

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

RESPOSTA DE SOJA A PERÍODOS DE INUNDAÇÃO EM UM GLEISSOLO

Cecília Paz da Silva Giordano
Engenheira Agrônoma/UFRGS

Dissertação apresentada com um dos requisitos
à obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia
Ênfase Fisiologia e Manejo Vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Julho de 2014

CIP - Catalogação na Publicação

Giordano, Cecilia

Resposta de soja a períodos de inundação em um
gleissolo / Cecilia Giordano. -- 2014.
86 f.

Orientador: Christian Bredemeier.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa
de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS,
2014.

1. Soja. 2. Excesso hídrico. 3. Rotação de
culturas em terras baixas. I. Bredemeier,
Christian, orient. II. Título.

CECÍLIA PAZ DA SILVA GIORDANO
Engenheira Agrônoma - UFRGS

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 31.07.2014
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 07.10.2014
Por

CHRISTIAN BREDEMEIER
Orientador - PPG Fitotecnia

GILMAR ARDUINO BETTIO MARODIN
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia

PAULO REGIS FERREIA DA SILVA
PPG Fitotecnia/UFRGS

CARLA ANDRÉA DELATORRE
PPG Fitotecnia/UFRGS

FELIPE DE CAMPOS CARMONA
Bolsista-PPG Ciência do Solo
UFRGS

PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade de
Agronomia

*“A um Bochincho, certa feita, fui chegando de
curioso...que o vício é que nem sarnoso,
nunca pára nem se ajeita...”*

Jayme Caetano Braun

À minha avó, Cecília de Oliveira Giordano
(in memoriam)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Christian Bredemeier, pela orientação, amizade, paciência e pelos inúmeros ensinamentos durante os dois anos de orientação.

Aos meus pais, Jorge e Ester, e a minha tia Diva, por terem me proporcionado a oportunidade de concluir mais esta etapa em minha vida.

Aos meus irmãos, Claudia e Ernesto, pelo apoio, incentivo e compreensão.

Ao Manuel, pelo carinho, apoio, paciência, muita compreensão e pelo incentivo em todos os momentos.

Aos pesquisadores Claudia Lange e Anderson Vedelago, pela parceria e pela colaboração na realização do experimento a campo.

Aos professores Paulo Regis Ferreira da Silva e Carla Andrea Delatorre e ao Dr. Felipe Carmona, pela participação na banca examinadora deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Plantas de Lavoura, pelos tantos ensinamentos, pela minha formação e por me auxiliarem em todos os momentos que tive dúvidas, facilitando meu trabalho.

Aos amigos e colegas de trabalho, Danielle Almeida, Júlia Perin, Jacqueline F. Schmitz, Neuri Feldman, Murilo Hendz de Jesus e André Luis Vian, pelo ótimo convívio e agradáveis dias de trabalho e pela contribuição neste trabalho.

Aos amigos e colegas de pós-graduação, em especial à Tani, Silmara, Catarine, Kelly, Giliardi, Pisoni e André, pelo companheirismo, amizade e paciência.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a concretização desta etapa e para minha formação profissional.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

RESPOSTA DA SOJA A PERÍODOS DE INUNDAÇÃO EM UM GLEISSOLO ¹

Autor: Cecilia Paz da Silva Giordano
Orientador: Christian Bredemeier

RESUMO

O interesse no cultivo de soja em rotação com a cultura do arroz irrigado em terras baixas vem aumentando de forma significativa nos últimos anos no estado do Rio Grande do Sul. Neste contexto, existe crescente demanda por genótipos de soja adaptados a essas áreas, assim como pelo entendimento dos mecanismos de tolerância das plantas ao excesso hídrico e respostas da cultura da soja quando submetida a períodos temporários de inundação do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta ao excesso hídrico de duas cultivares de soja em solo de terras baixas, bem como a influência desse estresse sobre o rendimento de grãos e seus componentes. O experimento foi realizado a campo na safra 2012/2013, na EEA/IRGA (Cachoeirinha, RS). Os tratamentos constaram de duas cultivares de soja (NA5909 e BMX Apolo, consideradas sensível e tolerante ao excesso hídrico, respectivamente) e quatro períodos de duração da inundação do solo (sem inundação e 2, 4 e 6 dias de inundação). Os parâmetros avaliados foram massa seca e nitrogênio acumulado na parte aérea, teor relativo de clorofila na folha, fluorescência da clorofila, retenção foliar, sobrevivência de plantas e rendimento de grãos e seus componentes. As plantas que não sofreram excesso hídrico foram superiores na produção de massa seca da parte aérea, nitrogênio acumulado e teor relativo de clorofila na folha. Em relação à fluorescência da clorofila, as plantas sem inundação apresentaram maior eficiência quântica e taxa de transporte de elétrons, enquanto que plantas inundadas por 6 dias apresentaram menor eficiência quântica quando comparadas aos demais tratamentos. Não foi observada diferença significativa no rendimento de grãos entre o tratamento sem inundação e com 2 dias de inundação. Já em períodos mais longos de inundação (4 e 6 dias) ocorreram reduções significativas no rendimento de grãos. As cultivares apresentaram diferença significativa entre si em relação à retenção foliar e ao teor relativo de clorofila na folha. Foi observada maior retenção foliar por ocasião da colheita na cultivar considerada mais sensível ao excesso hídrico, enquanto que o teor relativo de clorofila foi superior na cultivar mais tolerante. Apesar do rendimento de grãos não ter sido afetado em função da inundação do solo por até 2 dias, o excesso hídrico por períodos mais longos resultou em redução acentuada no rendimento de grãos, independente da cultivar. Esta redução no rendimento de grãos pode ser explicada pela redução no número de legumes m⁻².

¹ Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (86p.) Julho, 2014.

RESPONSE OF SOYBEAN TO FLOODING DURATION IN A GLEYSOIL¹

Author: Cecilia Paz da Silva Giordano

Adviser: Christian Bredemeier

ABSTRACT

The area cultivated with soybean in lowland areas in rotation with flooded rice has increased in the last years at Rio Grande do Sul State, southern Brazil. In this sense, there is an increasing demand for soybean genotypes adapted to lowland areas, as well as for understanding tolerance mechanisms to excess water stress and the responses of soybean to soil flooding. The objective of this work was to evaluate the response of two soybean genotypes to flooding in a lowland soil, as well as to study the influence of excess water stress on soybean grain yield and yield components. A field experiment was carried out in EEA/IRGA (Cachoeirinha, RS) during the 2012/2013 growing season. Treatments consisted of two soybean genotypes (NA5909 and BMX Apolo, considered sensible and tolerant to excess water, respectively) and four durations of soil flooding (no flooding and 2, 4 and 6 days). Shoot dry biomass, nitrogen uptake, relative chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, leaf retention, plant survival rate and grain yield and its components were evaluated. Plants not submitted to excess water stress presented higher shoot dry biomass production, nitrogen uptake and relative leaf chlorophyll content, as well as higher quantum yield and electron transport rate. On the other hand, plant subjected to 6 days of flooding had lower quantum yield when compared to other treatments. No significant difference for grain yield was observed between control plants (no flooded) and plants flooded for 2 days. Longer flooding periods (4 or 6 days) resulted in significant grain yield reduction. Soybean genotypes tested were significantly different in relation to leaf retention and relative leaf chlorophyll content. Higher leaf retention at harvest maturity was observed in the genotype considered sensible to excess water stress, while relative leaf chlorophyll content was higher for the tolerant genotype. Even though soybean grain yield was not significantly affected by soil flooding up to 2 days, excess water stress in longer periods resulted in grain yield depression, regardless of soybean genotype. This reduction on grain yield could be explained mainly by reduction in the number of legumes m^{-2} .

¹ Master of Science dissertation in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (86p.) July, 2014.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Aspectos gerais da cultura da soja.....	4
2.2 Cultivo de soja como alternativa de rotação de culturas em áreas de terras baixas	5
2.3 Cultivo em solos hidromórficos.....	6
2.4 A cultura da soja em condição de deficiência de O ₂	8
2.5 A fixação biológica de nitrogênio	10
2.6 Análise do teor de clorofila na folha.....	13
2.7 Análise da fluorescência como parâmetro de identificação do estresse em plantas de soja.....	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 Local de realização do experimento	16
3.2 Dados meteorológicos	17
3.3 Tratamentos e delineamento experimental.....	18
3.4 Instalação do experimento.....	19
3.5 Tratamentos fitossanitários.....	20
3.6 Parâmetros avaliados	20
3.7 Análise estatística.....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Dados meteorológicos da estação de crescimento 2012/2013	28
4.2 Estande inicial de plantas	33
4.3 Composição química da solução do solo, teor de oxigênio dissolvido e temperatura da água durante o período de inundação.....	34
4.4 Teor relativo de clorofila na folha (leitura do clorofilômetro)	37
4.5 Fluorescência da clorofila	42
4.6 Rendimento de massa seca (ms) da parte aérea	46
4.7 Teor de nitrogênio (N) e quantidade de N acumulada na parte aérea.....	50
4.8 Sobrevivência e estande final de plantas	54
4.9 Retenção foliar.....	58
4.10 Estatura de plantas na colheita.....	60
4.11 Rendimento de grãos e componentes do rendimento de grãos	62

	Página
5 CONCLUSÕES.....	74
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
7 APÊNDICES	84

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Características das cultivares de soja NA5909 e BMX Apolo. Cachoeirinha, RS, 2012/13.....	18
2. Teores de manganês, ferro e nitrogênio mineral na solução do solo aos 3 e aos 6 dias após início do período de inundação do solo. Cachoeirinha, RS, 2012/13.....	35
3. Teor de oxigênio dissolvido e temperatura da lâmina de água a 1, aos 3 e aos 6 dias após início da inundação do solo. Cachoeirinha, RS, 2012/13....	37
4. Eficiência quântica (<i>Yield</i>) em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação, em duas datas de avaliação. Cachoeirinha, RS, 2012/13.....	43
5. Taxa de transporte de elétrons (<i>ETR</i>) em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Cachoeirinha, RS, 2012/13.....	46
6. Sobrevivência de plantas em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Cachoeirinha, RS, 2012/13.	55

RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

1. Coleta da solução do solo realizada nas unidades experimentais durante o período de inundação. Cachoeirinha, RS, 2012/13.22
2. Escala visual utilizada para avaliação de retenção foliar nas plantas de soja cv. NA5909. (a) 100% de retenção foliar, (b) 80% de retenção foliar, (c) 50% de retenção foliar e (d) 10% de retenção foliar. Cachoeirinha, RS, 2012/13.25
3. Temperatura média do ar (a), precipitação pluvial (b) e radiação solar (c) durante o período de realização do experimento a campo na safra 2012/13. Cachoeirinha, RS, 2012/13.29
4. Temperatura do ar diária (a), precipitação pluvial diária (b) e radiação solar diária no mês de dezembro de 2012. Cachoeirinha, RS.32
5. Teor relativo de clorofila na folha aos 4 dias após início da inundação (14/12/12) em duas cultivares de soja, em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares dentro do período de inundação e letras minúsculas comparam períodos de inundação dentro de cultivar. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.39
6. Teor relativo de clorofila na folha em 17/12/12 em duas cultivares de soja, em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares e letras minúsculas comparam períodos de inundação. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.40
7. Rendimento de massa seca da parte aérea em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.47

8. Teor de nitrogênio da parte aérea em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.51
9. Quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.52
10. Estande final de plantas em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares dentro do período de inundação e letras minúsculas comparam períodos de inundação dentro de cultivar. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.57
11. Retenção foliar no estágio de maturação de colheita em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.59
12. Estatura de planta no momento da colheita em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.61
13. Rendimento de grãos de duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.63
14. Número de legumes planta⁻¹ em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.66

15. Número de legumes m^{-2} em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares e letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.....67
16. Número de grãos legume⁻¹ em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares dentro do período de inundação e letras minúsculas comparam períodos de inundação dentro de cultivar. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.69
17. Peso do grão de duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.71

1 INTRODUÇÃO

Aproximadamente 20% da área do estado do Rio Grande do Sul, ou seja, 5,5 milhões de hectares é composta por solos de terras baixas. Deste total, estima-se que aproximadamente 3 milhões de hectares possuam estrutura para irrigação e drenagem para o cultivo de arroz irrigado, sendo cultivados anualmente cerca de 1,1 milhão de hectares com esta cultura. Assim, existe potencial para uso mais intensivo destas áreas com outros cultivos em um sistema de rotação de culturas, sem interferir na área cultivada anualmente com arroz irrigado.

O interesse no cultivo da soja em rotação com arroz irrigado vem crescendo de forma significativa no estado do Rio Grande do Sul. Na safra 2011/12, a área cultivada com a cultura da soja em terras baixas foi de aproximadamente 187 mil hectares, aumentando, na safra 2012/2013, para aproximadamente 300 mil hectares, representando crescimento de 60% na área cultivada.

Esse interesse foi motivado pela possibilidade de diminuição do banco de sementes de plantas daninhas nas lavouras de arroz irrigado, especialmente de arroz-vermelho, além do aumento e diversificação de renda na propriedade rural. Assim, a rotação de culturas em áreas de arroz irrigado se apresenta como uma

oportunidade ímpar para recuperar e/ou consolidar a sustentabilidade do processo de produção de grãos neste ambiente.

Os solos nos quais se cultiva arroz irrigado, denominados solos de terras baixas, são geralmente deficientes em drenagem natural, causada pela predominância de relevo plano associado a um perfil de solo cuja camada superficial é pouco profunda e a subsuperficial é praticamente impermeável. Por isso, essas áreas estão sujeitas ao alagamento ou inundações temporárias.

Neste contexto, a soja vem sendo estudada como alternativa para rotação de culturas com o arroz irrigado, pois é uma espécie originária de áreas alagadas do norte da China e apresenta variabilidade genética em relação à tolerância ao excesso de umidade no solo. Apesar desta variabilidade, a soja é sensível ao excesso hídrico, sendo que períodos de alagamento do solo causam alterações anatômicas, morfológicas e fisiológicas nas plantas que, na maioria dos casos, levam à redução no potencial produtivo da cultura.

Em condição de alagamento, ocorrem inicialmente alterações metabólicas na planta, como o aumento na taxa de fermentação (metabolismo anaeróbico) em função da deficiência de oxigênio. No entanto, o metabolismo anaeróbico é menos eficiente na produção de energia se comparado ao metabolismo aeróbico, limitando a disponibilidade de energia para os processos fisiológicos das plantas. Em um segundo momento, ocorrem adaptações morfológicas nas plantas em resposta ao alagamento, como a formação de aerênquima e de raízes adventícias. Entretanto, estas estratégias afetam diretamente o balanço energético das plantas, podendo prejudicar seu desenvolvimento. Além disso, a deficiência de oxigênio no sistema radicular causada pelo alagamento afeta

negativamente a fixação biológica de nitrogênio, devido à necessidade de oxigênio para esse processo.

Em função destas limitações, existe crescente demanda por genótipos de soja adaptados às condições de solos de terras baixas e a necessidade de entendimento dos mecanismos de tolerância das plantas ao estresse por excesso hídrico.

O presente trabalho objetivou estudar a resposta de duas cultivares de soja ao excesso hídrico em solo característico de terras baixas do estado do Rio Grande do Sul. Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Comparar a resposta de duas cultivares de soja a períodos de inundação em um gleissolo.

- Avaliar a magnitude do estresse por excesso hídrico em duas cultivares de soja, através da avaliação de fluorescência da clorofila e do teor relativo de clorofila na folha, retenção foliar e sobrevivência de plantas.

- Avaliar o efeito do excesso hídrico em parâmetros que influenciam o rendimento de grãos, como o acúmulo de biomassa e de nitrogênio na parte aérea das plantas de soja.

- Avaliar o efeito do excesso hídrico sobre o rendimento de grãos e seus componentes na cultura da soja.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais da cultura da soja

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma espécie leguminosa pertencente à família *Fabaceae* e à subfamília *Papilionoideae* (Carvalho Filho & Amabile, 1996). O grão de soja é a maior fonte de proteínas e óleo que impulsiona diversos complexos produtivos, como, por exemplo, da carne e do leite (FAO, 2013). A cultura é uma das mais importantes no mundo, sendo que a produção mundial de grãos de soja na safra 2012/2013 foi de 267,6 milhões de toneladas (USDA, 2013). No Brasil, a produção na safra de 2012/2013 foi de 81,5 milhões de toneladas e estima-se a produção de 86,6 milhões de toneladas na safra 2013/2014 (CONAB, 2014).

A produtividade de grãos de soja é afetada por diversos estresses abióticos, como temperaturas extremas do ar, salinidade, metais pesados, seca e inundações, entre outros (Wang *et al.*, 2003). Entre estes estresses, o excesso hídrico é prejudicial para o crescimento de raízes, formação dos nódulos para fixação de nitrogênio atmosférico e assimilação de carbono (Cho & Yamakawa, 2004). Eventos de precipitação pluvial intensa são frequentes na maioria das regiões agrícolas e estão associados a este estresse. Além disso, espera-se aumento na frequência de ocorrência destes eventos extremos de precipitação pluvial, como resultado do aquecimento global (Komatsu *et al.*, 2011).

Nos últimos anos, houve crescimento da área cultivada com a cultura da soja na Região Sul do Brasil, principalmente em áreas antes utilizadas apenas com outras culturas, como o arroz irrigado, ou com pecuária extensiva (CONAB, 2014). Nestas áreas, os solos são hidromórficos, sujeitos à saturação por água e alagamentos periódicos, tendo como principal característica a deficiência na drenagem natural, que normalmente é motivada pelo relevo predominantemente plano, associado a um perfil cuja camada superficial é pouco profunda e a sub-superficial é praticamente impermeável (Pauletto *et al.*, 1998).

2.2 Cultivo de soja como alternativa de rotação de culturas em áreas de terras baixas

Aproximadamente 20% (cerca de 5,5 milhões de hectares) da área do estado do Rio Grande do Sul é composta por solos de terras baixas. Estes solos se caracterizam pela baixa condutividade hidráulica, beneficiando o cultivo do arroz irrigado (IRGA, 2001). Estima-se que o estado do RS possui área de três milhões de hectares de terras baixas com estrutura para irrigação e drenagem, sendo que cerca de 1,1 milhão de hectares são cultivados anualmente com a cultura do arroz irrigado. Assim, há potencial para uso mais intensivo destas áreas com outros cultivos em rotação de culturas (Marchesan *et al.*, 2013).

O cultivo contínuo de arroz irrigado contribui para a redução da fertilidade do solo e para o aumento da incidência de pragas, doenças e plantas daninhas, devido à ausência de um sistema de rotação de culturas (SOSBAI, 2012). Portanto, entre os benefícios da rotação de culturas no sistema de produção em terras baixas destacam-se a ciclagem de nutrientes, redução dos níveis de infestação de plantas daninhas, principalmente de arroz vermelho, otimização do

uso do solo e melhoria de sua qualidade, pelo incremento do teor de matéria orgânica, quebra de ciclos de doenças e pragas, otimização do uso de máquinas e mão de obra, diversificação da renda, aumento da produtividade e rentabilidade do cultivo e rotação de ingredientes ativos de herbicidas, fungicidas e inseticidas, tornando o sistema sustentável em longo prazo (Correia *et al.*, 2013).

Algumas espécies estão sendo estudadas como alternativas para serem utilizadas em sistemas de rotação de culturas em terras baixas, destacando-se as culturas do milho (*Zea mays*), do sorgo (*Sorghum bicolor*) e da soja.

O interesse no cultivo de soja em rotação com o arroz irrigado vem crescendo de forma significativa na metade sul do estado do Rio Grande do Sul. A área cultivada com soja foi de, aproximadamente, 187 mil hectares na safra 2011/12, aumentando, na safra 2012/2013, para aproximadamente 300 mil hectares, apresentando crescimento de cerca de 60% na área cultivada (FEE/RS, 2014). A soja tem se apresentado como melhor alternativa, em função do aumento da renda para o produtor e melhoria da fertilidade do solo, devido ao aporte de nitrogênio proveniente da fixação biológica deste elemento.

Desde a década de 1980, a cultura da soja vem sendo estudada em sistemas de rotação com arroz irrigado. Entretanto, ainda existem dúvidas sobre o manejo desse sistema de rotação e dos processos fisiológicos envolvidos na tolerância das plantas de soja ao cultivo em terras baixas (Schoenfeld, 2010).

