached between the irrigation riser and the top part of plastic tubing in order to record the volume of irrigation applied. For this purpose, each plot was irrigated individually.

At the end of each irrigation, water was held for 30 minutes inside the plots to allow infiltration in the soil. Afterwards, the plots were drained and runoff water was quantified using a cutthroat flume (Incontrol S/A, São Paulo, SP, 02551-060) placed at the end of each individual plot.

2.3 Plant population, nodule sampling, nitrogen fixation and harvest

Plant populations were recorded 20 days after crop emergence. The number, viability, dry weight of nodules per soybean plant and shoot dry matter were determined at the R5 growth stage (FEHR and CAVINESS, 1977). For nodule evaluations, a 0.40-m wide by 0.20-m deep soil sample was collected from each plot using a shovel. After sampling, roots were manually washed in fresh water and taken to the laboratory. Nodule viability was determined according the methodology proposed by Vieira Neto et al. (2008). After the viability measurements, the nodules were dried in a forced air circulation oven at 65 °C to obtain the dry weight of nodules. Nitrogen fixation was estimated by Average Relative Abundance of N-ureides (EMBRAPA, 1994). N-ureides and nitrate content in the stems and leaves of

soybean plants were quantified in the laboratory following recommended microbiological procedures (EMBRAPA, 1994).

Grain yield was determined by harvesting a 10-m long and 2-m wide area within each soybean plot. Two sub-samples were taken for each plot. After harvest, samples were threshed, cleaned and weighed. Moisture content was adjusted to 13%. Irrigation water use efficiency (I_{WUE}) was calculated as

$$I_{WUE} = \frac{Y_i - Y_d}{I_i} \quad [1]$$

where Y_i is the yield of irrigation level i , Y_d is the yield for the rainfed control plot, and I_i is the amount of irrigation applied for irrigation level I (RHINE et al., 2010).

2.4 Statistical Analysis

Data were analyzed for independence, homogeneity and normality and then subjected to analysis of variance ($p \leq 0.05$) using the general linear model procedure of Statistical Analysis System version 9.3 (SAS, Inc., Cary, NC 27513). Cropping system, irrigation and year were treated as fixed effects. As the interaction year by treatment was significant for most variables evaluated, data were analyzed separately by year. The relative abundance of N-Ureides data were not transformed because nearly all values fell between the range of 50 and 90%. Means of significant main effects were separated by Fischer's Protected LSD test ($p \leq 0.05$).

3. RESULTS

No significant differences were observed for plant population across cropping systems in the 2014/15 growing season (Table 2). However, planting systems affected soybean plant population in 2015/16. Raised seedbeds increased 25% the number of established plants in comparison to flat planting at 20 days after crop emergence.

Rainfall was fairly well distributed for the majority of 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Higher volumes of rainfall occurred during the emergence and vegetative stages of soybean development for both years of study (Figure 1). Thus, there was no irrigation demand during these periods. However, based on rainfall and soil water content data, soybean needed irrigation during the R2 growth stage (full bloom) on 01/25/15 and R3-R4 (pod touching) on 02/05/15 in the 2014/15 season. Average soil water contents at the 0-0.20 m soil depth at the first and second irrigation events were 52% and 48% of established upper limit, respectively (Figure 2). In the 2015/16 season, one irrigation event was performed during the R1-R2 growth stage (flowering to full bloom) on 01/15/16 when the average soil water content was at 58% upper limit in the 0-0.20 m depth (Figure 3).

Table 2. Plant population and shoot dry matter at R5 growth stage of soybean as affected by cropping systems and irrigation in the 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016.

Cropping system	2014/15	
	Plant population	Shoot Dry Matter
	(plants m ⁻²)	(g plant ⁻¹)
Raised seedbed	28.7 ^{NS}	23.4 ^{NS}
Flat-planted	27.5	24.4
Irrigated	28.3 ^{NS}	25.2 ^{NS}
Non-irrigated	27.8	22.7
CV (%)	7.6	18.4
Cropping system	2015/16	
	Plant population	Shoot Dry Matter
	(plants m ⁻²)	(g plant ⁻¹)
Raised seedbed	24.8*	25.2 ^{NS}
Flat-planted	18.6	31.0
Irrigated	22.5 ^{NS}	28.6 ^{NS}
Non-irrigated	21.0	27.4
CV (%)	9.3	22.1

* Means in the column differ by the Fischer's Protected LSD test at 5% of error probability.

^{NS} Non significant at 5% of error probability.

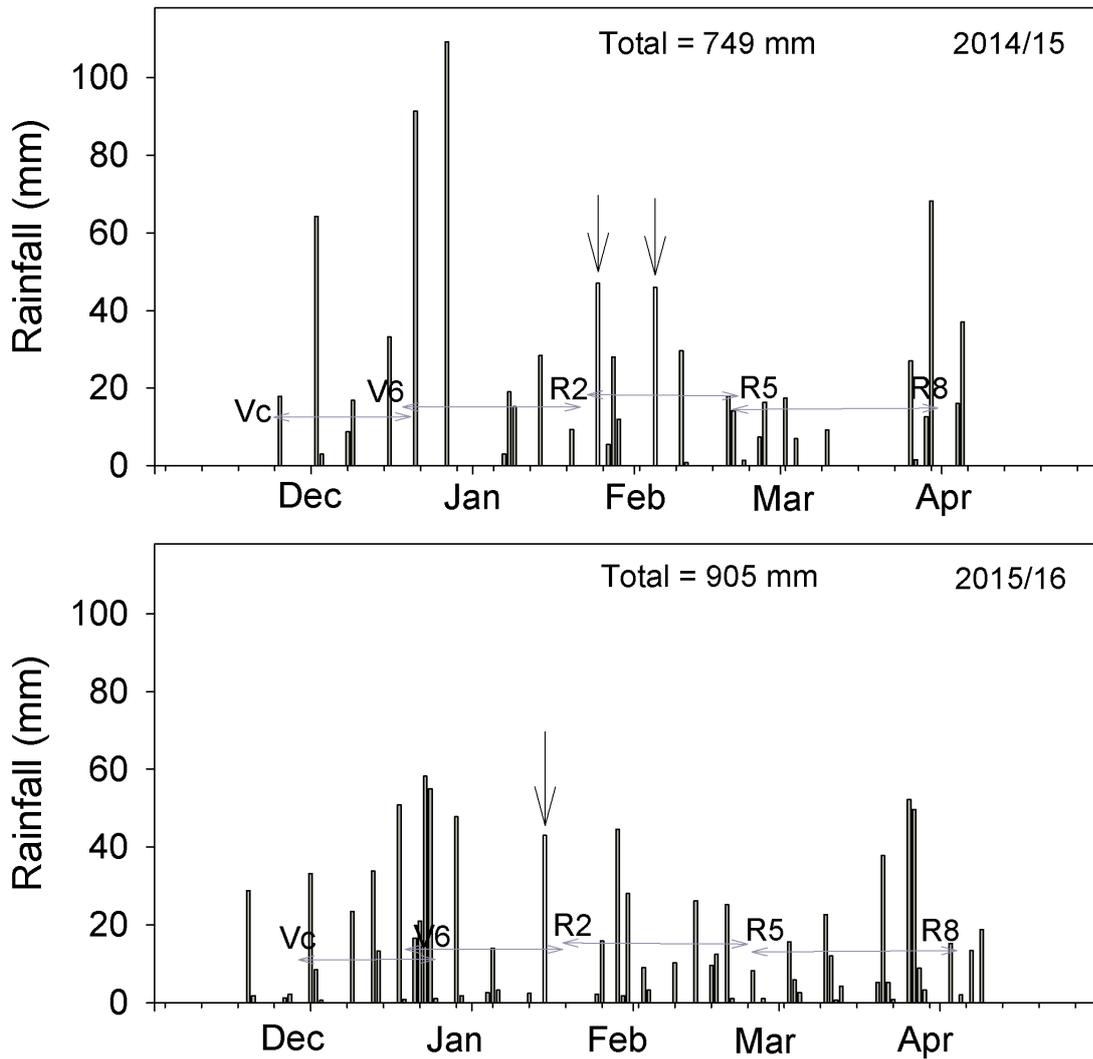


Figure 1. Seasonal rainfall (bars) and irrigation events (bars plus arrows) during the 2014/15 and 2015/16 growing seasons of soybean rotated with rice. Santa Maria, RS, 2016. Grey lines represent duration of main soybean growth stages. Total rainfall represents accumulated rainfall between planting and harvest for each season.

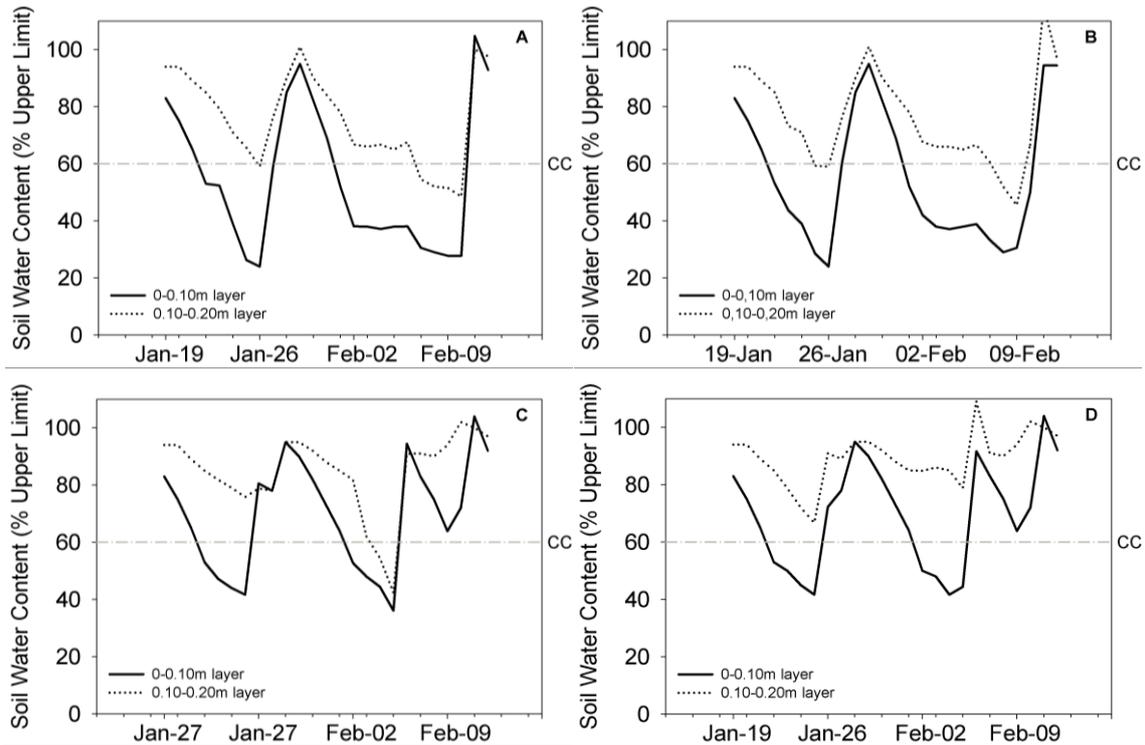


Figure 2. Average soil water content in the 0-0.10 and 0.10-0.20 m depth layers for non-irrigated raised beds (A), non-irrigated flat planting (B), furrow irrigated raised beds (C) and flood irrigated flat planting (D) between irrigation events in the 2014/15 growing season. Santa Maria, RS, 2016. The dashed line indicates the critical soil water content (CC) used to determine irrigation timings.

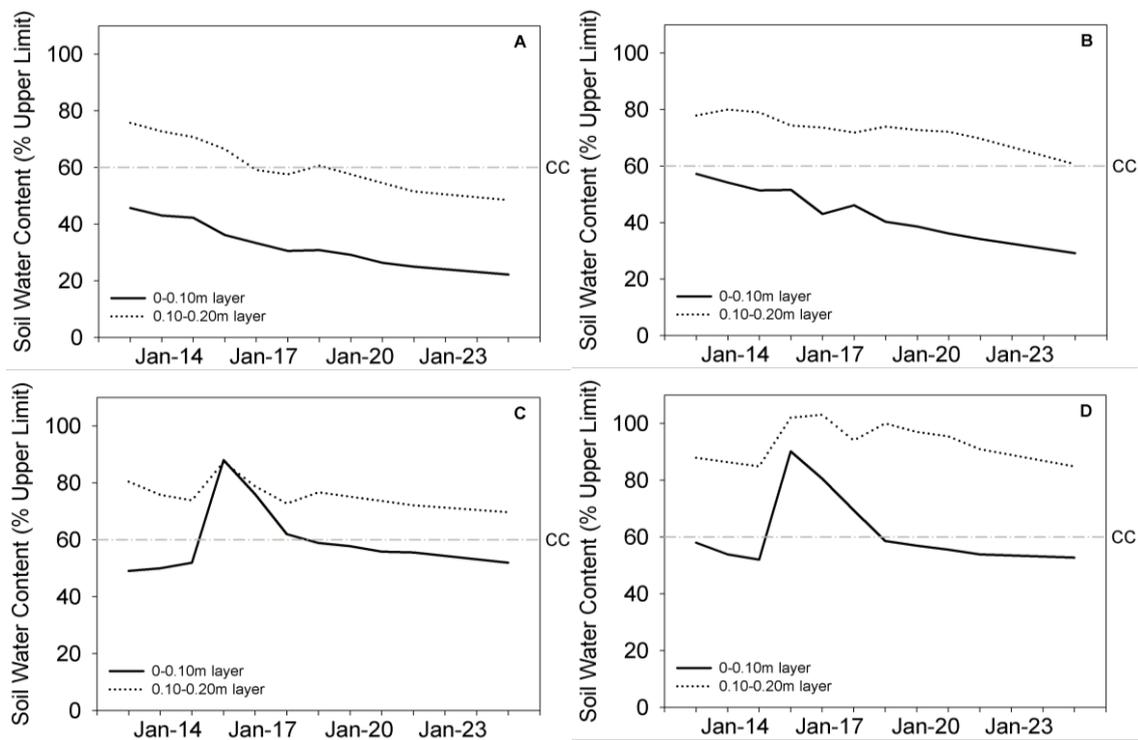


Figure 3. Average soil water content in the 0-0.10 and 0.10-0.20 m depth layers for non-irrigated raised beds (A), non-irrigated flat planting (B), furrow irrigated raised beds (C) and flood irrigated flat planting (D) between irrigation events in the 2015/16 growing season. Santa Maria, RS, 2016. The dashed line indicates the critical soil water content (CC) used to determine irrigation timings.

The type of cropping system affected the volumes of irrigation applied. Raised seedbed using furrow irrigation required on average 14% ($151 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) less irrigation compared to flat planting with flood irrigation in 2014/15 (Table 3). Water savings were even higher for the raised seedbed system in 2015/16, requiring 27% ($163 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) less total irrigation. No significant differences were observed in terms of irrigation water use efficiency across planting systems for both growing seasons.

Table 3. Irrigation applied per each irrigation event, total irrigation applied and irrigation water use efficiency (I_{WUE}) for soybean produced using raised seedbed and flat-planting systems during 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016.

Cropping system	2014/15			$I_{(WUE)}^1$ (kg m ⁻³)
	01/25/15	02/05/15	Total	
	-----Irrigation Applied (m ³ ha ⁻¹)-----			
Raised seedbed	462*	471*	933*	0.25 ^{NS}
Flat-planted	520	564	1084	0.20
Mean	491	517	1008	0.22
CV (%)	4.0	7.2	4.7	17.6
Cropping system	2015/16			$I_{(WUE)}$ (kg m ⁻³)
	01/15/16	-	Total	
	-----Irrigation Applied (m ³ ha ⁻¹)-----			
Raised seedbed	436*	-	436*	0.48 ^{NS}
Flat-planted	599	-	599	0.40
Mean	517	-	517	0.44
CV (%)	7.9	-	7.9	21.3

¹ Obtained considering total applied irrigation water and yield difference between irrigated and non-irrigated plots.

* Means in the column differ by the Fischer's Protected LSD test at 5% of error probability.

^{NS} Non significant at 5% of error probability.

According to analysis of variance, nodule number, viability and dry weight of nodules were not affected by the cropping systems (Table 4). However, irrigation increased nodule number per plant in 2014/15 and dry weight of nodules in 2015/16 during the grain filling period (R5) of soybean. Besides increased numbers of nodules per plant, irrigation provided higher percentages for the relative abundance of N-ureides in both years of study (Table 4).

Table 4. Nodule number, viability, dry weight of nodules and relative abundance of N-ureides at R5 growth stage as affected by cropping system and irrigation in the 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016.

Cropping system	2014/15			
	Nodules	Viability	Dry Weight	N-Ureides
	(n° per plant ⁻¹)	(%)	(g plant ⁻¹)	(%)
Raised seedbeds	114 ^{NS}	85 ^{NS}	0.94 ^{NS}	78.1 ^{NS}
Flat-planted	105	86	0.88	77.3
Irrigated	118*	84 ^{NS}	1.01 ^{NS}	78.7*
Non-irrigated	101	85	0.84	76.4
CV (%)	11.2	8.8	25.2	2.9
Cropping system	2015/16			
	Nodules	Viability	Dry weight	N-Ureides
	(n° per plant ⁻¹)	(%)	(g plant ⁻¹)	(%)
Raised seedbeds	66 ^{NS}	70 ^{NS}	0.63*	75.4 ^{NS}
Flat-planted	67	64	0.53	75.1
Irrigated	69 ^{NS}	70 ^{NS}	0.67*	78.2*
Non-irrigated	64	63	0.49	72.8
CV (%)	18.9	17.7	4.1	4.6

* Means in the column differ by the Fischer's Protected LSD test at 5% of error probability.

^{NS} Not significant at 5% of error probability.

Raised seedbeds and irrigation improved soybean yields in the 2014/15 and 2015/16 growing seasons (Table 5). Raised seedbeds provided approximately 10% and 9% (529 kg ha⁻¹ and 362 kg ha⁻¹) increases in grain yield compared to flat planting system for the first and second year of study, respectively. Irrigation increased on average 5% and 7% (203 kg ha⁻¹ and 265 kg ha⁻¹) grain yield of

soybeans compared to non-irrigated controls in the 2014/15 and 2015/16, respectively. Yield gains due to irrigation were higher on the second year of study because average soil water content dropped to 60% of upper limit for eight consecutive days in 2015/16 compared to six consecutive days in 2014/15 (Figures 2 and 3). This represents an average yield reduction of 33 kg ha⁻¹ for each day that soil water content was below 60% of upper limit.

Table 5. Grain yield of soybean rotate with rice as affected by cropping systems and irrigation during 2014/15 and 2015/16 growing seasons. Santa Maria, RS, 2016.

Cropping system	2014/15		
	Grain Yield (kg ha ⁻¹)		
	Irrigated	Non-irrigated	Mean
Raised seedbed	4618	4382	4500*
Flat-planted	4057	3886	3971
Mean	4337*	4134	
CV (%)	4,5		
Cropping system	2015/16		
	Grain Yield (kg ha ⁻¹)		
	Irrigated	Non-irrigated	Mean
Raised seedbed	4028	3849	3938*
Flat-planted	3751	3402	3576
Mean	3890*	3625	
CV (%)	5,5		

* Means in the column differ by the Fischer's Protected LSD test at 5% of error probability.

4. DISCUSSION

This study demonstrate potential techniques for improving yields of soybean that are grown in rotation with rice in lowland areas of southern Brazil where poor drainage and soil compaction may inhibit soybean growth and productivity. The observed yield gains appear to be due to improvements in crop growth and physiological processes. Improved drainage resulting from raised seedbeds improved crop establishment, particularly during wet years such as 2015/16 growing season. Furrows between beds enhance surface drainage and prevent stand losses by providing a more suitable rooting environment with increased O₂ and CO₂ gas exchange that is necessary for germination and root metabolism (BRUNS and YOUNG, 2012). Also, beds have been reported in previous researches to diminish incidence of soil-borne diseases and prevent crop-stand losses by reducing periodic free and standing water in the field (RAM et al., 2013).

The practice of building raised seedbeds help to alleviate soil compaction, improving root growth and development of soybean. This also increases crop tolerance to other potential abiotic stresses that may occur during the growing season (SARTORI et al., 2015). Although raised seedbeds provide a better environment for root development, irrigation is essential to enhance crop growth, nodulation and nitrogen fixation, even during moderate water-deficit stress. By maintaining soil water content above 60% of field capacity throughout growing season, nodulation and nitrogen fixation at R5 growth stage (grain filling) were consistently improved.

Benefits of properly managed irrigation for biological nitrogen fixation have been attributed to the maintenance of photosynthetic activity of soybean plants necessary for the symbiosis processes (KING et al., 2004). It has been also reported biological

nitrogen fixation requires about 14% of photoassimilates produced by soybean plants (SALVAGIOTTI et al., 2008). Similar results considering an increment of dry weight of nodules per plant due to irrigation have been observed in other studies (MASTRODOMENICO et al, 2013; WINGEYER et al, 2014).

Beside increased nodule number, irrigation also increased relative abundance of N-Ureides in both years of study. The ureides (allantoin and allantoic acid) are compounds primarily derived from biological nitrogen fixation in nodules and are exported to the shoots of soybean plants. The abundance of these compounds in the xylem sap or soybean plant tissues has been directly related to the magnitude of biological nitrogen fixation and yield (SERRAJ et al., 1999; KING et al, 2014).