2.3 Cultivo em solos hidromórficos

O excesso hídrico é prejudicial para a maioria das plantas cultivadas, primeiramente em função da baixa disponibilidade de oxigênio (O₂). A difusão do

O₂ atmosférico diminui drasticamente em ambientes saturados por água e as trocas gasosas são reduzidas a níveis extremamente baixos. O consumo de O₂ pelas raízes, fauna e microorganismos do solo pode resultar no esgotamento de O₂ do solo em período de 24 h após início da inundação (Thomas, 2004). Nestas condições, a disponibilidade de oxigênio é muito baixa e o ambiente radicular torna-se hipóxico.

A hipóxia é caracterizada pela concentração de O₂ entre $\geq 0\%$ e $\leq 20,9\%$, aumento do metabolismo anaeróbico nas plantas, aumento da produção de energia (ATP) pela glicólise, disponibilidade limitada de O₂ para fosforilação oxidativa e aumento da via fermentativa de regeneração de NAD⁺ (Serres & Voesenek, 2008). Sendo assim, períodos de inundação do solo são frequentemente acompanhados de redução do teor de O₂ celular, que, por sua vez, limita diretamente os processos de assimilação de carbono e de produção de ATP, afetando o crescimento e o desenvolvimento da planta (Dat *et al.*, 2004).

Além da deficiência de O₂, o excesso hídrico causa o acúmulo de amônio (NH₄⁺) na solução do solo. Em função da ausência de O₂, é praticamente interrompida a mineralização do nitrogênio amoniacal, sendo o nitrato (NO₃⁻) é o primeiro composto a ser oxidado em ambientes anaeróbicos (Sousa *et al.*, 2000). Porém, a maioria das espécies é sensível a concentrações elevadas de NH₄⁺, apresentando sintomas de toxidez e crescimento reduzido quando a principal fonte de N disponível é o NH₄⁺ (Britto *et al.*, 2001; Oliveira & Sodek, 2013). Juntamente com o acúmulo de NH₄⁺, ocorre aumento gradativo de outros gases, como gás carbônico (CO₂), metano (CH₄) e gás sulfídrico (H₂S) (Costa, 1996; Liesack *et al.*, 2000).

Outras mudanças que ocorrem no solo durante períodos de alagamento, afetam suas características químicas, tais como variações de pH do solo e potencial redox. As modificações de pH podem não afetar diretamente o crescimento da planta, porém existem efeitos indesejáveis de redução de óxidos de alumínio, ferro ou manganês, os quais alteram o metabolismo e o crescimento das plantas (Dat *et al.*, 2004).

2.4 A cultura da soja em condição de deficiência de O₂

Algumas espécies desenvolveram uma série de mecanismos de adaptação para lidar com a anaerobiose provocada pelo alagamento. Estes mecanismos incluem adaptações morfológicas e metabólicas, tais como indução de enzimas da rota fermentativa e modificações estruturais, como presença de aerênquima e formação de raízes adventícias (Drew, 1997). A primeira resposta da planta em condição de alagamento é metabólica. Em período relativamente curto de exposição ao estresse, a planta identifica a falta de O₂ como acceptor final de elétrons na cadeia respiratória como um sinalizador.

A adaptação metabólica pode ser associada a aumentos na taxa de fermentação, em função de incrementos na atividade das enzimas álcool desidrogenase (ADH), piruvato descarboxilase (PDC) e lactato desidrogenase (LDH). No entanto, o metabolismo anaeróbico é menos eficiente na produção de energia, se comparado ao metabolismo aeróbico (Voesenek *et al.*, 2004).

Já respostas de longo prazo estão ligadas a mudanças morfológicas (Gibberd, 2001; Bailey-Serres & Voesenek, 2008). Cortes anatômicos realizados em raízes adventícias de plantas de soja cultivadas sob inundação evidenciaram elevada ruptura das células do córtex, indicando a formação de aerênquima

lisígeno, criando espaços vazios, os quais servem como condutos para a transferência de O₂ para as raízes (Pires *et al.*, 2002).

A inundação do solo provoca também redução na assimilação de carbono (Bacanamwo & Purcell, 1999a). Plantas de soja submetidas a alagamento por 14 dias apresentaram menor acúmulo de massa seca das raízes e da parte aérea (Rosa *et al.*, 2007). Em outro estudo, foram observadas reduções de até 55% no acúmulo de massa seca da parte aérea em plantas de soja submetidas ao alagamento (Fante *et al.*, 2010). Adicionalmente, Cho & Yamakawa (2006) avaliaram três cultivares de soja em condições de alagamento por até nove dias durante o período de crescimento vegetativo, sendo observada redução na estatura de plantas, área foliar e teor de N nas plantas em função do estresse. Conseqüentemente, o rendimento de grãos de soja é reduzido em até 60%, variando conforme a intensidade e o estágio fenológico em que ocorre o estresse (Schöffel *et al.*, 2001).

A deficiência de O₂ no sistema radicular também pode diminuir a formação de nódulos nas raízes e inibir a fixação simbiótica de nitrogênio, em função da exigência de O₂ no processo de fixação biológica (Amarante & Sodek, 2006). A concentração de ureídeos no xilema é fortemente relacionada à fixação biológica de N (Herridge & Peoples, 1990). Plantas de soja mantidas durante 14 dias em estresse por alagamento paralisaram o crescimento e apresentaram baixos níveis de ureídeos, indicando redução na fixação biológica de N em condições de alagamento (Thomas *et al.*, 2005).

As cultivares de soja indicadas para cultivo no Rio Grande do Sul apresentam variabilidade genética para tolerância a condições de excesso hídrico no solo (Thomas *et al.*, 2000; Oliveira *et al.*, 2012). Lange (2010) conduziu ensaio

com 60 genótipos de soja, sendo que 34 genótipos se destacaram em relação à tolerância ao excesso hídrico no solo e avançaram no programa de melhoramento genético, evidenciando a variabilidade genética entre os materiais para esta característica. Sendo assim, a identificação de cultivares de soja tolerantes à inundação pode evitar reduções no rendimento de grãos, quando cultivadas em áreas susceptíveis a situações de excesso hídrico.

2.5 A fixação biológica de nitrogênio

O nitrogênio é constituinte de vários compostos nas plantas, destacando-se aminoácidos, ácidos nucléicos e clorofila. Assim, importantes reações bioquímicas em plantas e microorganismos envolvem a presença deste elemento, o que o torna um dos nutrientes absorvidos em maiores quantidades pelas plantas cultivadas (Novais *et al.*, 2007).

A fixação biológica de N_2 é um processo essencial para transformar o N_2 , uma molécula estável e abundante na atmosfera, que não pode ser utilizada pela maioria dos microorganismos e pelas plantas. A reação de redução do N_2 a NH_3^+ é realizada por microorganismos que contêm a enzima dinitrogenase e são conhecidos como fixadores de N_2 ou diazotróficos (Novais *et al.*, 2007).

O processo de fixação biológica do nitrogênio atmosférico pode ser realizado por diversas espécies de bactérias que habitam o solo. Essas bactérias capazes de fixar N atmosférico possuem a enzima dinitrogenase, capaz de romper a tripla ligação entre os átomos de N. No caso da soja, bactérias do gênero *Bradyrhizobium* se associam simbioticamente às plantas, formando estruturas especializadas (nódulos) nas raízes da planta de soja. Para garantir a eficiência da nodulação, é necessário que essas bactérias estejam presentes no

solo, junto à semente de soja. Este processo é viabilizado pela prática da inoculação das sementes antes da semeadura (Birrazo, 2004).

O processo de nodulação que ocorre durante a associação simbiótica é controlado, em grande parte, pela troca de sinais (fatores de nodulação) entre rizóbios e a planta hospedeira (Hirsch *et al.*, 2003). Tais sinais são altamente específicos entre o hospedeiro e o simbiote, pois diferem consideravelmente entre as diferentes espécies da família *Fabaceae*, e esta especificidade possibilita que os rizóbios simbioses identifiquem seus próprios hospedeiros (Bais *et al.*, 2004).

Além do reconhecimento entre rizóbio e planta hospedeira, via troca de sinais bioquímicos, também fatores abióticos determinam o estabelecimento da simbiose (Lieven-Antoniou & Whittan, 1997), os quais podem influenciar diretamente a população de rizóbios e diminuir sua eficiência, como temperatura, umidade, fertilidade natural e acidez do solo (Moreira & Siqueira, 2005). Além disso, a eficiência das estirpes dependem, em parte, da capacidade de persistência no solo e competição com a microflora nativa já estabelecida (Giongo, 2007).

Durante o período de desenvolvimento vegetativo da cultura da soja, o número de nódulos na planta aumenta e, assim, a taxa de fixação de N_2 . Por outro lado, a taxa de fixação de N_2 decresce no período de enchimento de grãos, no qual se verifica declínio da atividade da enzima nitrogenase. Neste estágio, a planta prioriza a alocação de fotoassimilados para o enchimento de grãos em detrimento da fixação biológica de nitrogênio, que também demanda elevada quantidade de energia da planta.

O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade pela soja, uma vez que os grãos são ricos em proteínas, apresentando teor médio de 6,5% de N. Essa demanda pode ser suprida pelo nitrogênio mineral do solo, a partir da decomposição (mineralização) da matéria orgânica do solo, pela associação simbiótica da leguminosa com as bactérias *Bradyrhizobium japonicum* e *Bradyrhizobium elkanii* e por adubos nitrogenados minerais e orgânicos. Estima-se que entre 65% a 85% desta demanda por N seja suprida pela fixação biológica de nitrogênio e o restante suprido pelo solo, através da decomposição da matéria orgânica (Thomas, 2010).

A intensa mobilização do solo para cultivo do arroz irrigado favorece a decomposição da matéria orgânica do solo (IRGA, 2010). A quantidade de matéria orgânica em solos normalmente cultivados com a cultura do arroz irrigado é baixa, o que caracteriza baixa disponibilidade de nitrogênio do solo para as plantas. A lavoura de soja com deficiência de nitrogênio vai perdendo a cor verde-escuro, passando a verde-pálido com um leve amarelado. Após, todas as folhas tornam-se amarelas. Este sintoma aparece primeiro nas folhas inferiores, mas espalha-se rapidamente pelas folhas superiores. O sintoma aparece, por último, nas folhas mais novas, uma vez que o N é um elemento com grande mobilidade na planta, sendo translocado dos tecidos mais velhos para as folhas novas. O crescimento da planta é lento, com plantas de menor estatura e de baixa produção de grãos. O sucesso da cultura da soja, do ponto de vista econômico, depende da eficiência do processo de fixação biológica do N₂ (Scholles & Vargas, 2004) e o adequado suprimento de N é essencial para alcançar elevados rendimentos de grãos (Thomas, 2010).

2.6 Análise do teor de clorofila na folha

Os métodos tradicionais utilizados para determinar a quantidade de clorofila na folha requerem destruição de amostras de tecido e muito trabalho nos processos de extração e quantificação. O desenvolvimento de um medidor portátil de clorofila, que permite medições instantâneas do valor correspondente ao seu teor na folha, constitui importante alternativa para estimar o teor relativo desse pigmento na folha (Dwyer *et al.*, 1991; Argenta *et al.*, 2001).

O teor de clorofila na folha é utilizado para prever o nível nutricional de nitrogênio (N) em plantas, devido ao fato da quantidade desse pigmento correlacionar-se positivamente com teor de N na planta (Piekielek e Fox, 1992; Smeal e Zhang, 1994; Booij *et al.*, 2000). Por isso, o teor de clorofila tem sido utilizado para diagnosticar o estado nitrogenado de culturas como milho, batata e trigo (Guimarães *et al.*, 1999).

As leituras efetuadas pelo medidor portátil de clorofila correspondem ao teor relativo de clorofila presente na folha da planta. Os valores são calculados pelo equipamento com base na quantidade de luz transmitida pela folha em dois comprimentos de ondas (Minolta, 1989).

2.7 Análise da fluorescência como parâmetro de identificação do estresse em plantas de soja

As plantas possuem dois complexos fotoquímicos, chamados fotossistemas I e II. Estes complexos fotoquímicos atuam em série para realizar as reações de armazenamento da energia proveniente da fotossíntese na forma de ATP. Os fotossistemas funcionam de forma independente e complementar, sendo que no fotossistema I ocorre a absorção da luz com comprimentos de onda

de 700 nm e, no fotossistema II, ocorre a absorção de comprimentos de onda de 680 nm. Em ambos, a primeira reação é a transferência de elétrons excitados pela luz dos centros de reação, chamados P680 e P700 para os fotossistemas II e I, respectivamente, para a cadeia transportadora de elétrons (Rohacek *et al.*, 2008). Os centros de reação são um complexo de moléculas de clorofilas unidas a proteínas e quinonas, que podem ser oxidadas ou reduzidas, aceitando ou doando elétrons. A fonte de elétrons é a água e o receptor final é o NADP^+ , o qual é reduzido a NADPH (Taiz & Zieger, 2009).

O processo conhecido como fluorescência se refere à parte da energia absorvida pelas moléculas de clorofila que é dissipada na forma de radiação. Os elétrons, quando recebem a energia da luz, passam de um estado normal para um estado excitado. Quando estes elétrons voltam ao seu estado normal, parte da energia que não é utilizada para a conversão em ATP e NADPH_2 é liberada na forma de radiação e caracteriza o processo de fluorescência (Maxwell & Johnson, 2000).

A medição da fluorescência da clorofila em plantas é uma ferramenta utilizada para estudar o estado de estresse de uma planta avaliando o sistema de energia do complexo fotossintético (Strasser *et al.*, 1995; Lazár, 1999). Moléculas de clorofila absorvem a energia da luz, que pode ser usada para a atividade fotossintética da folha, ser dissipada na forma de calor ou ser reemitida como fluorescência. Assim, pela medição da fluorescência da clorofila A é possível obter informação sobre a eficiência da fotossíntese e da dissipação de energia fotoquímica que ocorre nas folhas das plantas (Cha-um *et al.*, 2010; Wagner *et al.*, 2014). Os parâmetros de fluorescência têm sido relacionados à taxa de assimilação fotossintética de CO_2 das folhas (Baker & Rosenqvist, 2004) e

amplamente utilizados para estudar o desempenho fotossintético das folhas (Baldassarre *et al.*, 2011).

Sendo assim, a sensibilidade de fluorescência da clorofila a perturbações no metabolismo, acoplada com a facilidade e a rapidez com que as medições podem ser feitas, torna potencialmente útil esta ferramenta para identificação, de forma não destrutiva, de perturbações metabólicas nas plantas (Barbagallo *et al.*, 2003; Wagner *et al.*, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de realização do experimento

O experimento foi conduzido a campo com a cultura da soja na safra 2012/2013, na Estação Experimental do Arroz do Instituto Rio Grandense do Arroz (EEA/IRGA).

A EEA/IRGA está localizada no município de Cachoeirinha, região ecoclimática da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, situada a 29°55'30'' de latitude sul e 50°58'21'' de longitude oeste e com altitude de sete metros acima do nível do mar.

O clima da região é do tipo subtropical úmido, conforme classificação climática de Koeppen, sendo considerado como de transição entre os tipos Cfa₁ (isoterma anual inferior a 18°C) e Cfa₂ (isoterma anual superior a 18°C). A temperatura mínima média do ar é de 9,8°C, no mês mais frio (julho), e a máxima média é de 31,6°C, no mês mais quente (janeiro) (Bergamaschi *et al.*, 2003). A precipitação pluvial média anual é de 1425 mm e a disponibilidade de radiação solar máxima é de 21,0 MJ m⁻² dia⁻¹ (502 cal cm⁻² dia⁻¹) no mês de dezembro (INMET, 2012).

O solo da área experimental na EEA/IRGA é classificado como Gleissolo Háplico Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). Este tipo de solo ocorre em terras

baixas, sendo sujeito à saturação por água ou alagamentos em períodos de elevada precipitação pluvial.

Os atributos físicos e químicos do solo da área antes da instalação do experimento foram avaliados em amostras coletadas na camada de 0-20 cm de profundidade. A análise de solo foi realizada pelo Laboratório de Análises de Solos do IRGA, tendo apresentado os seguintes valores: argila: 19%; $\text{pH}_{\text{água}}$: 5,4; Fósforo (Mehlich-1): 18,2 mg dm^{-3} ; Potássio (Mehlich-1): 27,6 mg dm^{-3} , Capacidade de troca de cátions ($\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$): 7,9 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e matéria orgânica: 13 g kg^{-1} . A acidez do solo foi previamente corrigida pela aplicação de calcário visando elevar o pH a 6,0.

3.2 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos da EEA/IRGA (Cachoeirinha, RS) durante o período de condução do experimento (novembro de 2012 a abril de 2013) foram obtidos na estação meteorológica automática localizada na área experimental. Os dados coletados foram temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e precipitação pluvial (mm) durante a estação de crescimento da cultura da soja. Estes dados meteorológicos são apresentados juntamente com os dados meteorológicos da série histórica (normal climática) dos anos de 1975 a 2002, no caso da temperatura do ar e precipitação pluvial (INMET, 2012), e dos anos de 1953 a 2003, no caso da radiação solar (Cargnelutti *et al.*, 2004).

3.3 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos consistiram de duas cultivares de soja (NA5909 RR e BMX Apolo RR) e quatro períodos de duração da inundação do solo (testemunha sem inundação e dois, quatro e seis dias de duração da inundação).

As cultivares NA5909 RR e BMX Apolo RR são consideradas sensível e tolerante ao excesso hídrico, respectivamente (Oliveira *et al.*, 2012). Algumas características das cultivares utilizadas no presente experimento são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Características das cultivares de soja NA5909 e BMX Apolo. Cachoeirinha, RS, 2012/13.

Característica ¹	NA5909 RR	BMX Apolo RR
Grupo de maturação	6.2	5.5
Ciclo	Semiprecoce	Superprecoce
Hábito de crescimento	Indeterminado	Indeterminado
Porte	Médio	Médio
Peso de 100 sementes (g)	16,6	16,8

¹ Dados obtidos de Nidera Sementes (2013) e Brasmax Genética (2013).

O experimento foi conduzido no delineamento experimental em parcelas subdivididas em faixas, com quatro repetições por tratamento, sendo que os fatores cultivar e duração do período de inundação foram alocados na parcela principal e na sub-parcela, respectivamente. Cada unidade experimental foi composta por área de 30 m², constituída de seis linhas de 10 m de comprimento, espaçadas em 0,5 m.

O período de inundação, utilizando-se lâmina de água de aproximadamente 10 cm de altura, foi iniciado no dia 10/12/2012, quando as plantas se encontravam entre os estádios vegetativos de desenvolvimento V7 e V9. Após o período de inundação (com duração de dois, quatro ou seis dias,

dependendo do tratamento), as saídas de água das respectivas parcelas eram abertas, visando a realização da drenagem (retirada da água da parcela). A altura da lâmina de água utilizada foi suficiente para que o nível da água permanecesse acima dos camalhões.

A escala de estádios de desenvolvimento utilizada no presente trabalho é a escala proposta por Fehr & Caviness (1977), pela qual o estágio V7, por exemplo, corresponde a sete nós no caule com folhas completamente desenvolvidas, iniciando com o nó das folhas unifolioladas.

3.4 Instalação do experimento

A semeadura da soja foi realizada em 31/10/2012. O sistema de cultivo utilizado foi o cultivo mínimo, com semeadura da cultura da soja em microcamalhão, utilizando-se semeadora adaptada com quatro aivecas, as quais são responsáveis pela formação dos microcamalhões, sendo que cada camalhão comporta o cultivo de duas linhas de soja com espaçamento de 0,50 m, posicionadas na borda de cada elevação. A adubação da área experimental foi realizada com 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e de 95 kg ha⁻¹ de K₂O, aplicados na forma de superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente.

Imediatamente antes da semeadura, as sementes foram inoculadas com duas doses de inoculante comercial contendo duas estirpes de rizóbios indicadas para a cultura da soja (*B. elkanii* e *B. japonicum*) e tratadas com fungicida à base de thiram (0,5 g de produto comercial kg⁻¹ de semente) e inseticida à base de fipronil (200 mL de produto comercial kg⁻¹ de semente).

Após a emergência, a densidade de plantas em cada unidade experimental foi ajustada para o valor médio de 39 plantas m^{-2} , realizando-se desbaste quando necessário.

3.5 Tratamentos fitossanitários

Dez dias antes da semeadura foi aplicado herbicida de ação total glyphosate (3 L de produto comercial ha^{-1}) na área experimental, para eliminação da vegetação presente na área. O herbicida glyphosate também foi aplicado em pós-emergência da cultura da soja (2 L de produto comercial ha^{-1}), nos estádios de desenvolvimento V4 e V7.