Therefore, irrigation is an important management practice for maintaining nitrogen fixation and achieving higher yields of soybean rotated with rice. Raised seedbeds coupled with furrow irrigation also required less irrigation water applied than flood irrigation of flat-planted soybeans. The lower water volume applied for furrow irrigation has been attributed to reduced irrigated surface area, seepage and deep percolation losses when compared to flooded irrigation (HEATHERLY and SPURLOCK, 2000; VORIES et al., 2002). Similar results were found in studies comparing irrigation use for furrow and flood irrigated systems worldwide. In the midsouth region of the U.S., furrow irrigation used less irrigation than border or flood irrigation (HEATHERLY and SPURLOCK, 2000; VORIES et al., 2002). In India, total water applied for soybean irrigation was 20% less over a three year period for furrow compared to flood irrigation (RAM et al., 2013).

Grain yield of soybean rotated with rice was improved by the adoption of raised seedbed and irrigation. Higher yields of raised seedbed compared to flat-planted soybean may be attributed to ability to reduce crop stresses during the

growing season. Better crop growth and development also increase potential benefits provided by irrigation. In this study, yields of furrow irrigated raised seedbeds were at least 15% higher than non-irrigated flat-planted soybean. This highlights the potential of both practices in maximizing yields of soybean grown in lowland areas of Southern Brazil.

5. CONCLUSIONS

1. Growing soybeans using raised seedbeds increase crop yield and reduce irrigation water use when compared to flat-planting of soybean in a rice-soybean rotation.
2. Properly timed irrigation increases nodulation, nitrogen fixation and grain yield of soybeans grown on soils traditionally used for rice production in southern Brazil.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to acknowledge the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) for financial support and Delta Plastics of the South LLC for providing irrigation materials needed for this study.

REFERENCES

BAKER, D. M. et al. The effect of raised beds on soil structure, waterlogging, and productivity on duplex soils in Western Australia. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 2, p. 575-585, 2005.

BRUNS, H. A.; YOUNG, L. D. Raised seedbeds for soybean in twin rows increase yields over flat seedbeds. Online. **Crop Management**, 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2016, available on <http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20090828095727.pdf>

GOMES, A. S. et al. **Characterization of soil quality indicators with emphasis on the lowland areas of Rio Grande do Sul**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2006. 40 p. (Documentos, 169).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. National Center of Soil Research. **Manual methods employed in agricultural microbiology studies**. 1.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 1994. 542p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. National Center of Soil Research. **Manual of soil analysis methods**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2011. 230p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Technical indications for the soybean crop in Rio Grande do Sul and Santa Catarina, harvest 2012/2013 and 2013/2014** / 39th ed Meeting of Soybean Research in the Southern Region – Passo Fundo, 2014. 142 p.

FEHR, W.R., CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. 12p. (Special Report, 80).

FIORIN, T. T. et al. Maize silage production on high ridges in lowland soil. **Revista Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 2, n. 1, p. 148-153, 2009.

HEATHERLY, L. G.; SPURLOCK, S. R. Furrow and flood irrigation of early-planted, early maturing soybean rotated with rice. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, n. 4, p. 785-791, 2000.

INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ - IRGA, 2016, available on <http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20090828095727.pdf>, accessed in november 3, 2015.

KING, C.A. et al. A possible relationship between shoot N concentration and the sensitivity of N₂ fixation to drought in soybean. **Crop Science**, v. 54, n. 3, p. 746-756, 2014.

LANZA, L.M.N. et al. Nitrogen fertilization benefits soybean under flooding conditions. **Bragantia**, v. 72, n. 2, p. 2-9, 2013.

MARCHEZAN, E. et al. Red rice seed bank dynamics affected by cattle trampling and fallow duration. **Planta Daninha**, v. 21, n. 1, p. 55-62, 2003.

MASTRODOMENICO, A. T. et al. The response and recovery of nitrogen fixation activity in soybean to water deficit at different reproductive developmental stages. **Environmental and Experimental Botany**, v. 85, p. 16-21, 2013.

RAM, H. et al. Tillage and planting methods effects on yield, water use efficiency and profitability of soybean–wheat system on a loamy sand soil. **Journal of Experimental Agriculture**, v. 49, n. 4, p. 524-542, 2013.

RHINE, M. D. et al. Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean Cultivars. **Irrigation Science**, v. 28, n. 2, p. 135-142, 2010.

ROSADI, R. A. et al. Critical water content and water stress coefficient of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) under deficit irrigation. **Paddy Water Environment**, v. 3, n. 2, p. 219-223, 2005.

SALVAGIOTTI, F. et al. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. **Field Crops Research**, v. 108, p. 1-13, 2008.

SARTORI, G.M.S. et al. Soybean yield under different planting systems and border irrigation on Alfisols. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 12, p. 1139-1149, 2015.

SARTORI, G.M.S. et al. Soil tillage systems and seeding on grain yield of soybean in lowland area. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 492-498, 2016.

SERRAJ, R. et al. Symbiotic N₂ fixation response to drought. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 2, p.143–155, 1999.

VIEIRA NETO, S. A. et al. Forms of inoculant application and the effects in soybean crop. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.32, p. 861-870, 2008.

VORIES, E. D. et al. Comparison of flooded and furrow-irrigated rice on clay. **Irrigation Science**, v. 21, n.4, p. 139-144, 2002.

WINGEYER, A. B. et al. Growth and yield of irrigated and rainfed soybean with late nitrogen fertilization. *Agronomy Journal*, Madison, v. 106, n. 2, p. 567-576, March 2014.

ZANON, A.J., STRECK, N.A., GRASSINI, P. Climate and Management Factors Influence Soybean Yield Potential in a Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 1, p. 1447-1454, 2016.

ZEMOLIN, C. R. et al. Red rice control and soybean tolerance to S-metolachlor in association with glyphosate. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 1, p. 2040-2047, 2014.

3.4 ARTIGO 4

Alterações fisiológicas em plantas de soja submetidas à deficiência hídrica em terras baixas

Physiological changes in soybean plants under water deficit in lowland soils

Guilherme Vestena Cassol^{2,*}, Enio Marchesan¹, Fernando Teixeira Nicoloso³, Vinícius Severo Trivisio¹, Lilian Oliveira¹, Camila Peligrinotti Tarouco², Liana Rossato²

Revista Ciência Rural

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo determinar a sensibilidade da soja ao déficit hídrico em função do estágio de desenvolvimento da cultura e seus efeitos na fotossíntese, estresse oxidativo, fixação biológica de nitrogênio e rendimento de grãos em terras baixas. O experimento foi conduzido em esquema fatorial (3x2) com delineamento inteiramente casualizado e quatro repetições. O fator A foi composto pelos estágios de desenvolvimento da soja: A1= V6; A2= R2; A3= R5 e o fator D pelos níveis: D1= controle sem déficit hídrico e D2= com déficit hídrico. Durante os períodos de déficit hídrico, a umidade do solo foi mantida em 30-40% da capacidade de vaso (CV) por 10 dias consecutivos. As variáveis avaliadas foram a taxa de transpiração, taxa de assimilação líquida de CO₂, nódulos por planta, viabilidade dos nódulos, massa seca de nódulos por planta e rendimento de grãos da

² Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

E-mail: guilhermecassol@hotmail.com* Autor de correspondência.

³ Departamento de Biologia, Universidade Federal de Santa Maria, (UFSM), 97105-900, Santa Maria, RS.

soja. Houve redução significativa na taxa de assimilação líquida de CO₂ (TAL) e na taxa de transpiração independente do estágio de implantação do déficit hídrico quando comparado ao tratamento controle. Semelhantemente, o número de nódulos por planta e a massa seca de nódulos foi significativamente menor quando o déficit hídrico ocorreu nesses estádios. Para o rendimento de grãos, a implantação do déficit hídrico no estágio R5, durante o período de enchimento de grãos, resultou em maiores perdas na produtividade de soja.

Palavras chave: *Glycine max*, irrigação, estresse oxidativo, rotação de culturas.

ABSTRACT

The objective of this work was to determine the sensitivity of soybean to water deficit as a function of the stage of development of the crop and its effects on photosynthesis, oxidative stress, biological nitrogen fixation and grain yield in the lowlands. The experiment was conducted in a factorial scheme (3x2) with a completely randomized design and four replications. Factor A was composed of the stages of soybean development: A1 = V6; A2 = R2; A3 = R5 and factor D by the levels: D1 = control without water deficit and D2 = with water deficit. During periods of water deficit, soil moisture was maintained at 30-40% of vessel capacity (CV) for 10 consecutive days. The variables evaluated were transpiration rate, net CO₂ assimilation rate, nodules per plant, nodule viability, nodule dry mass per plant, and grain yield of soybean. There was a significant reduction in the net CO₂ assimilation rate (TAL) and in the transpiration rate independent of the water deficit implementation stage when compared to the control treatment. Similarly, the number of nodules per plant and the nodule dry mass was significantly lower when the water deficit occurred at these stages. For grains yield, the implantation of the water deficit at the R5 stage, during the period of grain filling, resulted in greater losses in soybean yield.

Keywords: *Glycine max*, irrigation, oxidative stress, crop rotation.

INTRODUÇÃO

A utilização da soja em rotação com o arroz irrigado constitui-se em uma alternativa importante para o manejo de plantas daninhas de difícil controle (ZEMOLIN et al., 2014), quebra do ciclo de pragas e doenças, melhoria dos atributos químicos e físicos do solo (THOMAS, et al., 2000), redução de custos e diversificação de renda no sistema produtivo do arroz. Apesar dos benefícios desta rotação, o cultivo de soja em terras baixas é considerado uma atividade de alto risco devido aos estresses que comumente atuam neste ambiente (MARCHESAN, 2013).

O estresse hídrico é uma das limitações mais importantes para a produção de soja em terras baixas. Nos períodos iniciais de desenvolvimento da cultura, o excesso hídrico, em função da dificuldade de drenagem das áreas baixas, pode reduzir a nodulação, predispor a incidência de doenças de solo, ocasionar morte de plantas de soja e redução no estande da lavoura (THOMAS, et al., 2000). Em contrapartida, a baixa capacidade de armazenamento de água no solo associada à presença de uma camada compactada próxima à superfície do mesmo pode intensificar a ocorrência de períodos de deficiência hídrica, impactando processos fisiológicos importantes como a fotossíntese e a fixação biológica de nitrogênio.

A fixação biológica de nitrogênio (BNF) é o processo fisiológico mais sensível ao estresse hídrico (SERRAJ, 1999; PURCELL, 2014). Em condições de déficit hídrico, a BNF é paralisada antes mesmo da expansão foliar, condutância estomática e fotossíntese (OLIVEIRA et al., 2013). Além disso, a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) constitui-se em compostos tóxicos para as células, causando danos em membranas, proteínas, lipídeos e DNA (KAUSAR et al., 2012; FANAEI et al., 2015). Estas restrições podem limitar significativamente o crescimento e desenvolvimento das plantas de soja no ambiente de rotação com o arroz irrigado.