A ocorrência de doenças, como manchas foliares e ferrugem asiática, foi controlada pela aplicação de fungicidas a base de azoxistrobina e ciproconazol (300 mL de produto comercial ha^{-1}), aplicados no estádio V7, no início do florescimento (Estádio R1) e no início e final do enchimento de grãos (Estádios R5 e R6, respectivamente). Para controle de insetos, foram realizadas duas aplicações de inseticidas a base de profenofós e lufenuron (300 mL de produto comercial ha^{-1}), nos estádios vegetativos V4 e V7 e uma aplicação no período reprodutivo (Estádio R6) e duas aplicações de inseticidas a base de thiamethoxam e cipermetrina (200 g de produto comercial ha^{-1}), nos estádios R1 e R5, e três aplicações de inseticidas a base de clorantianiliprole (50 mL de produto comercial ha^{-1}) nos estádios reprodutivos R1, R5 e R6.

3.6 Parâmetros avaliados

Visando estudar a resposta das cultivares de soja à duração do período de inundação, foram avaliados os seguintes parâmetros no experimento:

Composição química da solução do solo durante o período de inundação: a solução do solo foi coletada durante o período de inundação, nos dias 13/12/2012 (três dias após o início da inundação) e 16/12/2012 (seis dias após o início da inundação), em todas as unidades experimentais do tratamento de seis dias de inundação.

A coleta da solução do solo foi realizada utilizando-se tubos de vidro com filtros na extremidade inferior e inseridos a 10 cm de profundidade no solo, sendo mantida a extremidade superior dos tubos acima da lâmina de água (Figura 1). No momento da coleta, era acoplada seringa para realização da sucção de 50 mL de solução do solo, para posterior análise.

A análise da solução do solo foi realizada pelo Laboratório de Análises de Solos da EEA/IRGA (Cachoeirinha, RS), sendo determinados os teores de manganês (Mn^{2+}), ferro (Fe^{2+}) e nitrogênio mineral total (amônia, nitrato e nitrito).



FIGURA 1. Coleta da solução do solo realizada nas unidades experimentais durante o período de inundação. Cachoeirinha, RS, 2012/13.

Além das análises acima descritas, foram determinados o teor de oxigênio dissolvido e a temperatura da lâmina de água durante o período de inundação, utilizando-se oxímetro (modelo DM-4, DIGIMED Instrumentação Analítica). As medições foram realizadas a, aproximadamente, 5 cm de profundidade na lâmina de água. As avaliações do teor de oxigênio dissolvido e da temperatura da água foram realizadas nos dias 11/12/2012 (um dia após início da inundação), 13/12/2012 (três dias após início da inundação) e 16/12/2012 (seis dias após início da inundação).

Teor relativo de clorofila na folha: as determinações foram realizadas utilizando clorofilômetro Minolta (Modelo SPAD-520[®]). O clorofilômetro utiliza fontes luminosas e detectores para medir a luz transmitida pela lâmina foliar, em dois comprimentos de onda (região do vermelho – 650 nm – e do infravermelho – 940 nm – do espectro). A leitura é dada em “unidades SPAD”, que indica a intensidade da coloração verde da folha e, indiretamente, a quantidade de clorofila (Piekielek & Fox, 1992).

Foram realizadas três avaliações com o clorofilômetro durante o período de condução do experimento: em 07/12/2012 (período anterior à inundação), em 14/12/2012 (quatro dias após início da inundação) e em 17/12/2012 (após o período de inundação). As avaliações foram realizadas no folíolo central do último trifólio completamente desenvolvido da planta, em cinco plantas em cada unidade experimental, sendo obtido o valor médio por sub-parcela.

Fluorescência da clorofila: os parâmetros avaliados foram o rendimento quântico do fotossistema II (*Yield*) sob condições naturais de luminosidade e a taxa de transporte de elétrons (*ETR*). O aparelho utilizado para as medições da fluorescência da clorofila foi o OS1-FL Chlorophyll Fluorometer (Opti-Sciences). As leituras foram realizadas em duas ocasiões: no dia 14/12/12 (quatro dias após início da inundação) e no dia 17/12/12 (após o período de inundação). As medidas foram realizadas no folíolo central do último trifólio completamente desenvolvido da planta, sendo avaliadas cinco plantas em cada unidade experimental, determinando-se um valor médio por sub-parcela para cada parâmetro avaliado. As avaliações foram realizadas sempre no mesmo horário do dia (entre 15:30 e 16:00 h).

Rendimento de massa seca (ms) da parte aérea: foi realizada coleta de plantas em todas as unidades experimentais no dia 21/12/2012. A área amostrada foi de 0,5 m² (duas linhas de 0,5 m de comprimento). As plantas foram secas em estufa a 60°C até atingir peso constante, sendo o valor de massa seca da parte aérea na área amostrada extrapolado para kg ha⁻¹.

Teor de nitrogênio (N) da parte aérea: a determinação do teor de nitrogênio na parte aérea foi realizada pelo método Kjeldahl, conforme metodologia descrita por Tedesco *et al.* (1995).

Quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea: determinada pela multiplicação da ms da parte aérea pelo teor de nitrogênio no tecido vegetal, sendo expressa em kg N ha⁻¹.

Sobrevivência de plantas: foi realizada avaliação visual de sobrevivência das plantas em cada unidade experimental, no estágio de início da formação dos legumes (Estádio R3). Utilizou-se escala com variação de zero (nenhuma planta viva na parcela) a 100% (todas as plantas vivas na parcela). O percentual de sobrevivência das plantas em cada unidade experimental foi o valor médio calculado a partir dos valores percentuais de sobrevivência determinados por três avaliadores independentes.

Retenção foliar: por ocasião da maturação de colheita (Estádio R8), foi realizada avaliação visual de retenção foliar em cada unidade experimental. Utilizou-se escala com variação de 0 (nenhuma folha verde nas plantas) a 100% (todas folhas verdes nas plantas) (Figura 2). A percentagem de retenção foliar nas plantas em cada unidade experimental foi o valor médio calculado a partir dos valores determinados por três avaliadores independentes.

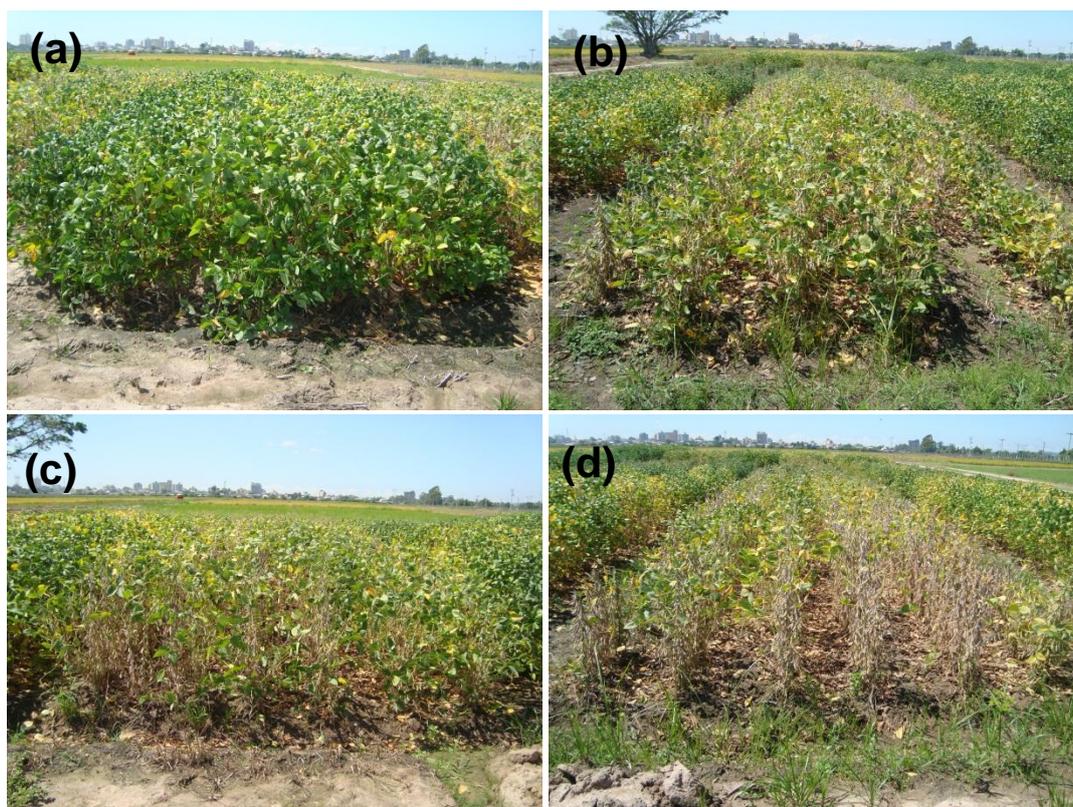


FIGURA 2. Escala visual utilizada para avaliação de retenção foliar nas plantas de soja cv. NA5909. (a) 100% de retenção foliar, (b) 80% de retenção foliar, (c) 50% de retenção foliar e (d) 10% de retenção foliar. Cachoeirinha, RS, 2012/13.

Rendimento de grãos: foi realizada colheita de grãos em área de 4 m² em cada unidade experimental, o que corresponde a 4 m das duas linhas centrais, descontando-se duas linhas laterais de bordadura. A colheita foi realizada de forma manual, sendo a trilha realizada posteriormente em trilhadora estacionária. Após, foi determinado o peso de grãos por unidade experimental e extrapolado o valor para rendimento de grãos (em kg ha⁻¹), na umidade de 130 g kg⁻¹.

Antes da realização da trilha, foram amostradas 10 plantas representativas da área útil colhida para determinação do rendimento de grãos. Nestas plantas amostradas foram realizadas as avaliações de estatura de planta e componentes do rendimento de grãos, conforme descrito a seguir.

Estatuta de planta na colheita: a estatuta das 10 plantas amostradas foi medida, obtendo-se a estatuta média de planta em cada unidade experimental.

Número de legumes planta⁻¹: foi realizada contagem do número de legumes na amostra de 10 plantas, sendo determinada a média do número de legumes planta⁻¹.

Número de grãos legume⁻¹: foi realizada contagem do número de grãos na amostra de 10 plantas, sendo determinada a média do número de grãos planta⁻¹. O número de grãos legume⁻¹ foi determinado pela relação entre o número de grãos planta⁻¹ e o número de legumes planta⁻¹.

Peso do grão: foi determinado pela pesagem de três amostras de 50 grãos de cada unidade experimental, sendo o valor corrigido para a umidade de 130 g kg⁻¹.

Estande final de plantas (número de plantas m⁻²): foi estimado a partir do estande inicial de plantas, avaliado por ocasião da emergência, e da porcentagem de sobrevivência de plantas em cada unidade experimental.

Número de legumes m⁻²: foi estimado a partir do número de legumes planta⁻¹ e do estande final de plantas (número de plantas m⁻²).

Avaliação da nodulação: foi realizada tentativa de avaliação de nódulos por meio de coleta e lavagem de raízes. Entretanto, devido às condições do solo, não foi possível realizar com precisão a contagem dos nódulos, bem como verificar sua atividade biológica.

3.7 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$), com auxílio do aplicativo estatístico SISVAR versão 5.3 (Ferreira, 2011). Quando

houve significância estatística do teste F, foi feita comparação entre médias da parcela principal (cultivares) pelo teste t e entre médias da sub-parcela (durações do período de inundação) pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados meteorológicos da estação de crescimento 2012/2013

São apresentados os elementos meteorológicos da EEA/IRGA (Cachoeirinha, RS), local de realização do presente estudo, durante o período de condução do experimento a campo com a cultura da soja (Figura 3 e 4).

A temperatura do ar se manteve acima da média histórica (normal climática) no início do desenvolvimento da cultura (Figura 3.a). Em novembro, a temperatura média do ar foi de 22,8°C e, em dezembro, mês no qual os períodos de inundação foram realizados, a temperatura média do ar foi de 25,2°C, sendo 1,7 e 1,8°C superior à normal climática em novembro e dezembro, respectivamente.

Temperaturas elevadas no início do desenvolvimento, associadas à alta disponibilidade de radiação solar, favorecem o desenvolvimento vegetativo e formação do aparato fotossintético (Costa, 1996).

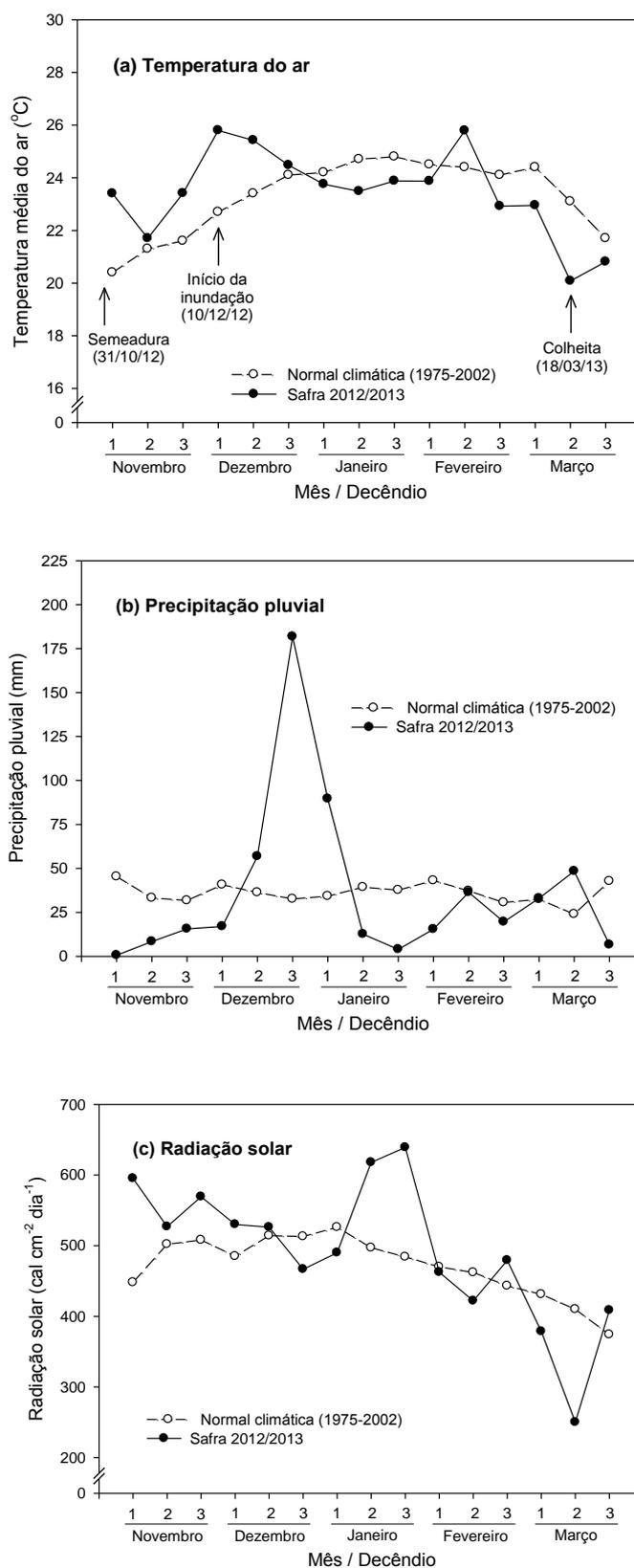


FIGURA 3. Temperatura média do ar (a), precipitação pluvial (b) e radiação solar (c) durante o período de realização do experimento a campo na safra 2012/13. Cachoeirinha, RS, 2012/13.

Já a precipitação pluvial durante o período de realização do experimento foi menor que a normal climática até o primeiro decêndio de dezembro de 2012, sendo que a precipitação pluvial acumulada neste período foi de 98,4 mm, ou seja, 100 mm abaixo da normal climática para o mesmo período (Figura 3.b). Do segundo decêndio de dezembro de 2012 até o primeiro decêndio de janeiro de 2013, a precipitação se manteve acima da normal climática.

Já a partir do segundo decêndio de janeiro até o final de janeiro, as precipitações foram 60 mm abaixo da normal climática para o mesmo período. No início de fevereiro, as precipitações aumentaram, mas se mantiveram abaixo da normal climática nesse mês. Em março, as precipitações foram mais intensas no segundo decêndio e, conseqüentemente, acompanhadas de queda na temperatura do ar (Figura 3.a) e na radiação solar (Figura 3.c). Ao final do segundo decêndio (dia 18 de março de 2013), foi realizada a colheita da soja.

Como pode ser observado detalhadamente no gráfico de precipitação pluvial do mês de dezembro (Figura 4.b), as precipitações no primeiro decêndio foram pouco significativas, caracterizando um período de deficiência hídrica para a cultura da soja. Além disso, a baixa precipitação pluvial foi associada à elevada temperatura média do ar (Figura 4.a), acima da normal climática do mês de dezembro. As cultivares modernas de ciclo precoce, como as utilizadas neste experimento, são praticamente insensíveis ao fotoperíodo, sendo responsivas basicamente à soma térmica para induzir o florescimento (Pereira, 2002).

O estágio fenológico da maioria das plantas no experimento no início dos períodos de inundação do solo (10/12/2012) situava-se entre V7 e V9. Contudo, algumas plantas iniciaram o período de florescimento (Estádio R1) durante a

inundação, sendo que o estágio de florescimento é considerado crítico para ocorrência de estresse por excesso hídrico na soja. De fato, temperaturas do ar elevadas, associadas à deficiência hídrica, podem condicionar rápido crescimento vegetativo e causar florescimento precoce (Pereira, 2002). No caso do presente trabalho, o florescimento precoce verificado no mês de dezembro durante o período de inundação pode ter sido induzido pela associação de altas temperaturas médias do ar e déficit hídrico (baixa precipitação pluvial) no início do desenvolvimento da cultura (Figuras 3.a e 3.b).

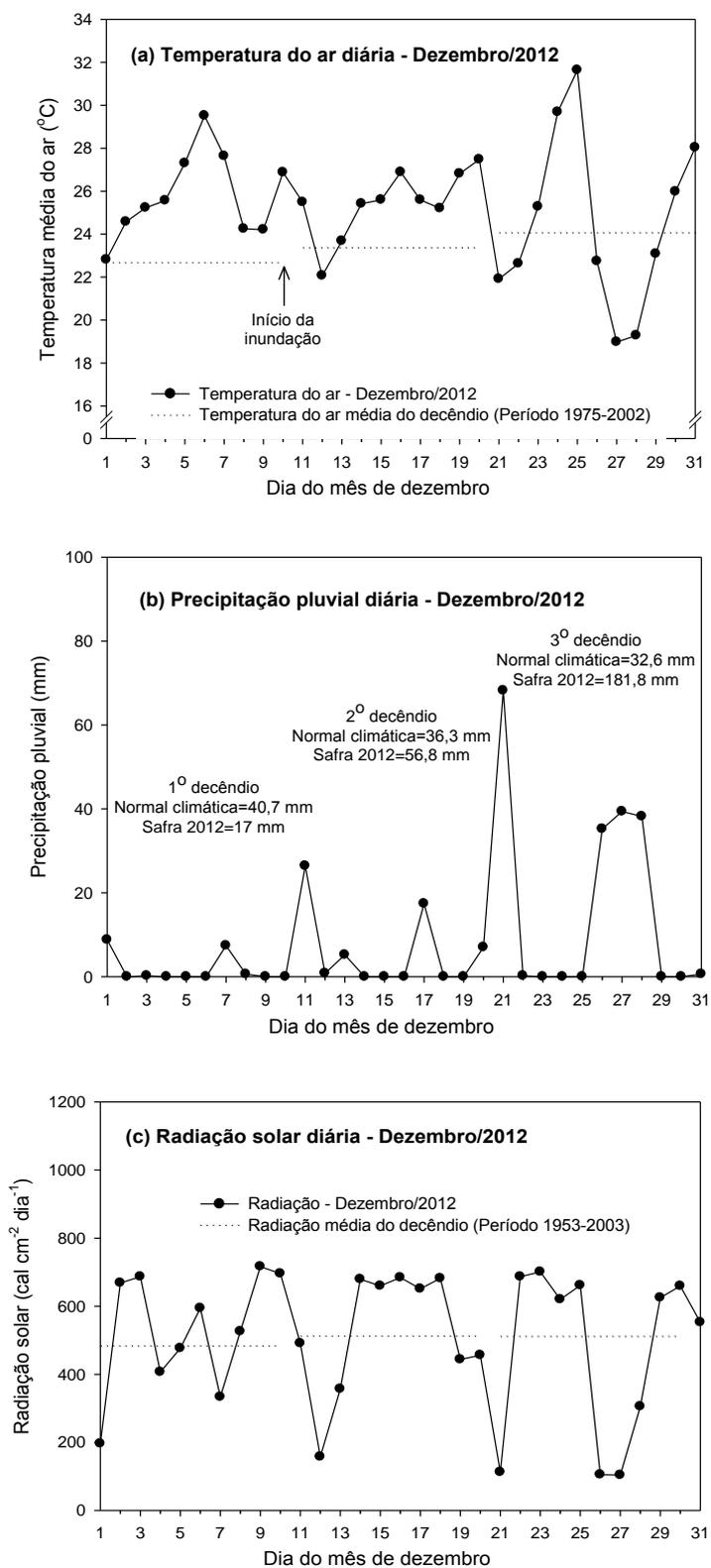


FIGURA 4. Temperatura do ar diária (a), precipitação pluvial diária (b) e radiação solar diária no mês de dezembro de 2012. Cachoeirinha, RS.