No Brasil, os efeitos do excesso hídrico na cultura da soja em terras baixas têm sido amplamente estudados (LANZA et al., 2013, THOMAS et al., 2010). Entretanto, a influência da deficiência hídrica sobre a fotossíntese, fixação biológica de nitrogênio e produção de espécies reativas de oxigênio ainda carece de mais estudos para melhor entendimento destas interrelações e otimização do manejo da irrigação em áreas de rotação com arroz. Em termos de manejo de irrigação, a determinação dos estádios fenológicos mais sensíveis à deficiência hídrica é imprescindível para aumentar a eficiência desta prática e assegurar a expressão do potencial produtivo da soja em rotação com o arroz. Portanto, este trabalho teve como objetivo identificar alterações fisiológicas em plantas de soja submetidas ao déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos da cultura, bem como seus efeitos na nodulação e rendimento de grãos de plantas de soja em terras baixas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido durante a safra 2014/15, em casa de vegetação com controle de umidade e temperatura do ar, localizada na área didático experimental de várzea, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul. As unidades experimentais foram compostas por baldes plásticos com capacidade máxima de oito litros. Os vasos foram preenchidos com seis quilos de solo previamente destorroado e peneirado, sendo o mesmo coletado em área de terras baixas. Após a coleta, foi realizada a correção do solo utilizando-se calcário dolomítico com PRNT de 91%. As quantidades de corretivo e fertilizantes empregadas seguiram à análise de solo e as recomendações de adubação e calagem para o cultivo da soja no Sul do Brasil (EMBRAPA, 2014). O solo é classificado como Planossolo Háptico eutrófico arênico, pertencente à unidade de mapeamento Vacacaí (EMBRAPA, 2014).

O experimento foi conduzido em arranjo fatorial (3x2) com delineamento inteiramente casualizado (DIC) e quatro repetições. O fator A foi composto pelos estádios de desenvolvimento da soja conforme escala proposta por Fehr and Caviness, 1976: A1= V6 (seis trifólios completamente expandidos); A2= R2 (Florescimento pleno); A3= R5 (início do enchimento de grãos) e o fator D pela implementação do déficit hídrico: D1= testemunha controle sem déficit hídrico e D2= déficit hídrico por período de 10 dias. O déficit hídrico foi caracterizado pela manutenção do conteúdo de água no solo em 30-40% da capacidade de vaso (CV) por 10 dias consecutivos. Ao final desse período, o conteúdo de água no solo foi reestabelecido para 70-80% da CV e mantido nessa condição para o restante do ciclo da cultura. Para os tratamentos controle (testemunha), sem déficit hídrico, o conteúdo de água no solo foi mantido em 70-80% da CV durante todo o período de condução do experimento.

As unidades experimentais foram pesadas diariamente para reposição do volume de água necessário para cada tratamento. A reposição de água em cada unidade experimental foi efetuada com auxílio de canos plásticos instalados na porção lateral do vaso, a fim de evitar a compactação do solo pela adição de água em superfície. A capacidade de vaso foi determinada previamente à realização do experimento, seguindo-se metodologia proposta por CASAROLI & JON VAN LIER, 2008.

A semeadura foi realizada no dia 3 de outubro de 2014 com 4 sementes de soja por vaso à profundidade de 2 cm. Após a emergência, realizou-se o desbaste deixando-se apenas uma planta para cada unidade experimental. O critério utilizado para o desbaste foi a padronização dos estádios das plântulas em cada vaso. Utilizou-se a cultivar de soja Nidera 6209 RR, de tipo de crescimento determinado e grupo de maturação 6.0. Os demais tratamentos culturais foram efetuados seguindo-se as indicações técnicas da pesquisa para cultivo da soja na região Sul do Brasil (EMBRAPA, 2014).

As avaliações realizadas no experimento compreenderam aspectos relacionando ao crescimento e desenvolvimento das plantas de soja, fotossíntese e fixação biológica de nitrogênio (BNF). A matéria seca de raízes e da parte aérea foi avaliada através da coleta das plantas e separação entre parte aérea e raiz ao final do período de déficit hídrico e em todos os estádios de desenvolvimento avaliados. Após a coleta, as plantas foram lavadas e secas em estufa com circulação forçada de ar em temperatura de 65°C até a obtenção de massa constante, sendo posteriormente quantificadas em balança de precisão.

O número de nódulos por planta maiores que 0,002 m de diâmetro foi determinado pela contagem dos mesmos na raiz principal e nas raízes secundárias ao término de cada tratamento. Após a contagem, os nódulos foram seccionados para a determinação da viabilidade segundo metodologia proposta por VIEIRA NETO et al. (2008). Para obtenção da matéria seca dos nódulos, após a avaliação da viabilidade, os mesmos foram levados à estufa com circulação forçada de ar em temperatura de 65 °C até peso constante, obtendo-se posteriormente, a massa seca em balança de precisão. O teor médio de nitrato e ureídeos nas folhas e no caule das plantas de soja foi determinado com base nos procedimentos descritos para determinação de carbono e nitrogênio (EMBRAPA, 2014).

A estatura de plantas e o comprimento de raiz foram avaliadas nas mesmas plantas coletadas para a determinação de nódulos. As plantas foram coletadas e levadas para laboratório onde separaram-se as partes aéreas das raízes, com mensuração posterior utilizando uma régua milimetrada. A estatura foi determinada considerando-se o intervalo entre o primeiro nó da base até a extremidade superior da planta e o comprimento da raiz mensurado na região pivotante.

Para determinação do estresse oxidativo, coletou-se o terceiro trifólio expandido das plantas do ápice para a base ao término de cada tratamento. Após a coleta, foram determinados em laboratório os seguintes parâmetros: atividade da enzima catalase (CAT),

atividade da enzima dismutase do superóxido (SOD), atividade da enzima peroxidase (POD), peróxido de hidrogênio e peroxidação lipídica. As avaliações foram realizadas conforme metodologia proposta por TABALDI et al. (2009). Os aspectos relacionados à Fotossíntese, como assimilação líquida de CO₂, condutância estomática, transpiração e concentração intercelular de CO₂ foram realizadas com auxílio do equipamento Infra-red gas analyser (IRGA) de modelo Li-6400 XT (LI-COR Inc.) concomitantemente a coleta de folhas para o estresse oxidativo.

O número de legumes por planta, número de grãos por legume e massa de mil grãos foram obtidos por intermédio da contagem e pesagem nas mesmas plantas coletadas para determinação da massa da parte aérea e raiz no estágio R8 (por ocasião da colheita). Posteriormente, foi quantificada a produtividade individual por plantas mediante a colheita manual das unidades experimentais. Após a colheita foi realizada a trilha, pesagem e retirada da impureza com a verificação do grau de umidade de cada amostra, corrigindo-se para 13% de umidade.

Os dados obtidos foram analisados previamente quanto ao atendimento das pressuposições da análise de variância (independência, normalidade e homocedasticidade dos erros) e então, submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$). Análises de regressão polinomial e de comparação de médias pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) foram utilizadas para discriminar diferenças entre os tratamentos avaliados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A deficiência hídrica influenciou diretamente o acúmulo de matéria seca de parte aérea (MSPA) (Figura 1A), estatura de plantas (Figura 1B), número de nódulos por planta (Figura 1C), número de nódulos viáveis (Figura 1D), a massa seca de nódulos (Figura 1E) e abundância relativa de ureídos (Figura 1F). Houve redução na MSPA das plantas comparadas

ao tratamento controle nos estádios reprodutivos R2 (Florescimento pleno) e R5 (Enchimento de grãos). Já para a variável estatura de plantas, a redução observada ocorreu em menor intensidade em todos os estádios fenológicos avaliados.

A soja atinge a máxima exigência hídrica na floração e enchimento dos grãos (7 a 8 mm.dia⁻¹), sendo que o estresse hídrico neste período pode ocasionar problemas fisiológicos graves que acarretam queda prematura de folhas e conseqüente redução de produtividade (SIMEÃO, 2015). Essa maior exigência hídrica pode explicar a redução na MMSPA quando as plantas foram submetidas ao estresse hídrico nos estádios R2 e R5. Além disso, a redução nessa variável pode ser decorrente da combinação da redução do número de folhas e do índice de área foliar por planta em virtude do estresse (SIMEÃO, 2015). Associado a isso, a baixa disponibilidade de água no solo para as plantas e uma taxa transpiratória excessiva promovem o fechamento estomático, paralisando o processo fotossintético e acarretando em reduções na quantidade de biomassa (FANCELLI & DOURADO NETO, 2000).

Redução na estatura de plantas de soja também foi observada por SIMEÃO (2015) em estudo realizado com a cultivar BRS Sambaíba RR e por SOUSA & LIMA (2010) em estudo com a cultura do feijoeiro cultivar Carioca comum. CORREIA & NOGUEIRA (2004) evidenciaram o mesmo comportamento na cultura do amendoim. Quando submetida ao estresse hídrico, a planta tende a reduzir do turgor celular, o qual diminui a condutância estomática e a expansão das células, restringindo a fotossíntese e o crescimento das plantas (RIES et al., 2012). A redução de crescimento também está associada a alterações no metabolismo do carbono e nitrogênio (VIEIRA, 2011).

O número e massa seca de nódulos não foram influenciados pelo déficit hídrico durante 10 dias consecutivos para os estádios fenológicos V6 e R5. No entanto, houve redução significativa nestas variáveis quando o déficit hídrico foi implementado durante o período de florescimento pleno da cultura. Resultado semelhante foi observado por PRETE et

al. (2012) quando plantas de soja da cultivar BRS-232 foram submetidas ao estresse hídrico no florescimento pleno. De acordo com os autores, após três dias de déficit hídrico, houve redução de 50% no número de nódulos e de 67% da massa de nódulos em relação ao controle sem estresse hídrico.

O período de maior nodulação ocorre nos estádios R1, R2 e R5, se refletindo em uma intensificação do crescimento do número e da massa seca dos nódulos (CÂMARA, 2014), os quais coincidem com a maior demanda de N pela planta. Sendo assim, a restrição hídrica compromete a sobrevivência e a persistência do rizóbio bem como colonização e a infecção do sistema radicular (ZAHARAN, 1999; MHADHBI et al., 2011), refletindo em redução da FBN e, conseqüentemente, da produtividade da cultura (PURCELL & SPECHT, 2004).