A soja é uma espécie que apresenta exigências específicas de fotoperíodo, temperatura do ar e disponibilidade hídrica para se desenvolver adequadamente e expressar seu potencial de rendimento. O fotoperíodo e a temperatura do ar exercem influência sobre a duração dos períodos vegetativo e reprodutivo, determinando, assim, a duração do ciclo da cultura. A temperatura mínima para o desenvolvimento de plantas de soja é 10°C e a faixa ótima de temperatura para seu crescimento e desenvolvimento encontra-se entre 20°C e 30°C. Temperaturas muito elevadas podem causar distúrbios no crescimento, principalmente se associadas a períodos de déficit hídrico (Costa, 1996).

A necessidade total de água na cultura da soja durante o ciclo varia entre 450 e 800 mm, dependendo das condições meteorológicas, do manejo da cultura e da duração do ciclo da cultura. Durante o período germinação-emergência tanto o déficit quanto o excesso hídrico são prejudiciais para uma boa uniformidade de plantas. A necessidade hídrica vai aumentando conforme o desenvolvimento da cultura, chegando a 7 a 8 mm dia⁻¹ no período de florescimento – enchimento de grãos, decaindo após esse período (Berlato *et al.*, 1986).

4.2 Estande inicial de plantas

A semeadura foi realizada no dia 31 de outubro de 2012, sendo que o solo apresentava, neste momento, umidade adequada para germinação das sementes. No primeiro decêndio de novembro de 2012, momento de ocorrência da emergência e crescimento inicial das plantas no experimento, a precipitação pluvial foi menor que a normal climática para esta região (Figura 3.b), fato este que não teve reflexo negativo sobre o estande inicial de plantas no experimento. A densidade de plantas foi ajustada com desbaste após a emergência para o

valor médio de 39 plantas m^{-2} . A análise estatística do estande inicial de plantas (número de plantas m^{-2}) mostrou não haver diferença significativa entre os tratamentos em relação a este parâmetro ($p > 0,05$, Apêndice 1).

4.3 Composição química da solução do solo, teor de oxigênio dissolvido e temperatura da água durante o período de inundação

A solução do solo foi coletada durante o período de inundação nos dias 13/12/12 (três dias após o início da inundação) e 16/12/12 (seis dias após o início da inundação), sendo determinados os teores de manganês (Mn^{2+}), ferro (Fe^{2+}) e nitrogênio mineral total.

Em relação ao teor de manganês na solução do solo, não foi verificada diferença estatística significativa entre as avaliações realizadas aos três e aos seis dias após o início da inundação (Tabela 2, Apêndice 2). Este comportamento pode ser explicado pelo fato do solo da EEA/IRGA (Gleissolo Háplico Distrófico típico) não apresentar originalmente teores elevados de óxidos de manganês.

Já o teor de ferro (Fe^{2+}) na solução do solo aumentou significativamente em função da duração do período de inundação, passando de $0,042 \text{ mg L}^{-1}$ aos três dias após o início da inundação (dia 13/12/12) para $0,111 \text{ mg L}^{-1}$ aos seis dias após o início da inundação (Tabela 2). No mesmo tipo de solo do presente estudo, Sousa (2002), encontrou teores mais elevados de Fe^{2+} solúveis na solução do solo em função do alagamento, sendo os valores de $1,3$ e $8,3 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe^{2+} na solução do solo aos dois e aos cinco dias após início do alagamento, respectivamente. Em função da deficiência de oxigênio no solo causada pela inundação, ocorrem reações de redução dos óxidos de ferro presentes no solo,

aumentando os teores de Fe^{+2} livre na solução. No caso do presente estudo, os teores de manganês e ferro disponíveis na solução do solo durante o período de alagamento são considerados baixos e, por isso, considera-se que não foram limitantes para o desenvolvimento das plantas de soja.

TABELA 2. Teores de manganês, ferro e nitrogênio mineral na solução do solo aos 3 e aos 6 dias após início do período de inundação do solo. Cachoeirinha, RS, 2012/13.

Data de coleta ¹	Mn ²⁺	Fe ²⁺	N mineral ²
(dias após início da inundação)	----- mg L ⁻¹ -----		
3 dias	0,260 ^{ns}	0,042 b ⁵	31,68 a
6 dias	0,313	0,111 a	15,89 b
Controle ³	0,030	0,000	- ⁴

¹ Início da inundação: 10/12/2012.

² Amônia, nitrato e nitrito.

³ Amostra de água coletada na superfície da lâmina de água no dia 13/12/2012.

⁴ Análise não realizada.

⁵ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste t.

^{ns} não significativo.

O teor de nitrogênio mineral (amônia, nitrato e nitrito) na solução do solo diminuiu aos seis dias após o início da inundação, em comparação à avaliação realizada aos três dias após o início da inundação (Tabela 2). Essa diminuição no teor de N mineral total pode ser atribuída ao processo de desnitrificação, pela qual ocorre redução de nitrato (NO_3^-) e posterior perda de nitrogênio para atmosfera por volatilização, em função da atividade de microrganismos anaeróbicos. Em ambientes anaeróbicos, é interrompida a mineralização de nitrogênio amoniacal, sendo o nitrato rapidamente consumido por microrganismos. A forma predominante de nitrogênio mineral em solos inundados é o amônio (NH_4^+), sendo esta forma a principal fonte de nitrogênio disponível às plantas nestes solos (Pires *et al.*, 2002; Sousa *et al.*, 2000). Contudo, o amônio acumulado na solução do solo e absorvido em excesso pode tornar-se tóxico para a maioria das espécies

cultivadas (Camargo *et al.*, 1999). Juntamente com o acúmulo de amônio, ocorre aumento gradativo de outros gases, como gás carbônico, metano e gás sulfídrico.

Além das análises acima apresentadas, foi realizada medição do teor de oxigênio dissolvido na água e temperatura da lâmina de água durante o período de inundação, sendo estas medições realizadas nos dias 11/12/12 (um dia após início da inundação), 13/12/12 (três dias após início da inundação) e 16/12/12 (seis dias após início da inundação). Conforme pode ser visualizado na Tabela 3, os valores de oxigênio dissolvido diminuíram bruscamente já nas primeiras 24 h após o início da inundação, passando de 7,6 mg L⁻¹ para 1,4 mg L⁻¹. Nas duas medições seguintes, aos três e aos seis dias após início da inundação, os valores de oxigênio dissolvido na água se mantiveram baixos e com pequena variação, caracterizando a condição de hipóxia. Thomas (2004) observou redução de 6,7 mg L⁻¹ para 0,9 mg L⁻¹ no teor de oxigênio dissolvido na água nas primeiras 24 h de inundação, em experimento conduzido em vasos com soja.

Já a temperatura da lâmina de água se manteve acima da temperatura média do ar nos três dias de avaliação. A temperatura do ar nos dias 11/12/12, 13/12/12 e 16/12/12 foi de 25,5, 23,7 e 26,9°C, enquanto que a temperatura da lâmina de água foi de 29,0, 29,9 e 31°C, respectivamente (Tabela 3).

Além da elevada temperatura do ar, a alta temperatura elevada da lâmina de água pode intensificar o estresse nas plantas de soja durante períodos de inundação.

TABELA 3. Teor de oxigênio dissolvido e temperatura da lâmina de água a 1, aos 3 e aos 6 dias após início da inundação do solo. Cachoeirinha, RS, 2012/13.

Data de avaliação ¹ (dias após início da inundação)	Oxigênio dissolvido (mg L ⁻¹) ²	Temperatura da lâmina de água (°C)
1 dia	1,4	29,0
3 dias	1,8	29,9
6 dias	1,0	31,0

¹ Início da inundação: 10/12/2012.

² Foi considerado o teor de oxigênio dissolvido na água de 7,6 mg L⁻¹ ao nível do mar e temperatura de 30°C.

4.4 Teor relativo de clorofila na folha (leitura do clorofilômetro)

Neste experimento também foi avaliada a variação do teor relativo de clorofila nas folhas das duas cultivares de soja testadas no presente estudo, em função da duração de períodos de inundação do solo, utilizando-se clorofilômetro portátil. A primeira medição com o clorofilômetro foi realizada no dia 07/12/12, ou seja, três dias antes do início dos períodos de inundação do solo. Nesta avaliação, não foi observada diferença estatística significativa no teor relativo de clorofila na folha entre as duas cultivares de soja e entre os períodos de inundação, sendo o valor médio geral de 34,9 unidades SPAD ($p > 0,05$, Apêndice 3). Este comportamento em relação aos períodos de inundação era esperado, uma vez que, neste momento, os tratamentos de duração de períodos de inundação ainda não haviam sido estabelecidos.

Os tratamentos de inundação do solo foram iniciados no dia 10/12/12. Após o início da inundação, foram realizadas determinações do teor relativo de clorofila na folha nos dias 14/12/12 (quatro dias após início da inundação) e 17/12/12 (após o período de inundação).

Na leitura realizada no dia 14/12/12, foi verificada interação significativa entre os fatores cultivar e duração do período de inundação (Figura 5, Apêndice 3). A cultivar NA5909, considerada mais sensível ao alagamento, apresentou menor teor relativo de clorofila na folha em comparação à cultivar Apolo, em todos os tratamentos, com valor médio de 27,9 e 33,3 unidades SPAD para as cultivares NA5909 e Apolo, respectivamente (Figura 5). Comparando-se as cultivares em função da duração do período de inundação, no tratamento controle sem inundação a diferença entre as cultivares foi de duas unidades SPAD, sendo que no tratamento de dois e quatro dias de inundação, a diferença neste parâmetro foi de aproximadamente cinco unidades SPAD. Estes resultados demonstram aumento da diferença entre as cultivares no teor relativo de clorofila na folha em função do aumento na duração do período de inundação, sendo que os maiores valores de leitura do clorofilômetro foram sempre observados na cultivar de soja Apolo, a qual é considerada mais tolerante ao excesso hídrico.

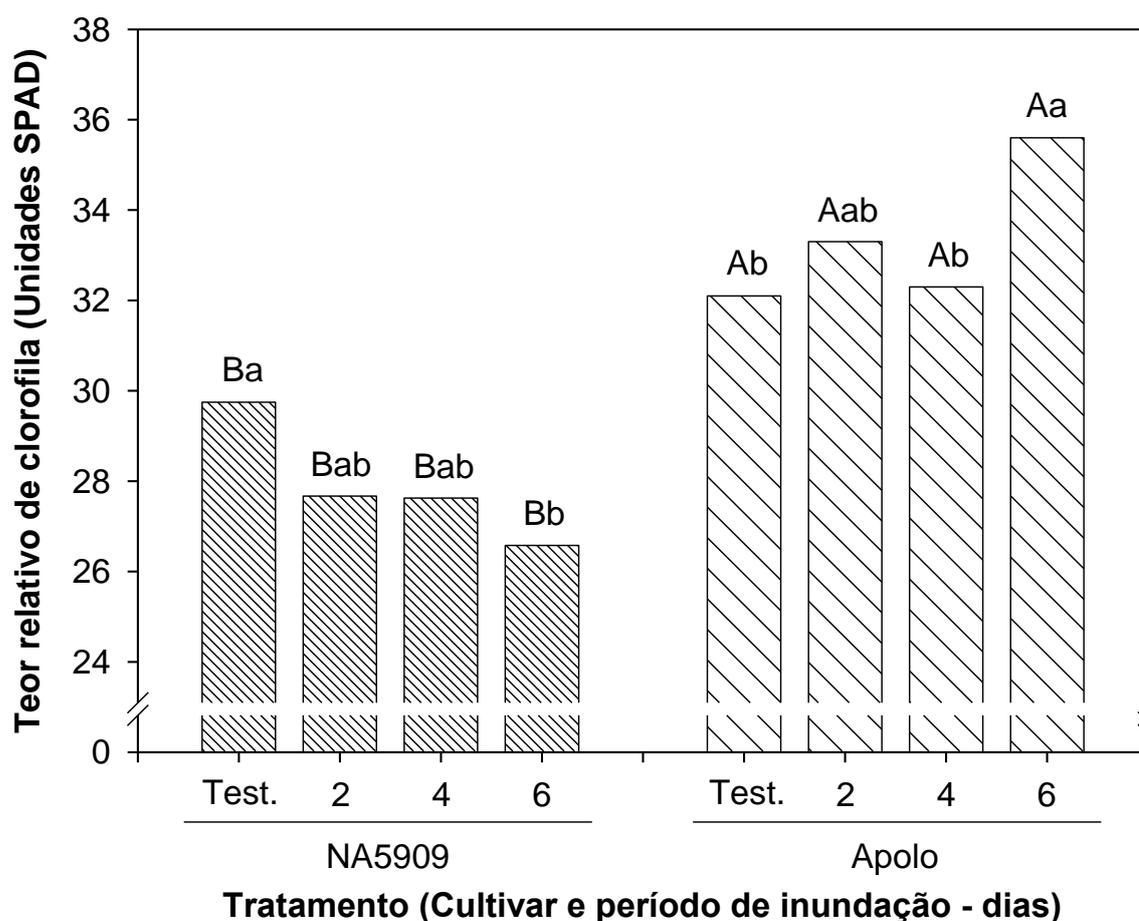


FIGURA 5. Teor relativo de clorofila na folha aos 4 dias após início da inundação (14/12/12) em duas cultivares de soja, em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares dentro do período de inundação e letras minúsculas comparam períodos de inundação dentro de cultivar. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

Já na leitura realizada no dia 17/12/12 (sete dias após os períodos de inundação), foi observada significância dos efeitos principais de cultivar e da duração do período de inundação (Figura 6, Apêndice 3). A cultivar Apolo, apesar de mostrar queda no teor relativo de clorofila na folha em relação à leitura anterior realizada no dia 14/12/12, apresentou teor de clorofila significativamente superior em comparação à cultivar NA5909, em todos os tratamentos de duração do período de inundação.

Em relação à duração do período de inundação, as plantas que não foram submetidas à inundação (testemunha) apresentaram leitura do clorofilômetro de 33,1 unidades SPAD, sendo este valor significativamente superior aos demais tratamentos com inundação, os quais apresentaram valores de leitura do clorofilômetro (teor relativo de clorofila) de 26,2, 26,2 e 28,3 unidades SPAD para os tratamentos de dois, quatro e seis dias de inundação, respectivamente (Figura 6). Estes resultados mostram que o teor de clorofila na folha foi influenciado negativamente pelo estresse causado pelo excesso hídrico imposto.

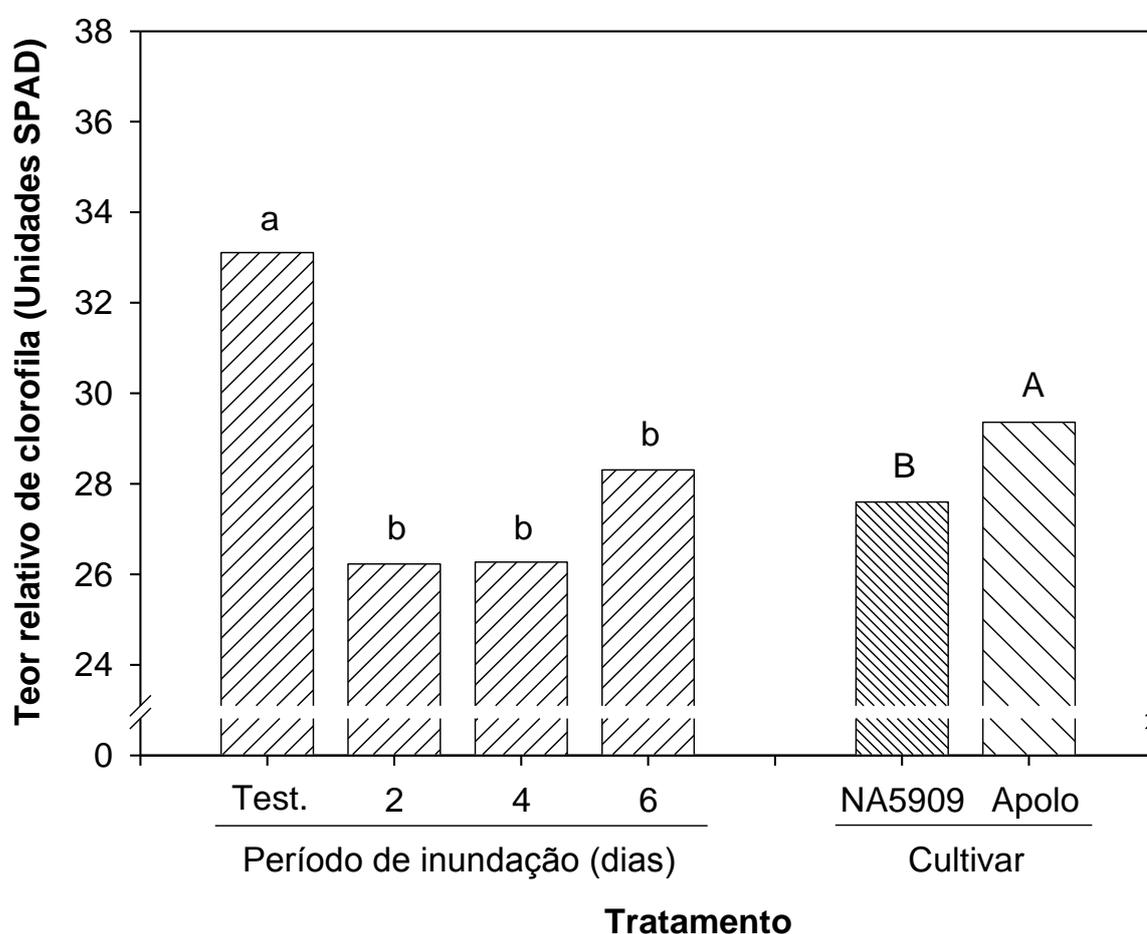


FIGURA 6. Teor relativo de clorofila na folha em 17/12/12 em duas cultivares de soja, em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares e letras minúsculas comparam períodos de inundação. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

A média geral do teor relativo de clorofila na folha foi de 34,9 no dia 07/12/12, 30,6 no dia 14/12/12 e 28,5 unidades SPAD no dia 17/12/12, mostrando queda no teor relativo de clorofila nas folhas em função do estresse hídrico.

Uma das consequências da inundação do solo é a diminuição da concentração de clorofila na folha (Ladygin, 2004). Em função da inundação, o ambiente radicular torna-se hipóxico e a deficiência de oxigênio provoca limitações na fixação biológica de nitrogênio (Cho & Yamakawa, 2006). Neste trabalho, foi observada redução no teor de oxigênio dissolvido na água em função da duração do período de inundação, impondo às plantas a condição de hipoxia no solo (Tabela 3). Relacionado a isso, ocorre redução na taxa fotossintética das folhas, em função da diminuição da condutância estomática (Davanzo *et al.*, 2002) e da redução na atividade da enzima Ribulose 1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (RUBISCO) (Irfan *et al.*, 2010).

A avaliação do teor relativo de clorofila na folha (leitura do clorofilômetro) se mostrou uma ferramenta eficiente para detectar a redução no teor de clorofila nas folhas em função do estresse provocado pela inundação do solo. Por outro lado, Pazzin (2012), avaliando o teor de clorofila na folha em cinco cultivares de soja em função da duração do período de inundação, entre elas a cultivar Apolo, não observou diferença significativa entre as cultivares testadas, apresentando apenas queda no teor de clorofila em função do excesso hídrico. No presente estudo, além de diferença entre os tratamentos de duração do período de inundação, o teor relativo de clorofila na folha diferiu entre as duas cultivares de soja, refletindo a variação na tolerância ao alagamento entre as mesmas.

4.5 Fluorescência da clorofila

As avaliações de fluorescência da clorofila foram realizadas em duas ocasiões: nos dias 14/12/12 (quatro dias após início da inundação) e no dia 17/12/12 (sete dias após o período de inundação). Os parâmetros avaliados foram a eficiência quântica (*Yield*) e a taxa de transporte de elétrons (*ETR*).

Em relação à eficiência quântica, nas duas datas de avaliação não foi observada diferença significativa entre as duas cultivares de soja testadas no presente experimento ($p > 0,05$, Apêndice 4) (Tabela 4).

A eficiência quântica é uma estimativa da atividade fotoquímica da planta, a qual expressa a captura da energia de excitação pelos centros de reação abertos do fotossistema II e pode representar a eficiência do transporte de elétrons através deste fotossistema. Segundo resultados disponíveis na literatura, valores de eficiência quântica ideal, que indicam para a maioria das plantas uma condição não estressante, podem variar entre 0,75 e 0,85, sendo que valores inferiores a estes indicariam condição de estresse (Maxwell & Johnson, 2000).

No presente estudo, as cultivares apresentaram valores de eficiência quântica em torno de 0,22, na avaliação realizada aos quatro dias após início da inundação (dia 14/12/2012), refletindo o estresse causado pelo excesso hídrico nas plantas. Na leitura realizada no dia 17/12/12, ou seja, após o período de inundação, os valores de eficiência quântica para as duas cultivares ainda se mantiveram baixos, em torno de 0,35, demonstrando condição de estresse para as plantas. Isso pode ser explicado pela elevada precipitação pluvial que ocorreu após a retirada da lâmina de água (dia 16/12/2012) (Figura 4.b), uma vez que esta precipitação ocorreu quando o solo ainda se encontrava saturado, mantendo, desta maneira, as plantas sob condição de estresse por excesso hídrico.

Já em relação à duração do período de inundação, na primeira leitura realizada aos quatro dias após o início da inundação (dia 14/12/12), a eficiência quântica apresentou diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 4). No tratamento testemunha (sem inundação), as plantas apresentaram maior eficiência quântica, em comparação aos demais tratamentos com períodos de inundação. Entretanto, os baixos valores de eficiência quântica observados mesmo no tratamento sem inundação demonstram ocorrência de estresse para as plantas, provavelmente provocado pelas altas temperaturas do ar e pela deficiência hídrica que ocorreram até este momento, conforme mostrado nas Figuras 4.a e 4.b.

TABELA 4. Eficiência quântica (*Yield*) em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação, em duas datas de avaliação. Cachoeirinha, RS, 2012/13.

Tratamento	Dias após início da inundação	
	4 dias	7 dias
Cultivar		
NA5909	0,2227 A ²	0,3400 A
Apolo	0,2259 A	0,3687 A
Período de inundação ¹		
Testemunha	0,2755 a	0,4088 ab
2 dias	0,1946 b	0,4488 a
4 dias	0,2196 b	0,3038 bc
6 dias	0,2074 b	0,2562 c

¹ Início dos períodos de inundação: 10/12/2012.

² Médias seguidas pela mesma letra na coluna (letras maiúsculas para comparação entre cultivares e letras minúsculas para comparação entre períodos de inundação), em cada data de avaliação, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$).

Na avaliação realizada no dia 17/12/12 (após o período de inundação), a eficiência quântica apresentou diferença significativa entre os tratamentos com períodos de inundação (Tabela 4). As plantas que foram inundadas por dois dias apresentaram eficiência quântica superior aos demais tratamentos. Como a precipitação no primeiro decêndio de dezembro (período anterior à inundação) foi abaixo da normal climática para este período, estas plantas possivelmente foram beneficiadas com a entrada da água (inundação) por um período de dois dias, uma vez que o solo encontra-se muito seco no momento de início do período de inundação. O tratamento testemunha (sem inundação) apresentou maior valor de eficiência quântica na segunda avaliação (17/12/2012) em comparação à primeira avaliação (14/12/2012) (Tabela 4). Esse comportamento foi observado em todos os tratamentos, entretanto ainda com valores de eficiência quântica que demonstram ocorrência de estresse às plantas.

No caso das plantas sem inundação (testemunha), o estresse provavelmente foi causado pela associação entre temperatura do ar acima e precipitação pluvial abaixo da normal climática para o período (Figuras 4.a e 4.b). No caso das plantas mantidas sob lâmina de água por períodos mais longos (quatro e seis dias de inundação), além dos fatores de estresse do ambiente citados anteriormente, as plantas estavam sofrendo pelo estresse provocado pelo excesso hídrico, apresentando menor eficiência quântica. O tratamento de seis dias de inundação foi o que apresentou menor eficiência quântica, em função da intensidade do estresse causado nas plantas pela deficiência de oxigênio no ambiente radicular, efeito este magnificado pela elevada temperatura da lâmina de água (Tabela 3).

Outro parâmetro importante da fluorescência é a taxa de transporte de elétrons (*ETR*), que é uma medida em tempo real da atividade fotoquímica dos fotossistemas, sendo mais sensível a variações de condições ambientais em comparação à eficiência quântica (Pimentel *et al.*, 2011). O fluxo de elétrons do fotossistema II indica, de modo geral, a taxa de fotossíntese, sendo que a ocorrência de danos ao fotossistema II se constitui como a primeira manifestação de estresse na planta (Maxwell & Johnson 2000).

A taxa de transporte de elétrons (*ETR*) mostrou comportamento semelhante à eficiência quântica, sendo que, nas duas avaliações realizadas (14/12/12 e 17/12/12) não foi observada diferença estatística significativa entre as duas cultivares testadas ($p > 0,05$, Apêndice 4).

Em relação à duração do período de inundação, na primeira avaliação (14/12/2012), as plantas que não sofreram excesso hídrico (testemunha) apresentaram maior taxa de transporte de elétrons que os demais tratamentos de inundação (Tabela 5). Na segunda avaliação (17/12/2012), no período após a inundação, as plantas sem inundação mantiveram a taxa de transporte de elétrons acima dos demais tratamentos. Entretanto, oscilações da taxa de transporte de elétrons (*ETR*) ocorridas nessa avaliação podem estar relacionadas a outros estresses bióticos ou abióticos, além do excesso hídrico, como temperatura do ar e radiação solar, entre outros (Bown *et al.*, 2002; Oliveira *et al.*, 2002).

TABELA 5. Taxa de transporte de elétrons (*ETR*) em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Cachoeirinha, RS, 2012/13.

Tratamento	Dias após início da inundação	
	4 dias	7 dias
	----- $\mu\text{mol elétrons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ -----	
Cultivar		
NA5909	135,5 A ²	133,2 A
Apolo	140,8 A	125,7 A
Período de inundação ¹		
Testemunha	204,4 a	151,9 a
2 dias	131,0 b	116,0 b
4 dias	111,0 b	125,6 ab
6 dias	106,1 b	124,2 ab

¹ Início dos períodos de inundação: 10/12/2012.

² Médias seguidas pela mesma letra na coluna (letras maiúsculas para comparação entre cultivares e letras minúsculas para comparação entre períodos de inundação), em cada data de avaliação, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$).

4.6 Rendimento de massa seca (ms) da parte aérea

A amostragem de plantas para avaliação do rendimento de matéria seca da parte aérea foi realizada no dia 21/12/2012 (período posterior à inundação).

Em relação a esta variável, não foi observada diferença estatística significativa entre as duas cultivares testadas no presente trabalho, sendo significativo apenas o efeito principal de duração do período de inundação (Figura 7). O acúmulo de biomassa na parte aérea foi, em média, de 2.327 kg ha⁻¹ e de 2.365 kg ha⁻¹, para as cultivares NA5909 e Apolo, respectivamente.

Em relação aos períodos de inundação, as plantas sem inundação (testemunha) apresentaram maior rendimento de ms da parte aérea, sendo seguidas pelo tratamento de dois e quatro dias de inundação, os quais não diferiram entre si. Já no tratamento com seis dias de inundação, foi observado menor acúmulo de massa seca na parte aérea, em comparação aos demais tratamentos.

Neste estudo, a redução no rendimento de ms da parte aérea foi de, aproximadamente, 12% nos tratamentos com dois e quatro dias de inundação, em comparação ao tratamento sem inundação. Nas plantas mantidas inundadas por seis dias, a redução no rendimento de ms foi de, aproximadamente, 30% em relação à testemunha sem inundação (Figura 7).

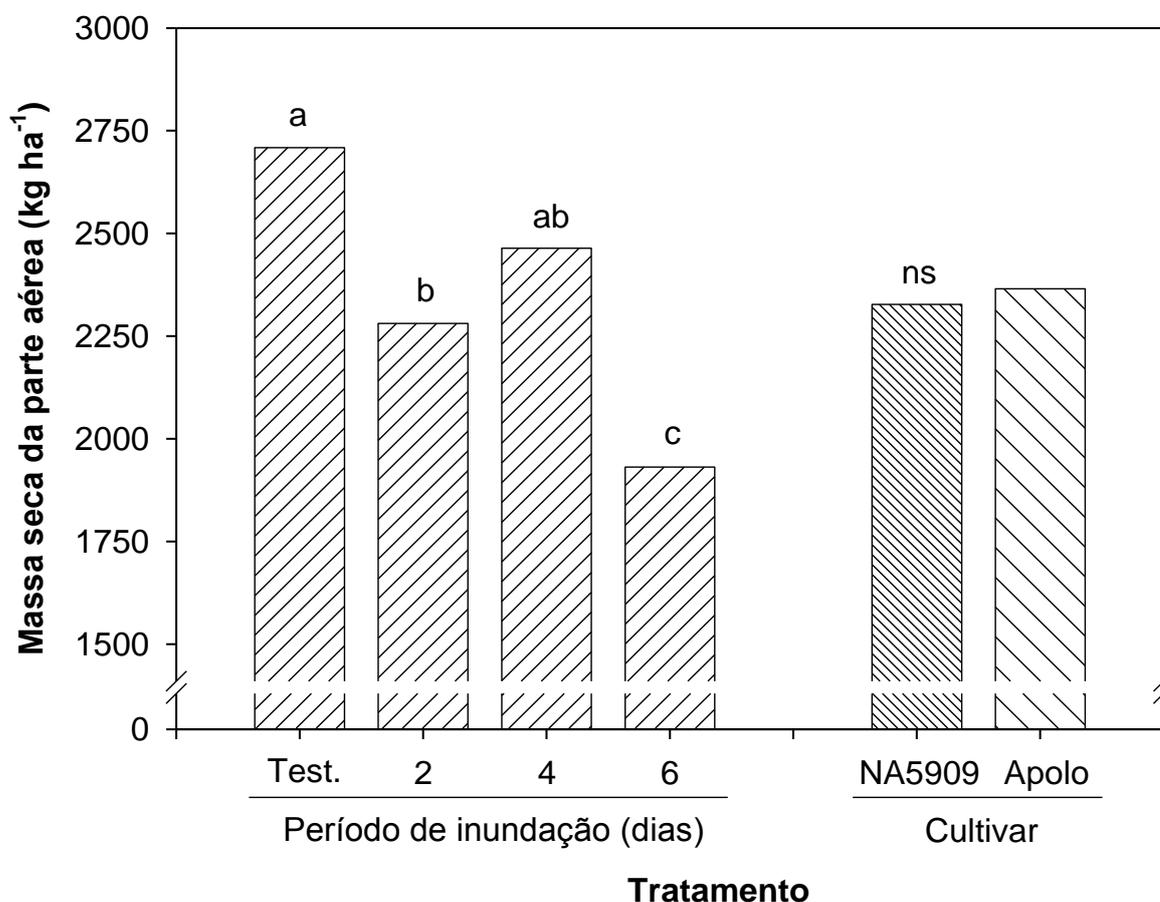


FIGURA 7. Rendimento de massa seca da parte aérea em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

O rendimento de ms da parte aérea é um parâmetro frequentemente utilizado para avaliar o grau de estresse das plantas em função da inundação do

solo. Scott (1989) encontrou redução linear no rendimento de ms de plantas de soja em função do aumento da duração do período de inundação, tanto no período vegetativo quanto no período reprodutivo. Por outro lado, Bacanamwo & Purcell (1999) não encontraram diferença significativa no rendimento de ms de plantas submetidas a sete dias de inundação e plantas controle (sem inundação), sendo a diferença significativa apenas no tratamento de 14 dias de inundação, no qual as plantas diminuíram a produção de massa seca em função do alagamento. Cho & Yamakawa (2006) utilizaram tratamentos com inundações por três, cinco, sete e nove dias durante o estágio vegetativo (V5-V6) em soja e encontraram redução no acúmulo de massa seca em todos os tratamentos, sendo esta redução mais acentuada nos períodos mais longos de inundação.

No presente estudo, o comportamento foi semelhante, uma vez que o período mais longo de inundação (seis dias) foi o que apresentou maior redução no acúmulo de biomassa seca na parte aérea, em comparação ao tratamento testemunha sem inundação.

A redução observada no rendimento ms pode ser explicada pelo desequilíbrio no balanço energético das plantas em condições de hipóxia no ambiente radicular (Bailey-Serres & Voeselek, 2008). A condição de hipóxia gerada pela inundação é caracterizada pela diminuição na concentração de oxigênio (O_2), promovendo deficiência de O_2 e causando modificações no metabolismo primário da planta.

O oxigênio atua como aceptor final da cadeia de transporte de elétrons da mitocôndria. Em condições aeróbicas, 1 mol de hexose é convertido em, aproximadamente 30 a 32 mol de ATP. Entretanto, em condições de anaerobiose, a produção de ATP é drasticamente reduzida. Com o predomínio de processos

fermentativos, são produzidos apenas 2 mol de ATP por cada mol de hexose. Sendo assim, em condições de inundação, a produção de ATP pela fosforilação oxidativa, dependente de O_2 , é inibida e a produção de ATP depende basicamente de processos anaeróbicos, como a glicólise (Buchanan *et al.*, 2000).

Além da limitação energética, em condições de deficiência de O_2 ocorrem modificações morfológicas em plantas de soja na tentativa de mitigar este estresse, como, por exemplo, o desenvolvimento de aerênquima e de raízes adventícias (Rhine *et al.*, 2010). Bacanamwo & Purcell (1999b) sugerem que a tolerância ao excesso hídrico em soja está associada ao desenvolvimento constitutivo de aerênquima nas plantas.

Pires (2002) avaliou a ocorrência de modificações morfológicas em plantas de soja em resposta à inundação, sendo que plantas sob inundação apresentaram hipertrofia no segmento submerso do caule e formação de aerênquima na base do caule, com rompimento da epiderme. Por outro lado, Thomas (2008) observou maior formação de aerênquima em plantas sensíveis ao excesso hídrico, enquanto que plantas tolerantes apresentaram menor formação desse tecido, mostrando que a formação de aerênquima isoladamente não garante tolerância ao excesso hídrico em soja.

Entretanto, é conhecido que a cultura da soja apresenta variabilidade genética em relação à tolerância ao alagamento do solo (Thomas, 2010). Alguns genótipos desenvolvem mecanismos que permitem a sobrevivência em ambientes inundados, superando as restrições impostas pela condição de hipóxia do solo. Estas adaptações morfológicas e metabólicas ocorrem mediante consumo de reservas, o que, dependendo do estágio em que ocorre o estresse, pode gerar colapso no balanço energético da planta e limitar processos fundamentais para a

planta, como síntese de proteínas, divisão e expansão celular (Fukao & Bailey-Serres, 2004).

4.7 Teor de nitrogênio (N) e quantidade de N acumulada na parte aérea

A avaliação do teor de nitrogênio na parte aérea foi realizada no dia 21/12/2012 (período posterior à inundação). Para esta variável, não foi observada interação significativa dos fatores cultivar e duração do período de inundação, sendo significativo apenas o efeito principal da duração do período de inundação. Em relação às cultivares, não foi observada diferença significativa entre NA5909 e Apolo (Figura 8, Apêndice 5). Já em relação à duração do período de inundação, a diferença foi significativa entre os tratamentos (Figura 8, Apêndice 5). O tratamento sem inundação (testemunha) apresentou 3,2% de nitrogênio na parte aérea, sendo superior aos demais tratamentos submetidos a períodos de inundação (Figura 8). Entre os períodos de inundação, os tratamentos de 2, 4 e 6 dias de duração da inundação apresentaram teor médio de nitrogênio na parte aérea de 2,2%, 1,8% e 1,8%, respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si.

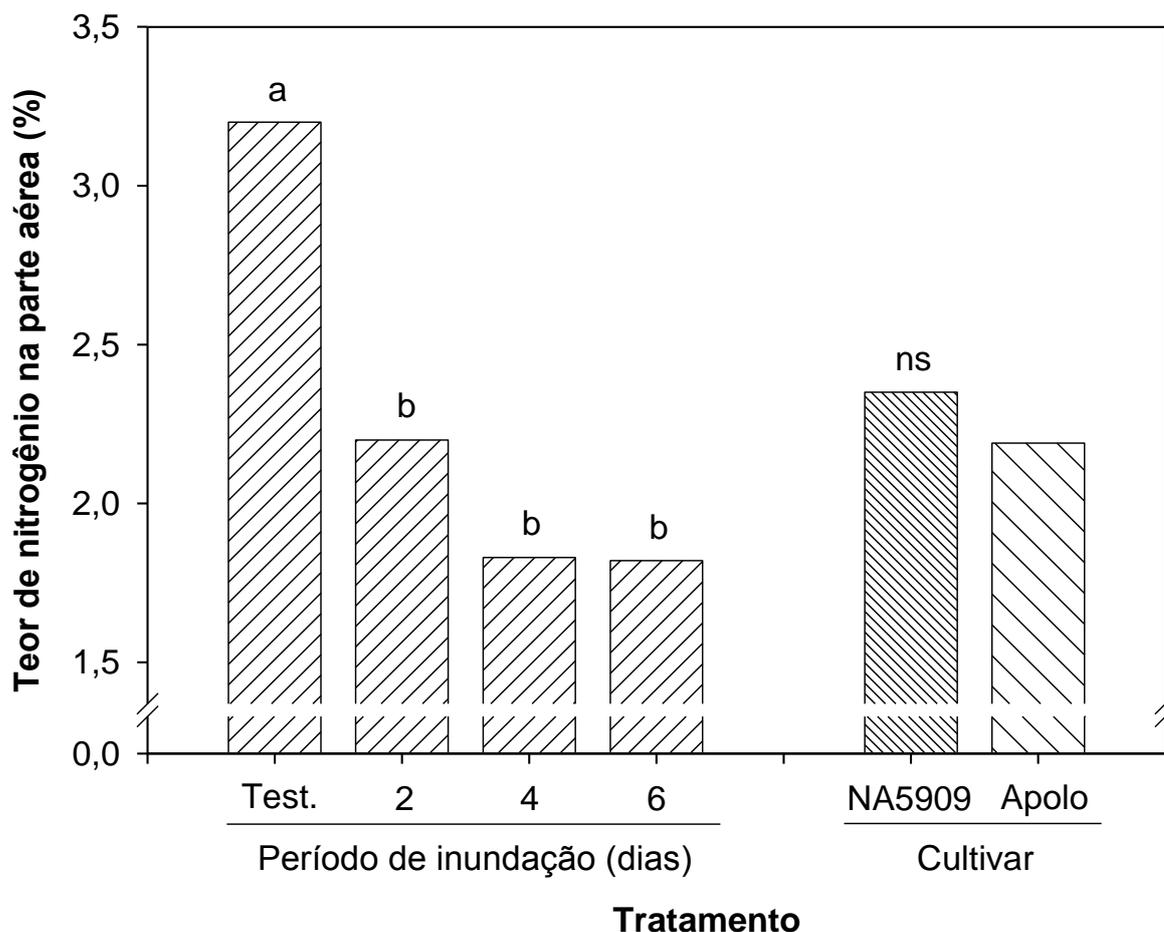


FIGURA 8. Teor de nitrogênio da parte aérea em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

A partir do teor de nitrogênio e da massa seca da parte aérea, foi estimada a quantidade de N acumulada na parte aérea das plantas. Para esta variável, a interação dos fatores cultivar e duração do período de inundação também não foi significativa, sendo apresentados apenas os efeitos principais de cultivar e período de inundação. As cultivares estudadas não apresentaram diferença estatística significativa entre si ($p>0,05$, Apêndice 5). Já em relação à duração do período de inundação, foi observada diferença na quantidade de N acumulada na

parte aérea (Figura 9). As plantas não inundadas apresentaram maior acúmulo de nitrogênio na parte aérea, em comparação aos demais tratamentos, com valor médio de 87 kg N ha^{-1} . Os tratamentos de dois e quatro dias de inundação apresentaram valores intermediários de 50 e 45 kg N ha^{-1} , respectivamente. Já o tratamento de seis dias de inundação apresentou o menor acúmulo de nitrogênio na parte aérea, com valor médio de 35 kg N ha^{-1} , o que representa redução de aproximadamente 60% no acúmulo de nitrogênio na parte aérea em função da inundação do solo por período de até 6 dias.