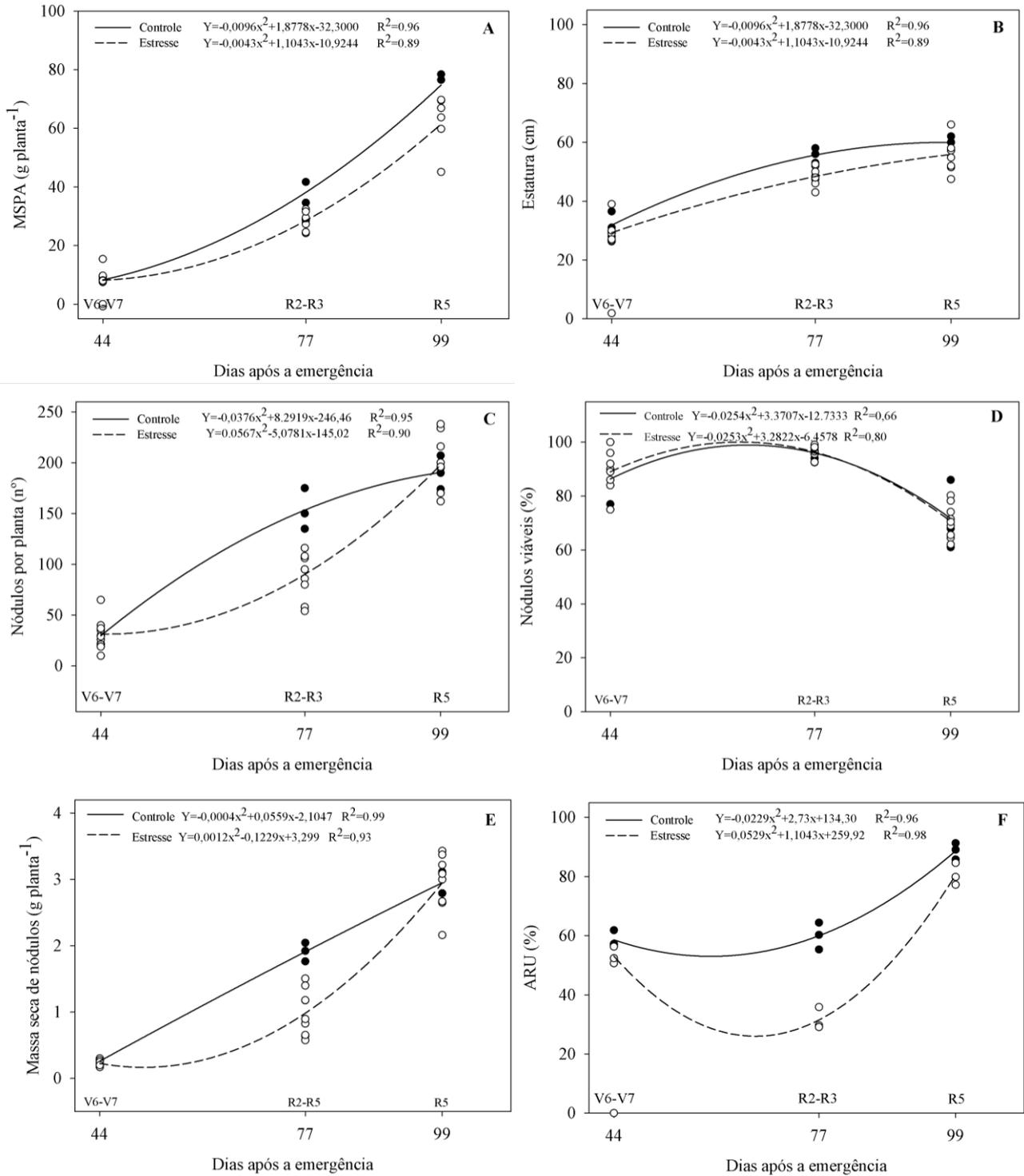


Figura 1. Matéria seca da parte aérea (A), estatura de plantas (B), número de nódulos por planta (C), viabilidade de nódulos (D), massa seca de nódulos (E) e abundância relativa de ureídeos (F) em função da deficiência hídrica em três estádios fenológicos das plantas de soja.

Santa Maria, RS, 2016.

Houve redução significativa na taxa de assimilação líquida de CO₂ (TAL) (Figura 2A), na taxa de transpiração (Figura 2B), na condutância estomática (Figura 2C) e na concentração interna de CO₂ (Figura 2D) em folhas de plantas de soja submetidas à deficiência hídrica, independente do estágio de implantação do déficit hídrico, quando comparada ao tratamento controle. No entanto, maiores reduções de desempenho dessas variáveis foram observadas durante o estágio R2 e R5 da cultura. Em estudo realizado com a cultura do amendoim, NOGUEIRA & SANTOS (2000) constataram que os ciclos de estresse hídrico impostos à cultura provocaram redução de 75% na transpiração em relação ao tratamento controle nos primeiros 15 dias de estresse, culminando com o fechamento estomático ao final dos 45 dias. SALINET (2009) também observou redução da taxa fotossintética e transpiratória, bem como da condutância estomática em plantas de soja submetidas ao estresse hídrico durante os estádios R1 e R2.

Durante a restrição hídrica a planta fecha seus estômatos para prevenir a perda de água (STUHFAUTH et al., 1990; OHASHI et al., 2006), resultando, primeiramente, na queda da condutância estomática (LEI et al., 2006). Além disso, o fechamento estomático limita a difusão de CO₂ dos espaços intercelulares para dentro do cloroplasto em resposta ao aumento na concentração do ácido abscísico (ABA) nessas condições de estresse (CORNIC, 2000; LIMA et al., 2002). De acordo com INAMULLAH & ISODA (2005) há uma correlação positiva entre taxa transpiratória, condutância estomática e taxa de assimilação de CO₂ para a soja. A redução na condutância estomática limita a perda de água por transpiração o que resulta em maior temperatura foliar (SALINET, 2009). Esse aumento de temperatura diminui a assimilação de CO₂ devido a danos fotoinibitórios ao aparelho fotossintético (LI, et al., 2004).

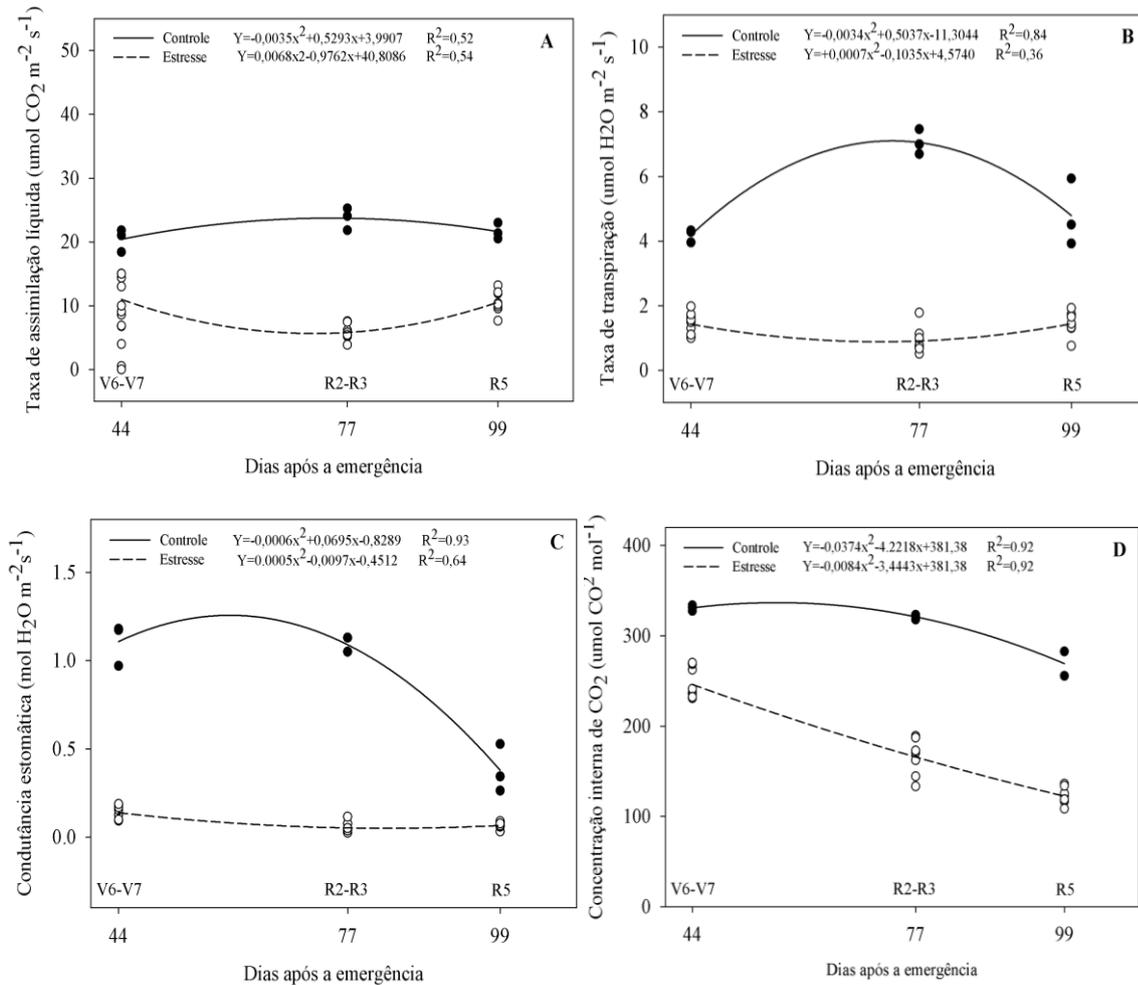


Figura 2. Taxa de assimilação líquida (A), taxa de transpiração (B), condutância estomática (C) e concentração interna de CO_2 (D) em folhas de plantas de soja submetidas à deficiência hídrica em três estádios fenológicos da cultura. Santa Maria, RS, 2016.

O estresse hídrico provocou um aumento na peroxidação lipídica de plantas de soja (Figura 3A), bem como na atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) (Figura 3B), no conteúdo de carotenóides (Figura 3C), principalmente nos estádios fenológicos R2 e R3. Esses resultados podem ser explicados pelo fato do estresse hídrico provocar uma redução na fotossíntese e aumentar a respiração, promovendo

um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) (PEREIRA et al., 2012). Esse aumento na produção de ROS, por sua vez, desencadeia uma sequência de eventos, iniciada pela peroxidação dos lipídeos, avançando para a degradação das membranas e a morte celular (JALEEL et al., 2009). Como consequência, a planta desenvolve mecanismos para proteção aos danos oxidativos, como o sistema de defesa não enzimático, dentre os quais os carotenoides e, enzimático, como a superóxido dismutase e a peroxidase (BARBOSA et al., 2014). Os resultados obtidos neste experimento evidenciam que apesar de ter ocorrido um aumento nos níveis dos compostos antioxidantes em condição de déficit hídrico, estes não foram suficientes para controlar as ROS, acarretando em aumento da peroxidação lipídica nos tecidos da planta.