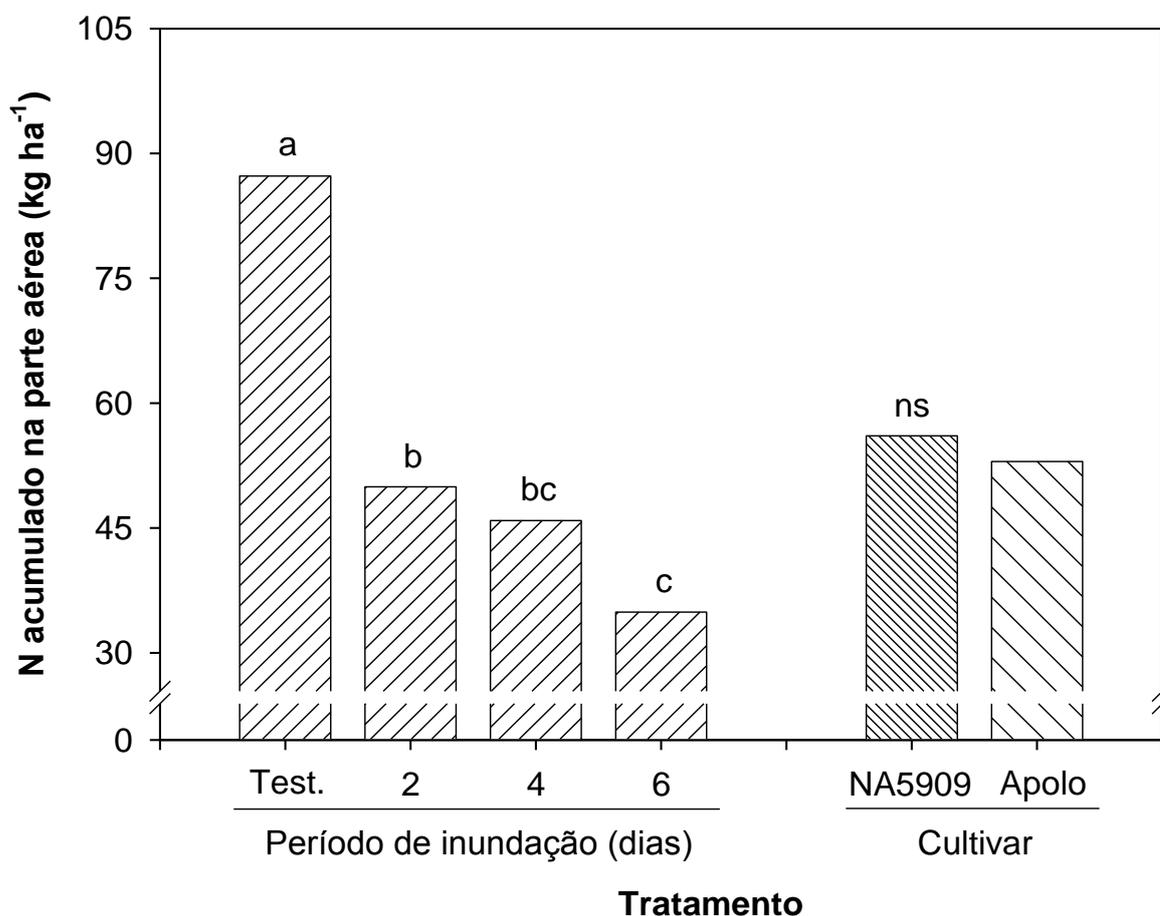


FIGURA 9. Quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

A falta de oxigênio no sistema radicular da planta de soja prejudica a nodulação e inibe a fixação biológica de nitrogênio pelas bactérias simbiotes em nódulos previamente formados (Jackson, 1985; Scott *et al.*, 1989; Amarante & Sodek, 2006). Segundo Bacanamwo & Purcell (1999a), o nitrogênio total acumulado na planta é parâmetro mais sensível ao alagamento do que o acúmulo de biomassa na parte aérea. Plantas de soja mantidas sob excesso hídrico por sete dias apresentaram redução de 15% no acúmulo de biomassa e de 55% no teor de nitrogênio na parte aérea em comparação às plantas controle não inundadas. Thomas (2004) avaliou plantas de soja inundadas por 5, 14 e 21 dias e observou menor teor de nitrogênio na parte aérea em todos os tratamentos de inundação quando comparados ao tratamento controle sem inundação.

No presente estudo, a quantidade de N acumulada na parte aérea (Figura 9) foi mais sensível ao estresse causado pelo excesso hídrico do que o acúmulo de massa seca (Figura 7), refletindo o efeito negativo da inundação do solo sobre a fixação biológica de N₂ em soja.

A fixação biológica é sensível ao alagamento do solo, pois os nódulos precisam de oxigênio para manter a respiração aeróbica necessária para manter a necessidade de ATP, indispensável para atividade da enzima nitrogenase. Apesar dos nódulos possuírem proteínas condutoras de oxigênio (leghemoglobina), as quais otimizam o transporte deste elemento, em condições de alagamento o suprimento de oxigênio não é suficiente, devido à condição de hipóxia, a qual foi caracterizada neste estudo, conforme mostrado na Tabela 3.

Além disso, em resposta à deficiência de oxigênio é observada formação de aerênquima nos nódulos, como tentativa de aclimação ao excesso hídrico, sendo que a recuperação da fixação biológica de nitrogênio coincide com a

formação destes tecidos (Bacanamwo & Purcell, 1999b; Thomas *et al.*, 2005). Desse modo, após um período de diminuição da quantidade de N acumulada, devido à inibição da fixação biológica de N₂ proporcionada pelo excesso hídrico, pode ocorrer recuperação da atividade biológica nos nódulos, em função de mecanismos de aclimatação a este estresse.

4.8 Sobrevivência e estande final de plantas

A análise de sobrevivência de plantas foi realizada quando as plantas estavam no início da formação de legumes, no estágio fenológico R3 (Fehr & Caviness, 1977). Para tanto, foi observada a porcentagem de plantas vivas em cada unidade experimental, por meio de avaliação visual.

Para o parâmetro sobrevivência de plantas, foi observada interação significativa dos fatores cultivar e duração do período de inundação (Apêndice 1). Nos tratamentos sem inundação (testemunha) e com dois dias de inundação, não foi observada diferença significativa entre as duas cultivares testadas no presente trabalho (Tabela 6). No caso do tratamento sem inundação, não foi observada mortalidade de plantas, ou seja, a sobrevivência foi de 100%. Já no tratamento submetido ao período de dois dias de inundação, a sobrevivência de plantas foi de, aproximadamente, 91% (Tabela 6).

No tratamento com período de inundação de quatro dias, foi observada diferença significativa entre as duas cultivares em função do alagamento (Tabela 6), sendo que a cultivar Apolo, considerada mais tolerante ao alagamento do solo, apresentou maior sobrevivência de plantas, quando comparada à cultivar NA5909, considerada mais sensível ao alagamento. A cultivar NA5909 apresentou mortalidade de plantas de 66,3%, enquanto que a cultivar Apolo

apresentou 40% de mortalidade de plantas com duração de quatro dias do período de inundação.

Já no período de inundação de seis dias, as cultivares voltaram a não apresentar diferença significativa entre si, provavelmente devido à severidade do estresse imposto pelo excesso hídrico, resultando em elevada mortalidade de plantas (baixa sobrevivência) nas duas cultivares testadas. Neste tratamento, a ocorrência de altas temperaturas do ar verificadas durante o período de inundação (Figura 4.a) intensificou o estresse pelo excesso hídrico.

A fotossíntese é um dos processos mais afetados por altas temperaturas, pois, nestas condições, ocorre incremento nos processos de respiração celular, reduzindo a fotossíntese líquida. Assim, além de diminuir a incorporação de carbono pela fotossíntese, ainda há perda de carbono pela respiração e fotorrespiração (Costa, 1996). Por esse motivo, foram observadas baixas taxas de sobrevivência (alta mortalidade) de plantas no tratamento submetido a seis dias de inundação, independentemente da cultivar considerada.

TABELA 6. Sobrevivência de plantas em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Cachoeirinha, RS, 2012/13.

Cultivar	Período de inundação			
	Testemunha	2 dias	4 dias	6 dias
	----- % -----			
NA5909	100,0 Aa ¹	91,2 Aa	33,7 Bb	38,2 Ab
Apolo	100,0 Aa	90,0 Aab	60,0 Abc	31,7 Ac

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ($p=0,05$).

Em relação à mortalidade de plantas, o excesso hídrico, quando em menor intensidade (dois dias de inundação), não resultou em diferenças significativas

entre as cultivares estudadas. Com períodos intermediários de excesso hídrico (quatro dias de inundação), este parâmetro se mostrou eficiente para apontar as diferenças na tolerância das duas cultivares testadas em relação ao excesso hídrico. No presente estudo, com quatro dias de inundação a cultivar considerada mais tolerante (Apolo) apresentou taxa de sobrevivência 26,3% superior a cultivar considerada mais sensível à inundação do solo (NA5909). Já quando o excesso hídrico foi mantido por períodos mais longos (seis dias de inundação), não houve diferença significativa entre as cultivares, sendo observada elevada mortalidade de plantas.

Como consequência da mortalidade, os tratamentos apresentaram variação significativa em relação ao estande final de plantas (número de plantas m^{-2}) (Figura 10). Entre as cultivares, assim como observado na sobrevivência de plantas, houve diferença significativa apenas no tratamento de quatro dias de inundação, sendo que a cultivar NA5909 apresentou menor estande final em comparação à cultivar Apolo. Em relação aos períodos de inundação, para a cultivar NA5909 os tratamentos sem inundação (testemunha) e com período de inundação de dois dias apresentaram estande final de plantas superior aos tratamentos de quatro e seis dias de inundação. No caso da cultivar Apolo, o tratamento sem inundação (testemunha) apresentou maior estande final de plantas m^{-2} , enquanto que o tratamento de seis dias de inundação apresentou o menor estande final.

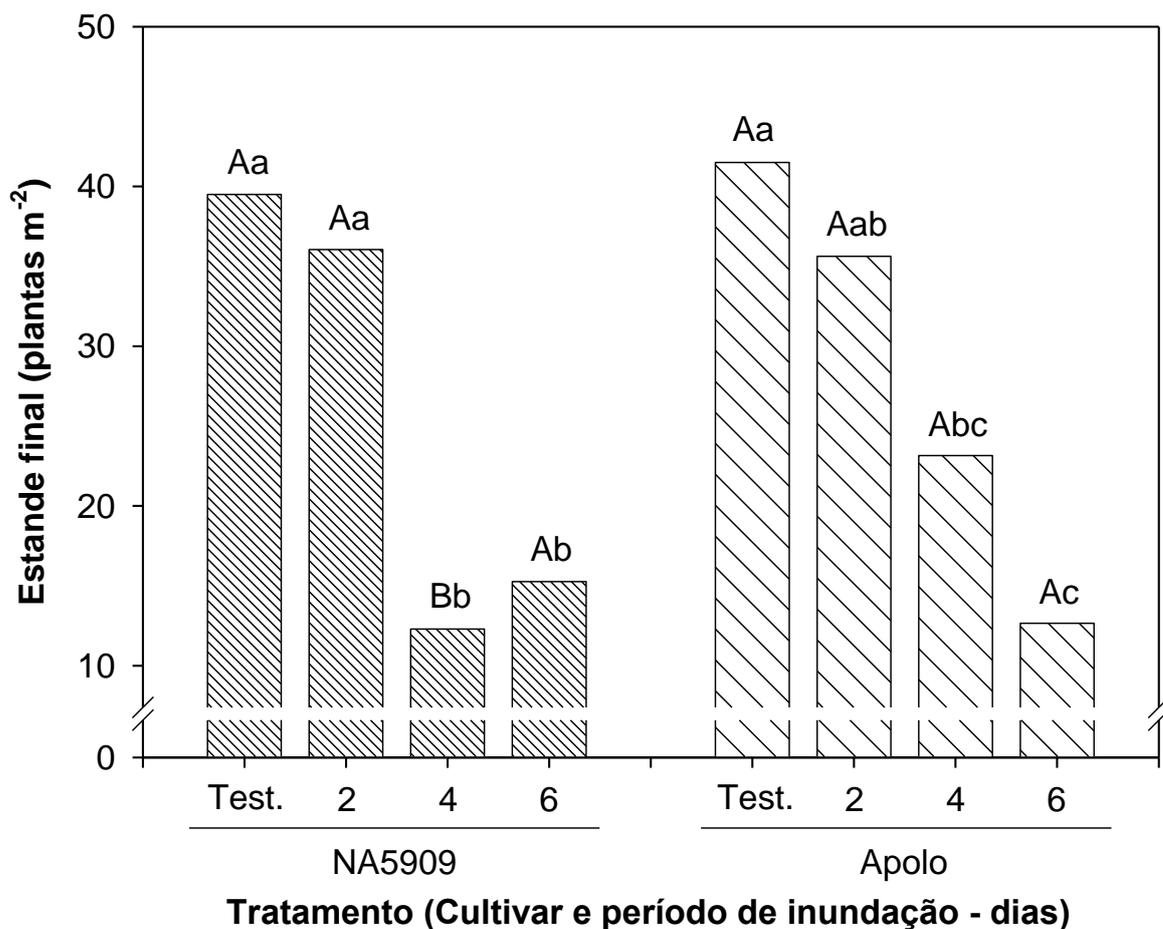


FIGURA 10. Estande final de plantas em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares dentro do período de inundação e letras minúsculas comparam períodos de inundação dentro de cultivar. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

4.9 Retenção foliar

No estágio de maturação de colheita (Estádio R8), foi verificada a presença de folhas verdes nas plantas, possivelmente em função de períodos de inundação do solo, uma vez que o excesso hídrico está associado à ocorrência do fenômeno de retenção foliar na cultura da soja (Silva *et al.*, 2013).

Assim, foi realizada avaliação visual de retenção foliar das duas cultivares testadas neste estudo, em função da duração de períodos de inundação. Para tal, utilizou-se escala com variação de 0 (nenhuma folha verde nas plantas) a 100% (todas folhas verdes nas plantas), sendo a avaliação realizada por ocasião da maturação de colheita (Estádio R8).

Para este parâmetro, a interação dos fatores cultivar e duração do período de inundação não foi significativa. Desta maneira, são apresentados apenas os efeitos principais de cultivar e duração do período de inundação. Entre as cultivares testadas, foi observada diferença estatística na retenção foliar ($p < 0,01$, Apêndice 3). A cultivar Apolo apresentou menor retenção foliar do que a cultivar NA5909 (Figura 11). A porcentagem de retenção foliar, ou seja, a porcentagem de folhas verdes nas plantas no estágio de maturação de colheita (estádio R8), foi de 43,7% e 90,6% para as cultivares Apolo e NA5909, respectivamente.

A planta de soja, sob condições de excesso hídrico, aborta flores e legumes de maneira proporcional à intensidade do estresse. A retenção foliar nessas situações está associada à diminuição da demanda por assimilados da fotossíntese pelos órgãos reprodutivos da planta, ou seja, redução na força de dreno (Neumaier *et al.*, 2000).

Em relação à duração do período de inundação, não foi observada diferença estatística entre os tratamentos ($p > 0,05$, Apêndice 3). Entretanto, a alta

retenção foliar observada neste estudo pode ser explicada pelo cultivo em solo hidromórfico, juntamente com o aumento da precipitação pluvial a partir do terceiro decêndio de fevereiro até o segundo decêndio de março (Figura 3.b), sendo que a colheita da soja foi realizada no dia 18/03/2013. Assim, mesmo as sub-parcelas que não foram inundadas, provavelmente, estiveram sujeitas a alagamentos periódicos, que são característicos em períodos chuvosos, associado ao cultivo em solos hidromórficos (Pauletto *et al.*, 1998).

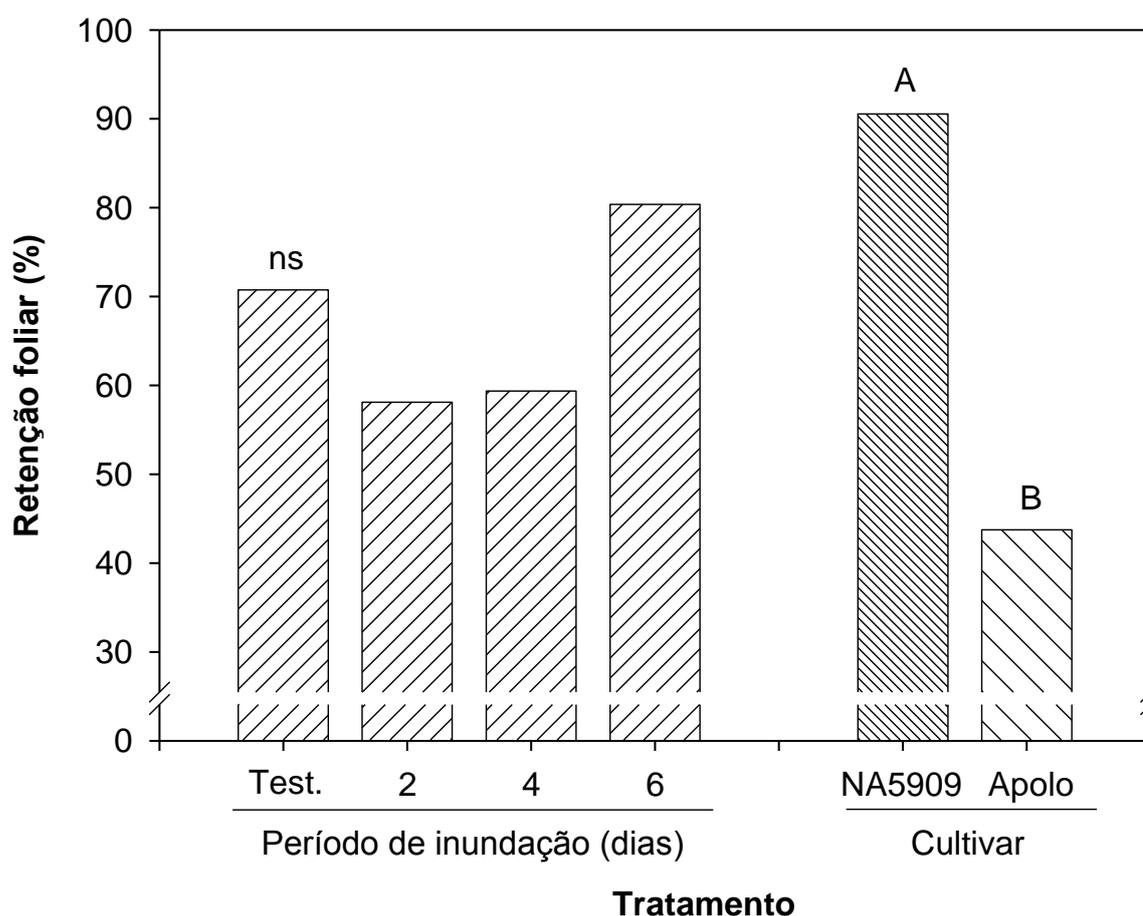


FIGURA 11. Retenção foliar no estágio de maturação de colheita em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

4.10 Estatura de plantas na colheita

Para esta variável, não houve interação significativa dos fatores cultivar e duração do período de inundação, sendo verificado apenas efeito principal significativo da duração do período de inundação (Apêndice 3).

Conforme mostrado na Figura 12, o tratamento sem inundação apresentou maior estatura de planta (81 cm) e o tratamento de seis dias de inundação a menor estatura (50 cm). Observa-se que a estatura de planta na colheita diminuiu à medida que a duração do período de inundação aumentou (Figura 12). Por outro lado, entre as duas cultivares testadas não foi observada diferença estatística significativa em relação a esse parâmetro.

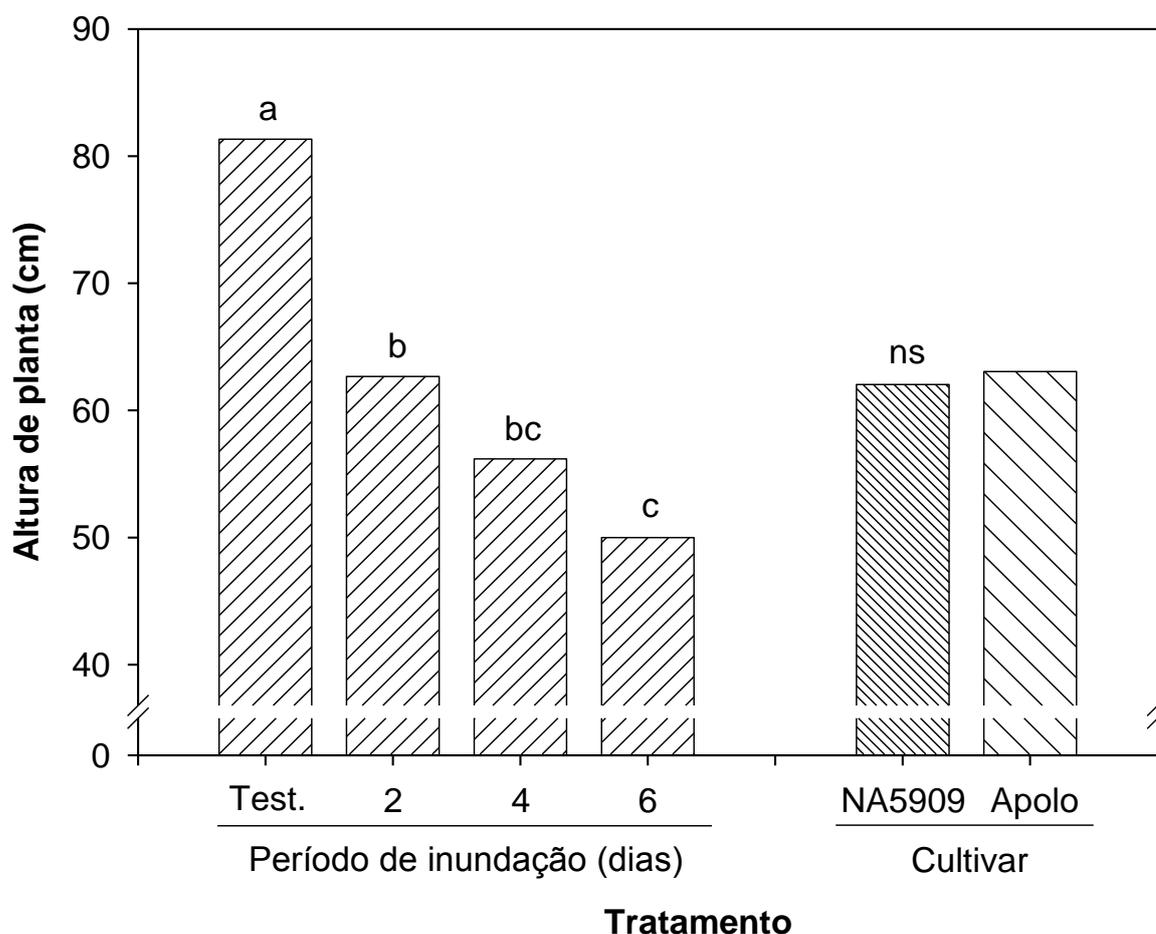


FIGURA 12. Estatura de planta no momento da colheita em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

Segundo Bacanamwo & Purcel (1999a), períodos de inundação causam diminuição considerável no acúmulo de biomassa da parte aérea, sendo que, quanto mais longo o período de inundação, maior será o prejuízo para a planta. Os resultados obtidos neste experimento, os quais mostram a redução gradativa na estatura de plantas em função do aumento da duração do período de inundação, corrobora com resultados reportados em outros estudos, que mostram que a inundação do solo durante o período vegetativo de desenvolvimento da soja reduz a estatura de planta (Cho & Yamakawa, 2006).

4.11 Rendimento de grãos e componentes do rendimento de grãos

Em relação ao rendimento de grãos, a interação dos fatores cultivar e duração do período de inundação não foi significativa, sendo significativo apenas o efeito principal da duração do período de inundação. Já as cultivares avaliadas Apolo e NA5909 não apresentaram diferença significativa entre si em relação a este parâmetro (Figura 13, Apêndice 6).

A planta de soja é considerada sensível ao estresse causado pelo excesso hídrico em todas as fases de desenvolvimento (Githiri *et al.*, 2006). Entretanto, há variabilidade de tolerância entre os genótipos (Thomas, 2010).

No presente estudo, a cultivar Apolo foi utilizada por ter apresentado maior tolerância ao excesso hídrico em estudos anteriores (Oliveira *et al.*, 2012; Pazzin, 2012). Entretanto, nas condições deste estudo, o rendimento de grãos não foi um bom parâmetro para avaliar a tolerância das cultivares ao excesso hídrico. Segundo Scott (1989), quando o excesso hídrico ocorre no período vegetativo, como no caso do presente estudo, o crescimento das plantas é mais afetado do que quando o estresse ocorre no período reprodutivo, quando o rendimento de grãos é mais afetado.

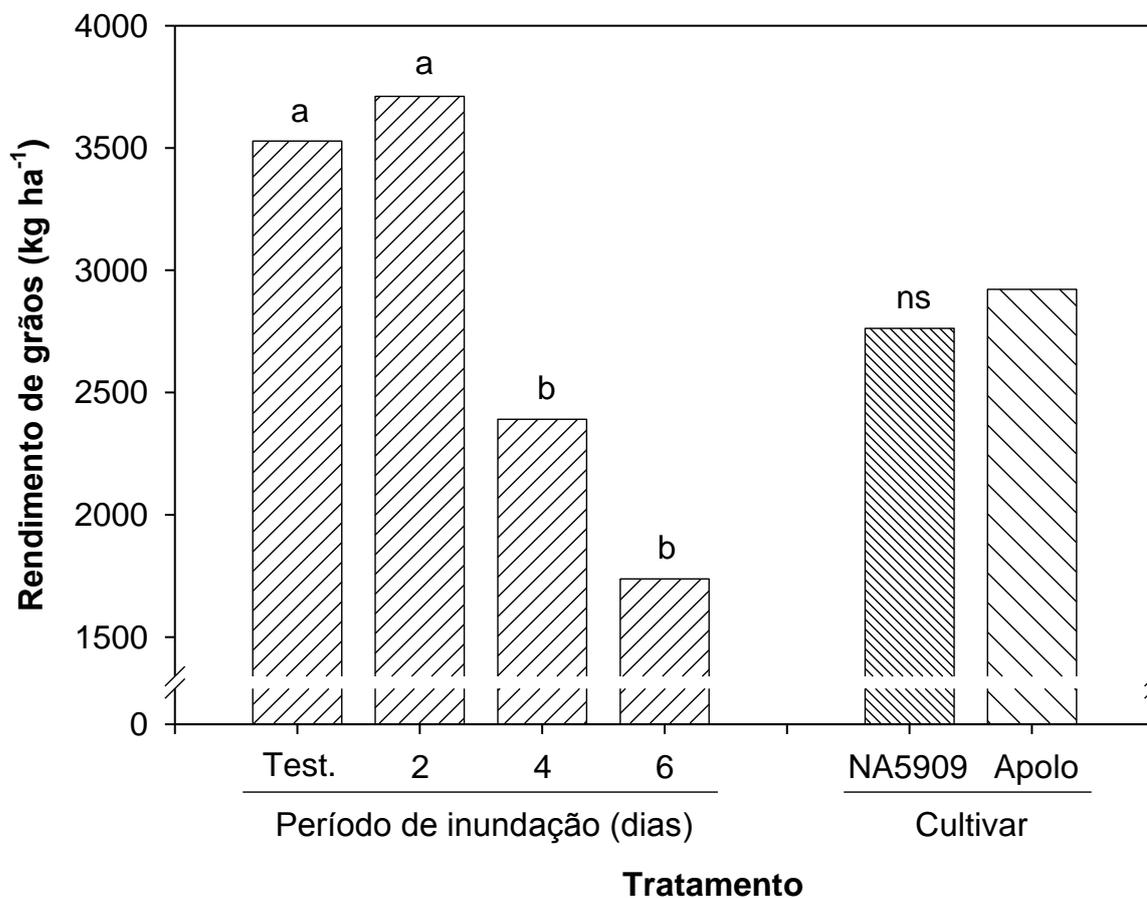


FIGURA 13. Rendimento de grãos de duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

Houve diferença significativa para os períodos de inundação (Figura 13). Os tratamentos testemunha (sem inundação) e com dois dias de inundação apresentaram rendimento de grãos superior aos demais tratamentos. O rendimento de grãos foi de, aproximadamente, 3.500 kg ha^{-1} , no tratamento sem inundação, e de 3.700 kg ha^{-1} , no tratamento com dois dias de inundação, não havendo diferença significativa entre eles (Figura 13).

Essa similaridade entre o tratamento testemunha (sem inundação) e o tratamento com dois dias de inundação provavelmente deve-se a ocorrência de deficiência hídrica anterior ao período de inundação (Figura 4.b), uma vez que, no momento inicial da inundação, as plantas do tratamento com dois dias de inundação possivelmente foram favorecidas pela presença da água e o estresse provocado pelo excesso hídrico foi menos intenso em relação aos demais tratamentos. Já as plantas submetidas ao estresse por inundação durante períodos mais longos (quatro e seis dias), o estresse causado pelo excesso hídrico foi acentuado pelas altas temperaturas do ar que ocorreram durante o período de inundação (Figura 4.a), as quais também se refletiram em altas temperaturas da lâmina de água (Tabela 3). Nestes tratamentos, ocorreram reduções no rendimento de grãos de, aproximadamente, 35%, com quatro dias de inundação, e 50%, com seis dias de inundação, em função da intensidade do estresse causado pelo excesso hídrico.

Assim, com dois dias de inundação o estresse provocado pelo excesso hídrico não foi suficiente para promover perdas significativas no rendimento de grãos, em comparação com o tratamento testemunha sem inundação e para diferenciar as duas cultivares em relação à tolerância ao excesso hídrico. Por outro lado, tratamentos com períodos mais longos de inundação (quatro e seis dias) resultaram em perdas em rendimento de grãos nas duas cultivares testadas.

O componente do rendimento de grãos número de legumes planta⁻¹ não variou em função das cultivares testadas, mas foi afetado significativamente pela duração do período de inundação (Figura 14). O tratamento mantido inundado por quatro dias foi superior aos demais tratamentos neste componente do rendimento de grãos, no qual observou-se valor médio de 77 legumes planta⁻¹. O tratamento

de seis dias de inundação apresentou também elevado número de legumes planta⁻¹, com valor médio de 65 legumes planta⁻¹.

Nestes tratamentos com maior duração do período de inundação foi observada elevada mortalidade de plantas (baixa sobrevivência), conforme mostrado na Tabela 6. Nesta situação, as plantas que sobreviveram ao período de inundação se desenvolveram sob baixa densidade de plantas e com maior disponibilidade de nutrientes, água e radiação solar, o que possivelmente estimulou emissão de maior número de ramos e formação de maior número de nós e, conseqüentemente, produção de maior número de legumes planta⁻¹ (Figura 14). Entretanto, a produção de maior número de legumes planta⁻¹ não foi suficiente para compensar o baixo estande final de plantas, o que levou à redução no rendimento de grãos nos tratamentos com períodos de inundação de quatro e seis dias (Figura 13). Já as plantas mantidas sem inundação apresentaram menor número de legumes planta⁻¹ se comparadas aos demais tratamentos, sendo o número médio de legumes planta⁻¹ de, aproximadamente, 48. Sendo assim, o componente número de legumes planta⁻¹ não foi, no presente estudo, parâmetro adequado para explicar a variação no rendimento de grãos, uma vez que os tratamentos que apresentaram maior número de legumes planta⁻¹ (Figura 14) não foram os mesmos de maior rendimento de grãos (Figura 13).

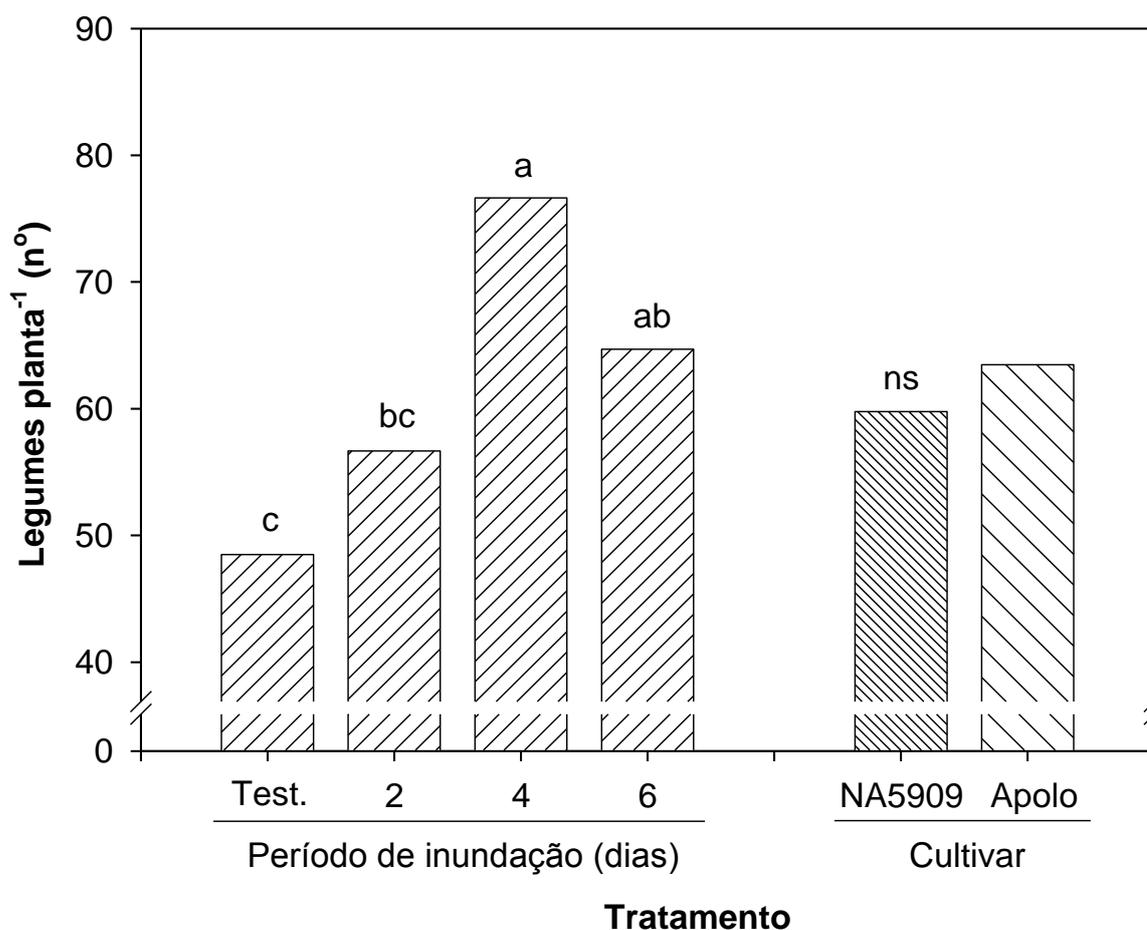


FIGURA 14. Número de legumes planta⁻¹ em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

O componente número de legumes m^{-2} foi estimado a partir do número de legumes planta⁻¹ (Figura 14) e do estande final de plantas m^{-2} (Figura 10). O número de legumes m^{-2} foi influenciado significativamente pelos fatores cultivar e duração do período de inundação (Figura 15). As duas cultivares mostraram diferença estatística significativa entre si, sendo que a cultivar Apolo apresentou maior número de legumes m^{-2} em comparação à cultivar NA5909 (Figura 15). Já em relação à duração do período de inundação, os tratamentos testemunha (sem

inundação) e dois dias de inundação apresentaram maior número de legumes m^{-2} em comparação aos demais tratamentos. As plantas que foram inundadas por quatro dias, apresentaram redução de 25% e as plantas mantidas inundadas por seis dias apresentaram redução de 55% no número de legumes m^{-2} em relação ao tratamento sem inundação (testemunha).

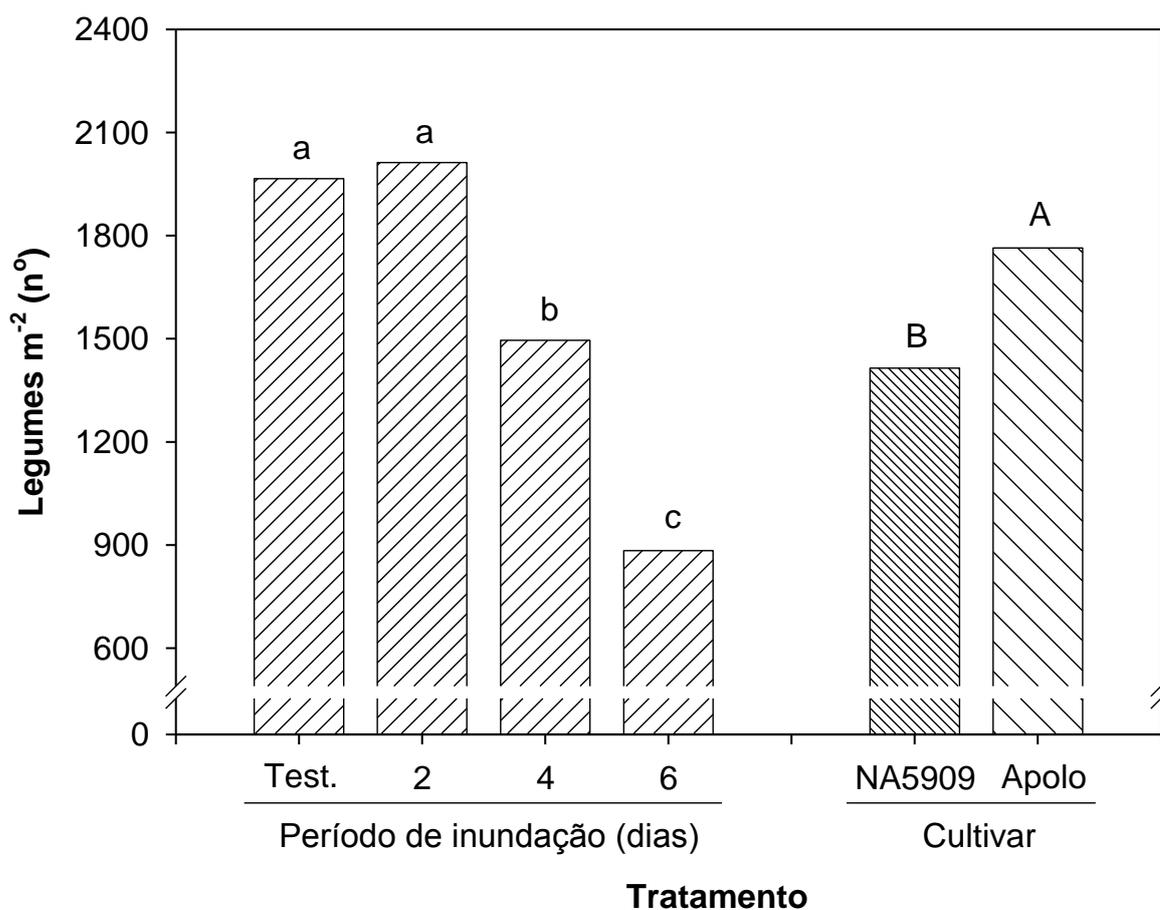


FIGURA 15. Número de legumes m^{-2} em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares e letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

O componente legumes m^{-2} foi, no presente estudo, o componente que melhor explicou a variação observada no rendimento de grãos em função da duração do período de inundação.

Em relação ao componente número de grãos legume⁻¹, houve interação significativa dos fatores cultivar e duração do período de inundação (Figura 16). O número de grãos legume⁻¹ na cultivar NA5909, considerada mais sensível a inundação, não foi afetado pela duração do período de inundação. Entretanto, no tratamento de quatro dias de inundação, a cultivar NA5909 apresentou maior número de grãos legume⁻¹ se comparada à cultivar Apolo (Figura 16).

Este comportamento pode ser explicado pela alta mortalidade de plantas observada na cultivar NA5909 no tratamento de quatro dias de inundação (Tabela 6), sendo que as plantas se desenvolveram com menor competição intraespecífica e maior disponibilidade de radiação e nutrientes.

O comportamento da cultivar Apolo variou em função da duração do período de inundação (Figura 16). O número de grãos legume⁻¹ foi menor no tratamento de quatro dias de inundação, sendo que, neste tratamento, a sobrevivência foi de 60% (Tabela 6). Já o tratamento de seis dias de inundação apresentou o maior número de grãos legume⁻¹. Neste caso, o estresse causado pelo excesso hídrico foi severo, resultando em baixa sobrevivência de plantas neste tratamento (Tabela 6), favorecendo o desenvolvimento de plantas isoladas.