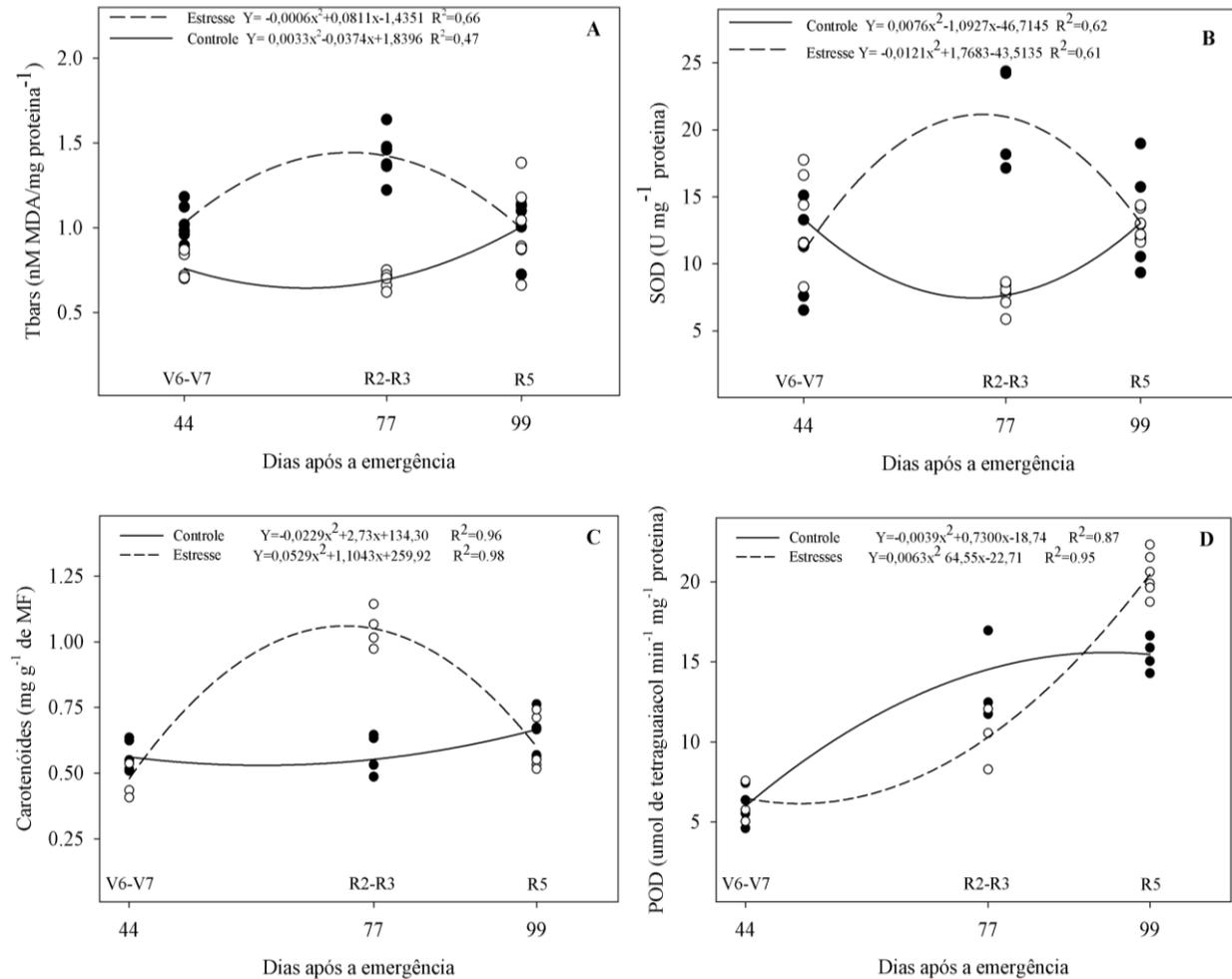


Figura 3. Peroxidação lipídica (Tbars) (A), atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) (B), conteúdo de carotenóides (C) e atividade da enzima peroxidase (POD) (D) em função dos dias após a emergência na cultura da soja. Santa Maria, RS, 2016.

O rendimento de grãos (Figura 4A) e a massa de mil grãos de soja (Figura 4B) foram reduzidos significativamente quando o estresse hídrico ocorreu no estágio R5 da cultura. Resultado similar foi verificado por DESCLAUX et al. (2000), os quais avaliaram os efeitos do estresse hídrico em diferentes estágios de desenvolvimento de plantas de soja e puderam observar uma redução no número de grãos por vagem e peso de grãos quando o estresse ocorreu no estágio R5. Estes resultados podem ser explicados pelo fato de que a deficiência hídrica, durante o enchimento de grãos, reduz o tamanho e peso do grão, devido à redução do

suprimento de fotoassimilados pela planta e/ou inibição do metabolismo do grão (SALINAS et al., 1996). A redução de rendimento pode ocorrer também devido à diminuição da atividade fotossintética da folha e pela menor remobilização de C e N para os grãos (SOUZA et al., 1997).

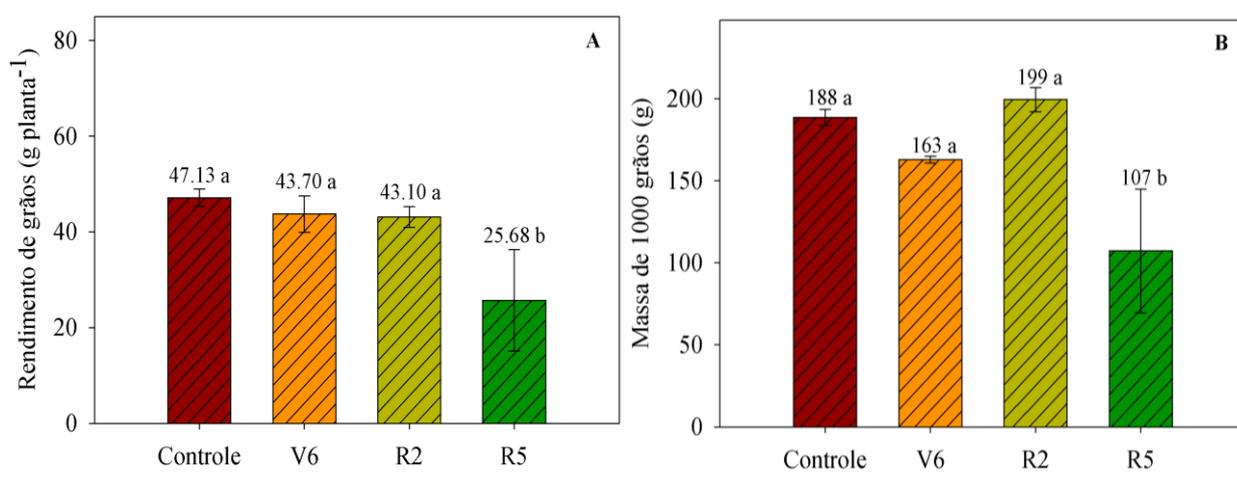


Figura 4. Rendimento de grãos (A) e massa de 1000 grãos (B) em de plantas de soja submetidas à deficiência hídrica em três estádios fenológicos da cultura. Santa Maria, RS, 2016.

CONCLUSÕES

A deficiência hídrica reduz a nodulação, fixação biológica de nitrogênio e fotossíntese das plantas de soja em terras baixas, ao passo que aumenta o estresse oxidativo, principalmente durante o período de florescimento da cultura. No entanto, o período de enchimento de grãos apresenta-se como mais sensível ao déficit hídrico com reduções significativas de rendimento de grãos de soja em áreas de rotação com arroz.

REFERENCIAS

BARBOSA, M. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, v.44, n.3, p. 453-460, 2014. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/cr/v44n3/a7914cr2013-0032.pdf>. Acesso em 03 jan. 2017. doi: 10.1590/S0103-84782014000300011.

CÂMARA, G. M. S. Fixação biológica de nitrogênio em soja. Informações Agronômicas. **International Plant Nutrition Institute**, n. 147, 9p., 2014. Disponível em [http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/B7FB85D4FAD745CF83257D660046A90D/\\$FILE/Page1-9-147.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/B7FB85D4FAD745CF83257D660046A90D/$FILE/Page1-9-147.pdf). Acesso em 03 nov. 2016.

CASAROLI, D.; JONG VAN LIER, Q. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32,n. 1, p.59-66, 2008. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v32n1/07.pdf>. Acesso em 29 dez. 2016. doi: 10.1590/S0100-06832008000100007.

CORNIC, G. Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture – not by affecting ATP synthesis. **Trends in Plant Science**, v. 5, n. 5, p.187-188, 2000. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/248501008>. Acesso em 04 jan. 2017. doi: 10.1016/S1360-1385(00)01625-3.

CORREIA, K. G.; NOGUEIRA, R. J. M.C. Avaliação do crescimento do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetido a déficit hídrico. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. v. 4, n. 2, p. 1-8, 2004. Disponível em <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50040214>. Acesso em 04 jan. 2017.

DESCLAUX, D. et al, 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://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/40/3/716?access=0&view=pdf>. Acesso em 04 jan. 2017. doi:10.2135/cropsci2000.403716x.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (2014). **Technical indications for the soybean crop in Rio Grande do Sul and Santa Catarina, harvest 2012/2013 and 2013/2014** / 39th ed Meeting of Soybean Research in the Southern Region – Passo Fundo, 2014. 142 p.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Déficit de água e temperatura na cultura de feijão**. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Feijão irrigado: estratégias básicas de manejo. Piracicaba: Publique, p.155-169, 2000.

INAMULLAH, I; ISODA, A. Adaptative responses of soybean and cotton to water stress II. Changes in CO₂ assimilation rate, chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in relation to leaf temperature. **Plant Production Science**, v. 8, n. 2, p. 131-138, 2005. Disponível em <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1626/pps.8.131?needAccess=true>. Acesso em 29 dez. 2016. doi: 10.1626/pps.8.131.

JALEEL, C. A. et al. Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints. **Acta Physiology Plant**, v.31, n.3, p.427-436, 2009. Disponível em <http://link.springer.com/article/10.1007/s11738-009-0275-6>. Acesso em 05 jan. 2017. doi: 10.1007/s11738-009-0275-6.

LANZA, L. M. N. et al. Adubação nitrogenada beneficia soja alagada. **Bragantia**, v. 72, n. 1, p.2-9, 2013. Disponível em http://www.scielo.br/pdf/brag/v72n1/aop_1631_13.pdf. Acesso em 29 dez. 2016.

LEI, W. Effect of drought and rewatering on photosynthetic physioecological characteristics of soybean. **Acta Ecologica Sinica**, v. 26, n. 7, p. 2073-2078, 2006. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872203206600334>. Acesso em 05 jan. 2017. doi:10.1016/S1872-2032(06)60033-4.

- LI, F. et al. Interactive effects of elevated CO₂, nitrogen and drought on leaf area, stomatal conductance and evapotranspiration on wheat. **Agricultural Water Management**, v. 67, n. 3, p. 221-233, 2004. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377404000514>. Acesso em 02 jan. 2017. doi: 10.1016/j.agwat.2004.01.005.
- LIMA, A. L. S. et al. Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffea canefora* under déficit conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 47, n. 3, p. 239-247, 2002. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847201001307>. Acesso em 03 jan. 2017. doi: 10.1016/S0098-8472(01)00130-7.
- MARCHESAN, E. Desafios e perspectivas de rotação com soja em áreas de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria, **Anais...**Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2013. p. 1628-1637.
- MHADHBI, H. et al. A highly osmotolerant rhizobial strain confers a better tolerance of nitrogen fixation and enhances protective activities to nodules of *Phaseolus vulgaris* under drought stress. **African Journal of Biotechnology** v. 10, n. 22, p. 4555-4563, 2011. Disponível em <http://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/94117/83518>. Acesso em 10 out. 2016. doi: 10.5897/AJB10.1991.
- NOGUEIRA, R. J. M. C.; SANTOS, R. C. Alterações fisiológicas no amendoim submetido ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.1, p.41-45, 2000. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v4n1/v4n1a08.pdf>. Acesso em 02 jan. 2017. doi: 10.1590/S1415-43662000000100008.
- OHASHI, Y. et al. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. **Biologia Plantarum**, v. 50, n. 1, p. 138-

141, 2006. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/225506417>. Acesso em 29 dez. 2016. doi: 10.1007/s10535-005-0089-3.

PEREIRA, J. W. L. et al. Mudanças bioquímicas em s de amendoim submetidos a déficit hídrico moderado. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.4, p.766-773, 2012. Disponível em <http://www.ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/1801/757>. Acesso em 05 jan. 2017.

PRESTE, C. E. C. et al. Fixação biológica de nitrogênio em soja sob déficit hídrico. **VI Congresso Brasileiro de Soja**. Cuiabá, MT, 2012.

PURCELL, L.C.; SPECHT, J. E. Physiological traits for amelioration drought stress. In: BOERMA, H. R.; SPECHT, J. E. **Soybeans: Improvement, production and uses**. Madison: American Society of Agronomy, 2004. 1180p.

RIES, L.L. et al. Physiological traits contributing to differential canopy wilting in soybean under drough. *Crop Science*, v. 52, n. 1, p. 272-281, 2012. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/270477374>. Acesso em 02 jan. 2017. doi: 10.2135/cropsci2011.05.0278.

SALINAS, A.R. et al. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiência hídrica em el suelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.5, p.331-338, 1996. Disponível em <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/104086>. Acesso em 02 jan. 2017.

SALINET, L. H. **Avaliação fisiológica e agronômica de soja geneticamente modificada para maior tolerância à seca**. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia e Bioquímica de plantas) – Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

SERRAJ, R. et al. Symbiotic N₂ fixation response to drought. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 2, p.143–155, 1999. Disponível em

<http://jxb.oxfordjournals.org/content/50/331/143.full.pdf+html>. Acesso em 05 jan. 2017. doi: 10.1093/jxb/50.331.143.

SIMEÃO, M. **Crescimento e produtividade de grãos de soja sob déficit hídrico no solo**. 2015. 76f. Dissertação (Mestrado em Uso e Manejo de Solo e Água) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal do Piauí.

SOUZA, M. A.; LIMA, M. D. B. Influência da supressão da irrigação em estádios de desenvolvimento do feijoeiro cv. carioca comum. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 4, p. 550-557, 2010. Disponível em

<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7134/5129>. Acesso em 30 dez.2016.

SOUZA, P.I. et al. Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. **Agronomy Journal**, v.89, n.5, p.807-812, 1997. Disponível em <https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/89/5/AJ0890050807>. Acesso em 29 dez.2016. doi:10.2134/agronj1997.00021962008900050015x.

THOMAS, A. L. et al. Rendimento de grãos de cultivares de soja em solo de várzea. Pesquisa Agropecuária Gaúcha, v. 6, n. 1, p.107-112, 2000. Disponível em http://www.fepagro.rs.gov.br/upload/1398890972_art_11.pdf. Acesso em 05 jan. 2017.

STUHFAUTH, T. et al., Light energy dissipation under water stress condition. **Plant Physiology**, v. 92, n. 4, p.1053-1061, 1990. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1062415/pdf/plntphys00677-0197.pdf>.

Acesso em 30 dez. 2016.

TAIZ, L., ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4 Ed. Porto Alegre-RS, 2009, 819p.

VIEIRA, J. G. **Aplicação exógena de ácido salicílico em feijoeiro**. 2011. 48f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade do Oeste Paulista.

VIEIRA NETO, S. A. et al. Forms of inoculant application and the effects in soybean crop. **Bioscience Journal**, v. 24, n. 2, p. 56-68, 2008. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/299051261>. Acesso em 30 dez. 2016.

ZAHRAN, H.H. *Rhizobium*-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**. v. 63, n. 4, p. 968–989, 1999.

ZEMOLIN, C. R. et al. Red rice control and soybean tolerance to S-metolachlor in association with glyphosate. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 1, p. 2040-2047, 2014. Disponível em http://file.scirp.org/pdf/AJPS_2014062611380786.pdf. Acesso em 02 jan. 2017. doi: 10.4236/ajps.2014.513219.

4 DISCUSSÃO

A rotação do arroz irrigado com soja constitui-se em prática de manejo extremamente importante para viabilizar a sustentabilidade do sistema produtivo de arroz no Rio Grande do Sul. No entanto, apesar da expansão de cultivo da soja em terras baixas na última década, as produtividades médias obtidas em lavouras comerciais tem se mantido estagnadas, na ordem de 2.200 kg ha⁻¹ (IRGA, 2016) e muitas vezes não compensam o custo de produção da cultura neste ambiente. Dessa forma, é necessário adequar as práticas de manejo de implantação da lavoura e condução da cultura a fim de lograr rendimentos de grãos mais elevados.

As terras baixas do RS caracterizam-se pelo ambiente hidromórfico, com baixa condutividade hidráulica no perfil do solo e dificuldade de drenagem em função da posição geográfica ocupada no terreno. Além disso, as áreas cultivadas com arroz irrigado possuem uma camada adensada (compactada) na camada subsuperficial do solo. A região de maior adensamento se encontra na camada de 05 - 15 cm de profundidade e esta resulta de práticas de preparo da área efetuadas com teor de umidade do solo excessivo. Na região da camada compactada, há redução principalmente da quantidade de macroporos (SARTORI et al., 2015), os quais possuem função importante na aeração do solo e também na drenagem do excesso de água.

O excesso hídrico é o fator mais limitante para produção de soja em terras baixas. Nesse sentido, a adequação da área visando a melhoria do sistema de drenagem é etapa fundamental para a obtenção de altos rendimentos de soja em rotação com arroz. O uso de camalhões, por exemplo, facilita a drenagem da área pelo escoamento de água através dos sulcos que são formados entre as cristas dos mesmos. Além disso, o processo de confecção de camalhões auxilia no rompimento de parte da camada compactada, propiciando melhores condições para drenagem, aeração, crescimento e desenvolvimento radicular das plantas de soja. Tais melhorias proporcionam um ambiente de desenvolvimento mais equilibrado, aumentando a tolerância das plantas de soja à ocorrência de estresses. Como resultado, há geralmente um incremento de produtividade de soja na ordem de 7 a 10% em relação ao cultivo em áreas planas, sem sulcos e/ou camalhões.

A irrigação é outra prática de manejo importante para assegurar a expressão do potencial produtivo de soja em terras baixas. A baixa capacidade de armazenamento de água no solo associado aos agravantes da compactação podem limitar significativamente a disponibilidade de água para cultura, provocando perda do potencial de produção. Em terras

baixas, a deficiência hídrica (conteúdo de água no solo abaixo de 60% da capacidade de campo ou aproximadamente -60 kPa para a tensiometria) pode ser atingida entre 5 a 7 dias consecutivos sem chuva, dependendo do tipo de solo, estágio fenológico e manejo da cultura. Em resposta à deficiência hídrica, há redução na condutância estomática, taxa de transpiração e assimilação de CO₂, paralisando a expansão foliar, fixação biológica de nitrogênio e o acúmulo de matéria seca pelas plantas de soja. Ainda, caso a intensidade do déficit hídrico aumente, ocorre incremento gradual do estresse oxidativo, degenerando membranas, lipídeos e proteínas estruturais necessárias ao metabolismo vegetal.

Em função da mitigação desses efeitos, a irrigação pode incrementar a produtividade de soja mesmo sob períodos curtos de estresse hídrico. De modo geral, observa-se incremento de 7 a 8% (4 a 5 sacas de soja) na produtividade para cada irrigação efetuada no cultivo em terras baixas. No entanto, se o déficit hídrico ocorrer durante o período de enchimento de grãos (R5) a suplementação hídrica pode aumentar o rendimento de grãos em até 40%. Cabe ressaltar que estes incrementos somente serão possíveis se a irrigação for manejada adequadamente, com tempos de irrigação inferiores a 12 horas e retirada completa do excesso de água da área em no máximo 24 horas após o término da prática. Neste sentido, o uso de sulcos e/ou camalhões facilita a condução da irrigação e pode proporcionar economia no uso de água entre 15 a 25% em relação ao método de irrigação por faixas em cota zero.

O aumento dos níveis de produtividade da soja em terras baixas deve englobar práticas de manejo que possibilitem assegurar a sustentabilidade do sistema produtivo. A sustentabilidade está associada com a transição para sistemas de produção mais conservacionistas, com revolvimento mínimo do solo e uso de plantas de cobertura durante o período de entressafra com o intuito de ciclar nutrientes e controlar perdas de solo. O azevém é a planta de cobertura com maior adaptação e expressividade em terras baixas, sendo utilizado não somente para cobertura de solo como para pastejo animal durante o período de inverno. Em cobertura de solo, há necessidade de regular a quantidade de palha remanescente sobre a superfície do mesmo para não prejudicar os processos de semeadura e estabelecimento da soja em áreas de rotação com o arroz, pois o ambiente de terras baixas possui características completamente diferentes das condições encontradas em terras altas.

A época de dessecação do azevém pode ser uma alternativa utilizada para este propósito. De acordo com os trabalhos realizados, observa-se que dessecações entre 20 e 90 dias antes da semeadura da soja ou quantidades de palha de azevém remanescente sobre a superfície do solo entre 500 e 3000 kg ha⁻¹ não influenciam o rendimento de grãos de soja em

rotação com arroz. No entanto, dessecações com intervalos menores que 60 dias ou que proporcionem quantidades de palha superiores a 1000 kg ha^{-1} aumentam significativamente a retenção de umidade do solo, reduzindo a janela disponível para a semeadura da soja em terras baixas. Neste cenário, o produtor deve dispôr de planejamento compatível com a infraestrutura de máquinas e recursos humanos adequada para realizar o processo de semeadura dentro da janela ótima para plantio da cultura neste ambiente.

Por outro lado, a semeadura da soja sobre palhada de azevém proporciona redução das oscilações de temperatura e umidade do solo, criando um ambiente mais favorável para o desenvolvimento de nódulos e aumento da fixação biológica de nitrogênio (BNF). Este processo, por sua vez, é responsável pelo fornecimento de 65 a 80% do nitrogênio assimilado pelas plantas de soja em terras baixas. Ainda, observa-se o crescimento da participação da BNF a medida que obtém rendimentos de grãos mais elevados.

Em suma, práticas de manejo como a utilização de camalhões e irrigação são importantes para mitigar a ocorrência de estresses e aumentar o rendimento grãos de soja em terras baixas. A adoção de sistemas conservacionistas com utilização de plantas de cobertura e mínimo revolvimento do solo apresenta-se com excelente perspectiva para melhoria do sistema produtivo, porém necessita de mais pesquisas direcionadas para o desenvolvimento destas práticas nos cultivos em terras baixas.

CONCLUSÕES

A fixação biológica de nitrogênio é um dos processos fisiológicos mais importantes para a produção de soja em rotação com arroz irrigado. A contribuição da BNF na assimilação de nitrogênio aumenta à medida que se obtém níveis mais elevados de rendimento de grãos da cultura em terras baixas.

Dessecações entre 20 e 90 dias antes da semeadura da soja ou quantidades de palha de azevém remanescente sobre a superfície do solo entre 500 e 3000 kg ha⁻¹ não influenciam o rendimento de grãos de soja em rotação com arroz. No entanto, dessecações com intervalos menores que 60 dias ou que proporcionem quantidades de palha superiores a 1000 kg ha⁻¹ aumentam significativamente a retenção de umidade do solo, reduzindo a janela disponível de semeadura da soja em terras baixas.

O cultivo da soja em camalhões aumenta o rendimento de grãos e reduz o uso de água para a irrigação em comparação a semeadura sem camalhões. A irrigação se manejada adequadamente, aumenta a nodulação, fixação biológica de nitrogênio e o rendimento de grãos de soja em áreas de rotação com arroz irrigado.

A deficiência hídrica durante o estágio R2 (florescimento pleno) da soja reduz a nodulação, fixação biológica de nitrogênio, fotossíntese e aumenta o estresse oxidativo quando comparadas a condições sem estresse. No entanto, a supressão da demanda de água da cultura durante o estágio R5 (enchimento de grãos), provoca reduções mais significativas no rendimento de grãos da soja em terras baixas.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINETTO, D. et al. Arroz-vermelho: Ecofisiologia e estratégias de controle. **Ciência Rural**, v.31, n.2, p.341-349, 2001.
- AMARANTE, L.; SODEK, L. Waterlogging effect on xylem sap glutamine of nodulated soybean. **Biologia Plantarum**, v. 50, p. 405-410, 2006.
- ARMSTRONG, W.; BRANDLE, R.; JACKSON, M.B. Mechanisms of flood tolerance in plants. **Acta Botanica Neerlandica**, v.43, n.1, p.307-358, 1994.
- CATUCHI, T.A. et al. Tolerance to water deficiency between two soybean cultivars: transgenic versus conventional. **Ciência Rural**, v. 31, n. 3, p. 373-378, 2011.
- CHOUHARY, V.K. et al. Response of tillage and in situ moisture conservation on alteration of soil and morpho-physiological differences in maize under Eastern Himalayan region of India. **Soil and Tillage Research**, v.134, n.2, p.41-48, 2013.
- DENNIS, E.S. et al. Molecular strategies for improving waterlogging tolerance in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.51, n.342, p.89-97, 2000.
- FAGAN, E.B. et al. Fisiologia da fixação biológica do nitrogênio em soja – Revisão. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, v.14, n.1, p.89-106. 2007.
- FAHONG, W. et al. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China. **Field Crops Research**, v.87, n.2, p.35-42, 2004.
- FANTE, C. A. et al. Respostas fisiológicas em cultivares de soja submetidas ao alagamento em diferentes estádios. **Bragantia**, v. 69, n. 2, p. 253-261, 2010.
- GOMES, A.S. et al. Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase as áreas de várzea do Rio Grande do Sul. Pelotas: **Embrapa Clima Temperado**, 2006. 40 p. (Documentos, 169).
- HEATHERLY, L.G.; SPURLOCK, S.R. Furrow and Flood Irrigation of Early-Planted, Early Maturing Soybean Rotated with Rice. **Agronomy Journal**, v.92, n.3, p.785-791, 2000.
- INSITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ - IRGA. **Soja em Rotação com Arroz**. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/conteudo/4215/safra>>. Acesso em: 04 dez. 2016.
- JAT, M.L. et al. Layering precision land leveling and furrow irrigated raised bed planting: Productivity and input use efficiency of irrigated bread wheat in indo-gangetic plains. **American Journal of Plant Sciences**, v.2, n.1, p.578-588, 2011.
- KING, C.A.; PURCELL, L.C. Inhibition of N₂ fixation in soybean is associated with elevated ureides and amino acids. **Plant Physiology**, v.137, n.2, p.1389–1396, 2005.
- KING, C. A. et al. A possible relationship between shoot N concentration and the sensitivity of N₂ fixation to drought in soybean. **Crop Science**, v. 54, p. 746-756, 2014.

KOECH, R.K.; SMITH, R.J.; GILLIES, M.H. Evaluating the performance of a real-time optimisation system for furrow irrigation. **Agricultural and Water Management**, v.142, n.2, p.77-87, 2014.

LANZA, L. M. N.; ROSSI, S. C.; SODEK, L. Adubação nitrogenada beneficia soja alagada. **Bragantia**, v. 72, n. 1, p. 2-9, 2013.

MARCHEZAN, E. et al. Produção animal em várzea sistematizada cultivada com forrageiras de estação fria submetidas a diferentes níveis de adubação. **Ciência Rural**, v. 32, n. 2, p. 303-308, 2002.

MARCHESAN, E. et al. Arroz tolerante a imidazolinonas: banco de sementes de arroz-vermelho e fluxo gênico. **Planta Daninha**, v. 29, n. esp, p. 1099-1105, 2011.

MARCHESAN, E. Desafios e perspectivas de rotação com soja em áreas de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8, 2013, Santa Maria, **Anais...**Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2013. p. 1628-1637.

MASTRODOMENICO, A.T. et al. The response and recovery of nitrogen fixation activity in soybean to water deficit at different reproductive developmental stages. **Environmental and Experimental Botany**, v.85, n.2, p.16-21, 2013.

MATZENAUER, R et al. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.33, n.6, p.1013-1019, 2003.

MENEZES, V.G. et al. Serradela nativa: uma alternativa de inverno para as várzeas do Sul do Brasil. **Lavoura Arrozeira**, v.47, n.415, p.19-22, 1994.

MUNARETO, J.D. et al. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado por inundação no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.12, p.1499-1506, 2010.

OLIVEIRA, H.C. Nitrogen metabolism and translocation in soybean plants subjected to root oxygen deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.66, n.2, p.141-149, 2013.

PINTO, L.F.S.; LAUS NETO, J.A.; PAULETTO, E.A. Solos de várzea no Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2004. p.75-95.

PURCELL, L.C. et al. Soybean N₂ fixation estimates, ureide concentrations, and yield responses to drought. **Crop Science**, v.44, n.3, p.484-492, 2004.

RAM, H. et al. Tillage and planting methods effects on yield, water use efficiency and profitability of soybean-wheat system on a loamy sand soil. **Journal of Experimental Agriculture**, v.49, n.4, p.524-542, 2013.

SAIRAM, R.K. et al. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. **Biologia Plantarum**, v.52, n.3, p.401-412, 2008.

SALVAGIOTTI, F. et al. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. **Field Crops Research**, v.108, n.1, p.1-13, 2008.

SANOGO, S.; JI, P. Water management in relation to control of *Phytophthora capsici* in vegetable crops. **Agricultural and Water Management**, v.129, n.4, p.113-119, 2013.

SATO, J.H. et al. Matéria orgânica e infiltração da água em solo sob consórcio milho e forrageiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.2, p.189-193, 2012.

SARTORI, G.M.S. et al. Effects of irrigated rice sowing season and imazapyr + imazapic time of application on rice grain yield and red rice management. **Planta Daninha**, v.31, n.3, p. 631-644, 2013.

SCHOENFELD, R. **Sistemas de rotação arroz e soja em sucessão a plantas de cobertura em Planossolo Háptico**. 2011. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SERRAJ, R.; SINCLAIR, T.R.; PURCELL, L.C. Symbiotic N₂ fixation response to drought. **Journal of Experimental Botany**, v.50, n.2, p.143-155, 1999.

SFREDO, G.J. et al. Soja no Brasil: Calagem, Adubação e Nutrição Mineral. Londrina: **Embrapa Soja**, 2008. 148 p. (Documentos, 305).

SCHOLLES, D.; VARGAS, L.K. Viabilidade da inoculação de soja com estirpes de bradyrhizobium em solo inundado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.973-979, 2004.

SICZEK, A., LIPIEC, J. Soybean nodulation and nitrogen fixation in response to soil compaction and surface straw mulching. **Soil and Tillage Research**, v.114, n.1, p.50-56, 2011.

SILVA, L.S.; RANNO, S.K. Calagem em solos de várzea e a disponibilidade de nutrientes na solução do solo após o alagamento. **Ciência Rural**, v.35, n.5, p.1054-1061, 2005.

SILVA, C.A.S et al. Sistema sulco/camalhão para irrigação e drenagem em áreas de várzea. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008. 4 p. (Comunicado Técnico, 165).

SOUZA, G.M. et al. Soybean under water stress: Physiological and yield responses. In: **A Comprehensive Survey of International Research – Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships**. 1. ed. InTech: 2013. cap. 13, p.273-298.

THOMAS, A.L.; SODEK, L. Development of the nodulated soybean plant after flooding of the root system with different sources of nitrogen. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.17, p.291-297, 2005.

TINT, A.M.M. et al. Nodule growth and nitrogen fixation of selected soybean cultivars under different soil water regimes. **Journal of Natural Science**, v.45, n.1, p.811-823, 2011.

TUBIC, S.B. et al. Importance of microbiological fertilizer used in soybean production: Agronomical and biological aspects. **African Journal of Microbiology Research**, v.5, n.27, p.4909-4916, 2011.

VERNETTI JÚNIOR, F. J. et al. Sustentabilidade de sistemas de rotação e sucessão de culturas em solos de várzea no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v.39, n.6, p. 1708-1714, 2009.

WARD, P.R. et al. Soil water balance with cover crops and conservation agriculture in a Mediterranean climate. **Field Crops Research**, v.132, n.1, p.33-39, 2012.

YUN, J.T. et al. Waterlogging effects on nitrogen accumulation and N₂ fixation of supernodulating soybean mutants. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v.11, n.2, p.111-118, 2008.

ZHANG, X. et al. Effects of raised-bed planting for enhanced summer maize yield on rhizosphere soil microbial functional groups and enzyme activity in Henan Province, China. **Field Crops Research**, v.130, n.3, p.28-37, 2012.

ZEMOLIN, C. R. **S-metolachlor: Red rice control and dissipation in lowland areas**. 2014. 96 f. Tese (Doutorado em Fitossanidade) -Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.