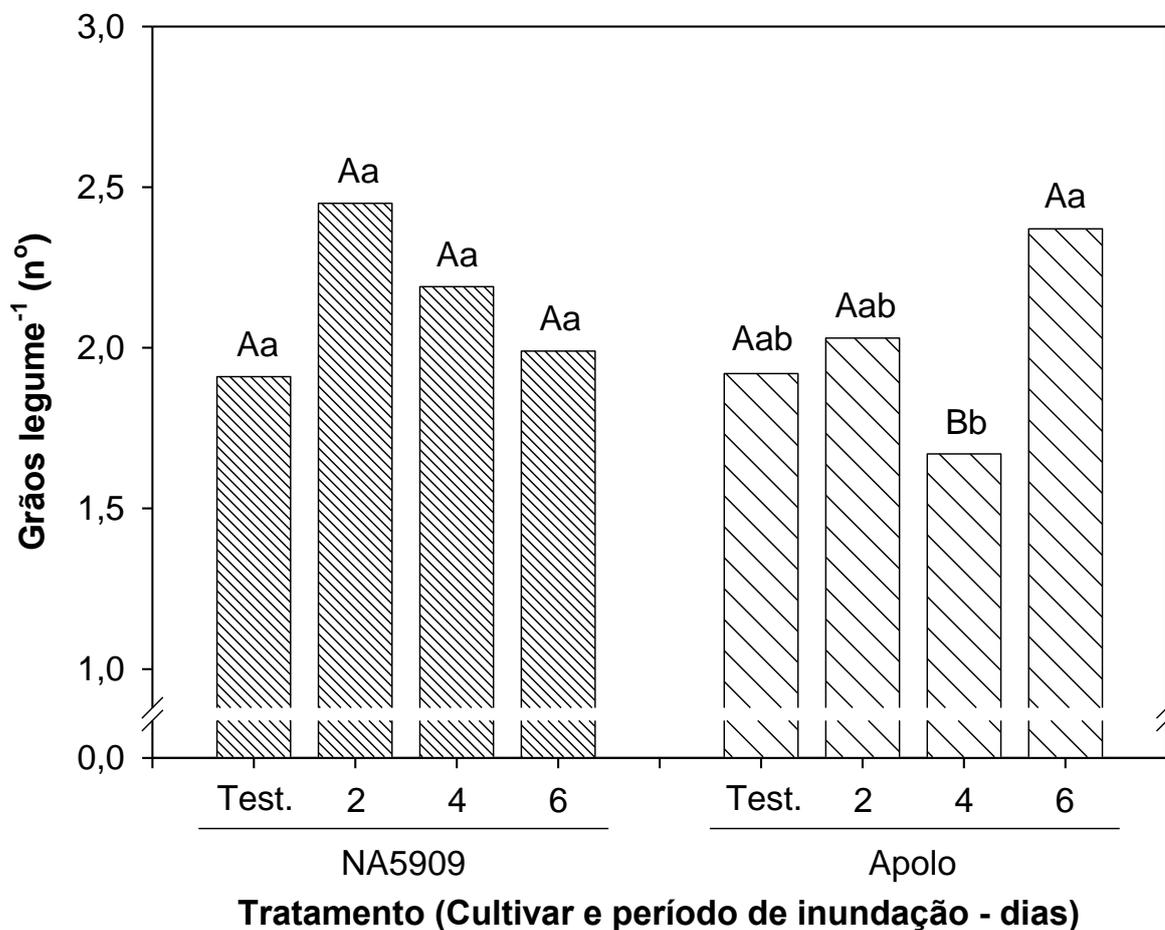


FIGURA 16. Número de grãos legume⁻¹ em duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras maiúsculas comparam cultivares dentro do período de inundação e letras minúsculas comparam períodos de inundação dentro de cultivar. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

O componente peso do grão é uma característica determinada geneticamente, mas pode apresentar variações em função do ambiente (Thomas, 2010). No presente trabalho, não foi observada interação significativa dos fatores cultivar e duração do período de inundação, sendo mostrados apenas os efeitos principais de cada fator (Figura 17, Apêndice 1).

As cultivares avaliadas não apresentaram diferença significativa entre si para este componente (Figura 17, Apêndice 1). Entretanto, o peso do grão foi afetado pela duração do período de inundação (Figura 17). Plantas mantidas inundadas por seis dias apresentaram maior peso de grão se comparadas aos demais tratamentos, sendo que o peso do grão aumentou com o aumento na duração do período de inundação. A variação no peso do grão, neste caso, ocorreu devido à grande variação observada na sobrevivência e no estande final de plantas entre os tratamentos de inundação. Nos tratamentos com elevada mortalidade de plantas (quatro e seis dias de inundação), as plantas remanescentes se desenvolveram com maior disponibilidade de água, nutrientes e radiação solar e, em consequência, apresentaram maior peso do grão.

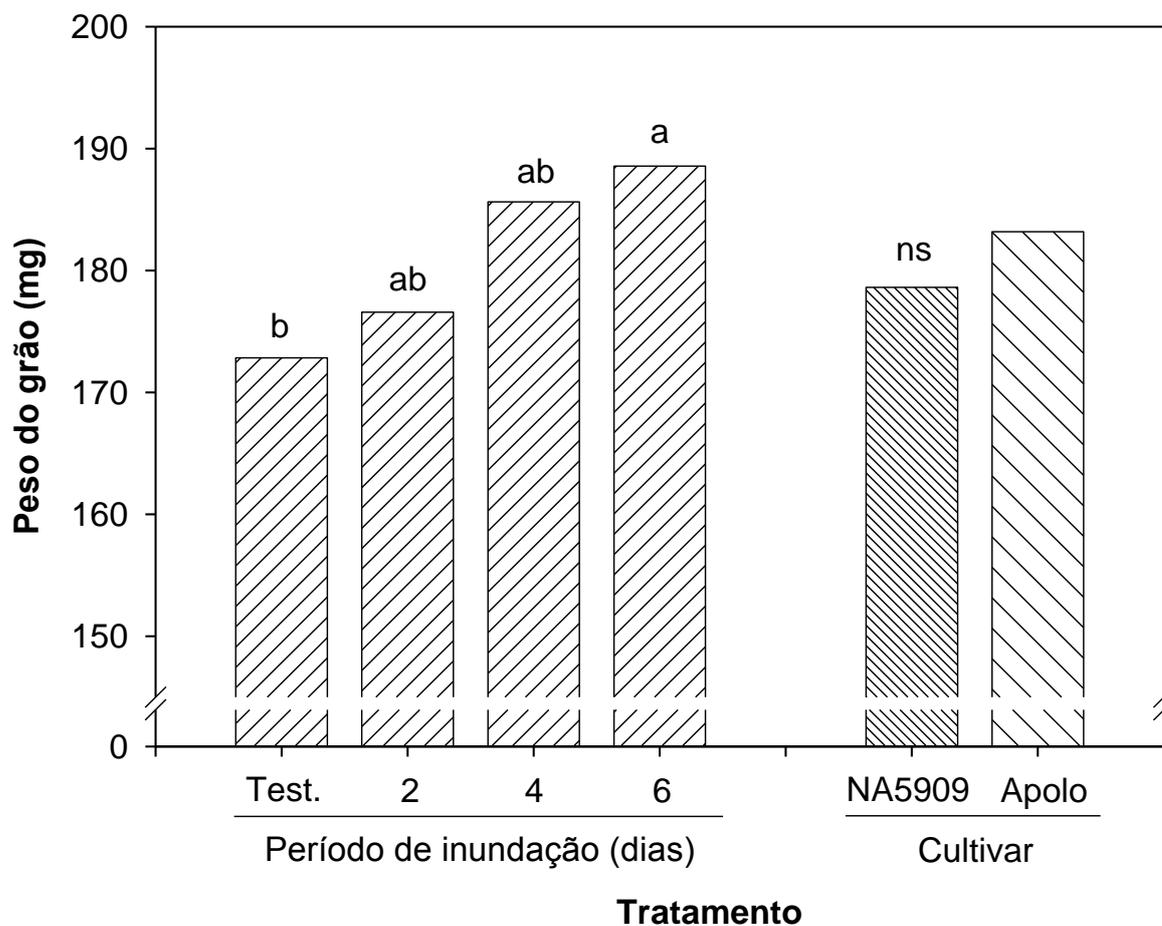


FIGURA 17. Peso do grão de duas cultivares de soja em função da duração do período de inundação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Letras minúsculas comparam períodos de inundação. ns=não significativo. Cachoeirinha, RS, 2012/2013.

A soja tem como uma de suas principais características a plasticidade fenotípica, ou seja, a capacidade de se adaptar às condições ambientais e de manejo por meio de modificações na morfologia da planta e nos componentes do rendimento de grãos (Pires *et al.*, 2000). Essa capacidade se deve, principalmente, à variação do componente do rendimento número de legumes m^{-2} (Thomas, 2010). Segundo Pires (2000), a variação na produção ou retenção de legumes $planta^{-1}$ é resultado da competição entre as plantas. Resultados

experimentais demonstram que, em baixa população, as plantas de soja aumentam a quantidade de legumes planta⁻¹. Semelhante ao observado neste estudo, os tratamentos que apresentaram maior número de legumes planta⁻¹ (Figura 14) foram os mesmos que apresentaram menor estande final de plantas (Figura 10), ou seja, menor competição entre plantas. O mesmo se aplica para explicar a variação, em menor escala, observada no peso do grão em função da duração do período de inundação (Figura 17).

O componente número de legumes m⁻² é o que melhor explica a variação no rendimento de grãos observada no presente trabalho. Os tratamentos com maior número final de plantas m⁻², ou seja, os tratamentos sem inundação e com dois dias de inundação foram superiores no rendimento de grãos em função do maior número de legumes m⁻² (Figuras 13 e 15). Por outro lado, os tratamentos com menor número final de plantas m⁻² (tratamentos com quatro e seis dias de inundação) apresentaram reduções no rendimento de grãos, apesar da compensação parcial proporcionada pela produção de maior número de legumes planta⁻¹ (Figura 14) e maior peso do grão (Figura 17), o que, contudo, não foi suficiente para evitar reduções no rendimento de grãos (Figura 13).

Em relação às cultivares NA5909 e Apolo, para a maioria das variáveis analisadas não ocorreu diferença significativa. Isso pode ter ocorrido devido à intensidade do estresse causado pelo excesso hídrico e às condições ambientais anteriores ao início dos períodos de inundação. Durante o período vegetativo de desenvolvimento, as temperaturas médias diárias do ar foram elevadas, acima da normal climática (Figura 3.a), e as plantas aceleraram o desenvolvimento. Durante o período de inundação, foi observado que algumas plantas iniciaram o processo de florescimento (Estádio R1), o que pode ter magnificado o efeito do

estresse causado pelo excesso hídrico, em função da maior sensibilidade da cultura da soja ao estresse por excesso hídrico no período reprodutivo (Linkemer *et al.*, 1998; Board, 2008).

No momento de início dos períodos de inundação, o solo encontrava-se com baixo conteúdo de umidade, em função da baixa precipitação pluvial neste período (Figura 3.b), o que provavelmente mitigou o efeito de excesso hídrico nas plantas inundadas por dois dias. O período de inundação mais longo (seis dias) foi conduzido até o dia 16/12/12. Após esse período, ocorreram precipitações pluviais de 56,8 mm e 181,8 mm no segundo e terceiro decêndios de dezembro, respectivamente (Figura 3.b). Estas precipitações ocorreram quando o solo ainda estava saturado e com elevado conteúdo de umidade, o que pode ter intensificado o efeito do estresse de excesso hídrico, principalmente no tratamento de seis dias de inundação.

5 CONCLUSÕES

O estresse causado pelo excesso hídrico afeta o teor relativo de clorofila, a eficiência fotossintética e a taxa de transporte de elétrons das cultivares avaliadas no presente estudo.

A produção de massa seca da parte aérea é afetada negativamente pelo estresse provocado pela inundação. Apesar das cultivares não apresentarem diferença significativa entre si, é observada diminuição na produção de matéria seca em função do aumento na duração do período de inundação. O teor de nitrogênio e a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea apresentam comportamento semelhante ao observado para a produção de massa seca.

Outro parâmetro que apresenta diferença significativa entre as cultivares avaliadas é a sobrevivência de plantas avaliada após os períodos de inundação. A cultivar Apolo apresenta maior sobrevivência de plantas do que a cultivar NA5909, quando submetidas a quatro dias de inundação do solo.

Neste estudo, o rendimento de grãos não apresenta diferença significativa entre as cultivares de soja e entre períodos curtos de inundação (2 dias) e a testemunha (sem inundação). Os tratamentos com períodos mais longos de inundação (4 e 6 dias) resultam em diminuição significativa no rendimento de grãos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARANTE, L.; SODEK, L. Waterlogging effect on xylem sap glutamine of nodulated soybean. **Biologia Plantarum**, Praga, v. 50, n. 3, p. 405-410, 2006.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; BORTOLINI, C. G. Teor de clorofila na folha como indicador do nível de N em cereais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 715-722, 2001.

AZEVEDO NETO, A. D. et al. Fluorescência da clorofila como uma ferramenta possível para seleção de tolerância à salinidade em girassol. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 893-897, 2011.

BACANAMWO, M.; PURCELL, L. C. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources, and hypoxia. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 50, n. 334, p. 789-796, 1999a.

BACANAMWO, M.; PURCELL, L. C. Soybean root morphological and anatomical traits associated with acclimation to flooding. **Crop Science**, Madison, v. 39, n. 1, p. 143-149, 1999b.

BAILEY-SERRES, J.; VOESENEK, L. A. C. J. Flooding stress: acclimations and genetic diversity. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 59, n. 1, p. 313-339, 2008.

BAIS, H. P. et al. How plants communicate using the underground information superhighway. **Trends in Plant Science**, London, v. 9, n. 1, p. 26-32, 2004.

BAKER, N. R.; ROSENQVIST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 403, p. 1607-1621, 2004.

BALDASSARRE, V.; CABASSI, G.; FERRANTE, A. Use of chlorophyll a fluorescence for evaluating the quality of leafy vegetables. **Australian Journal of Crop Science**, Collingwood, v. 5, n. 6, p. 735-741, 2011.

BARBAGALLO, R. P. et al. Rapid, noninvasive screening for perturbations of metabolism and plant growth using chlorophyll fluorescence imaging. **Plant Physiology**, Rockville, v. 132, n. 2, p. 485-493, 2003.

BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 78 p.

BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque "classe A" e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 251-259, 1986.

BIZARRO, M. J. **Inoculação de soja em solo submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

BOARD, J. E. Waterlogging effects on plant nutrient concentrations in soybean. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 31, n. 5, p. 828-838, 2008.

BOOIJ, R.; VALENZUELA, J. L.; AGUILERA, C. Determination of crop nitrogen status using non-invasive methods. In: HAVERKORT, A. J.; MACKERRON, D. K. L. **Management of nitrogen and water in potato production**. The Netherlands: Wageningen Pers, 2000. 353 p.

BORU, G. et al. Responses of soybean to oxygen deficiency and elevated root-zone carbon dioxide concentration. **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, n. 1, p. 447-453, 2003.

BOWN, A. W.; HALL, D. E.; MACGREGOR, K. B. Insect footsteps on leaves stimulate the accumulation of 4-aminobutyrate and can be visualized through increased chlorophyll fluorescence and superoxide production. **Plant Physiology**, Rockville, v. 129, n. 4, p. 1430-1434, 2002.

BRASMAX GENÉTICA LTDA. **Catálogo de Cultivares**. Disponível em: <http://www.brasmaxgenetica.com.br/cultivaresPre.php>. Acesso em: dia 4 abr. 2013.

BRITTO, D. et al. Futile transmembrane NH_4^+ cycling: a cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 98, n. 7, p. 4255-4258, 2001.

BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. **Biochemistry and Molecular Biology of Plants**. Rockville: American Society of plant Physiologists, 2000. 1367 p.

CAMARGO, F. A. O. et al. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 171-180, 1999.

CARGNELUTTI, A. et al. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1157-1166, 2004.

CARVALHO FILHO, A.; AMABILE, R. F. Biologia da soja. In: MORAES, A. A. C.; SILVA, A. L. da. **Soja: suas aplicações**. Rio de Janeiro: MEDSI, 1996. 259p.

CHA-UM, S.; ULZIIBAT, B.; KIRDMANEE, C. Effects of temperature and relative humidity during in vitro acclimatization, on physiological changes and growth characters of *Phalaenopsis* adapted to in vivo. **Australian Journal Crop Science**, Collingwood, v. 4, n. 9, p. 750-756, 2010.

CHO, W.; YAMAKAWA, T. Effects on growth and seed yield of small seed soybean cultivars of flooding conditions in paddy field. **Journal of Faculty of Agriculture**, Fukuoka, v. 51, n. 2, p. 189-193, 2006.

CONAB. **Indicadores da Agropecuária**: acompanhamento mensal, maio 2014. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: dia 16 jun. 2014.

CORREIA, S. L. et al. Estratégias de manejo da palha de azevém para cultivo do arroz irrigado em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 512-520, 2013.

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

DAT, J. F. et al. Sensing and signalling during plant flooding. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 42, n. 4, p. 273-282, 2004.

DAVANSO, V. M. et al. Photosynthesis, growth and development of *Tabebuia avellanedae* Lor. Ex Griseb. (*Bignoniaceae*) in flooded soil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 375-384, 2002.

DENNIS, E. S. et al. Molecular strategies for improving waterlogging tolerance in plants. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v. 51, n. 342, p. 89-97, 2000.

DREW, M. C. Oxygen deficiency and root metabolism: injury and acclimation under hypoxia and anoxia. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo alto, v. 48, n. 1, p. 223-250, 1997.

DWYER, L. M.; TOLLENAAR, M.; HOUWING, L. A nondestructive method to monitor leaf greenness in corn. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 71, n. 2, p. 505-509, 1991.

FANTE, C. A. **Teores de isoflavonas no grão e respostas fisiológicas em cultivares de soja submetidas ao alagamento, em diferentes estádios**. 2008. 48 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

FANTE, C. A. et al. Respostas fisiológicas em cultivares de soja submetidas ao alagamento em diferentes estádios. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 2, p. 253-261, 2010.

FAO. **FAO Statistical Yearbook 2013**: world food and agriculture. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/018/i3107e/i3107e00.htm>>. Acesso em: dia 10 abr. 2014.

FEE/RS. **Dados Abertos**: Agricultura. Disponível em: <<http://dados.fee.tche.br/>>. Acesso em: dia 16 jun. 2014.

FEHR, W.; CAVINESS, R. H. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine Max* (L.) Merrill. **Plant Science for a Better World**, Madison, v. 11, n. 6, p. 929-931, 1977.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FUKAO, T.; BAILEY-SERRES, J. Plant responses to hypoxia – is survival a balancing act? **Trends in Plant Science**, London, v. 9, n. 9, p. 449-456, 2004.

GIBBERD, M. R. et al. Waterlogging tolerance among a diverse range of *Trifolium* accessions is related to root porosity lateral root formation and aerotropic rooting. **Annals of Botany**, Oxford, v. 88, n. 4, p. 579-589, 2001.

GIBBS, J.; GREENWAY, H. Review: Mechanisms of anoxia tolerance in plants. I. Growth, survival and anaerobic catabolism. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 30, n. 1, p. 1-47, 2003.

GIONGO, A. et al. Genetic diversity and simbiotic efficiency of population of rhizobia of *Phaseolus vulgaris* L. in Brazil. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 43, n. 1, p. 593-598, 2007.

GITHIRI, S. M. et al. QTL analysis of flooding tolerance in soybean at an early vegetative growth stage. **Plant Breeding**, Berlin, v. 125, n. 6, p. 613-618, 2006.

HERRIDGE D. F.; PEOPLES, M. B. Ureide assay for measuring nitrogen fixation by nodulated soybean calibrated by 15 N methods. **Plant Physiology**, Rockville, v. 93, n. 2, p. 495-503, 1990.

HIRSCH, A. M. et al. Molecular signals and receptors: Controlling rhizosphere interactions between plants and other organisms. **Ecology**, Washington, v. 84, n. 4, p. 858-868, 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 15 jun. 2013.

- IRFAN, M. et al. Physiological and biochemical changes in plants under waterlogging. **Protoplasma**, Heidelberg, v. 241, n. 1, p. 3-17, 2010.
- IRGA. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Porto Alegre, 2001. 128 p.
- IRGA. **Evolução da fertilidade dos solos cultivado com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA, 2010. 38 p. (Boletim Técnico, 10).
- JACKSON, M. B. Ethylene and responses of plants to soil waterlogging and submergence. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 36, n.1, p. 145-174, 1985.
- JACKSON, M. B.; COLMER, T. D. Response and adaptation by plants to flooding stress. **Annals of Botany**, Oxford, v. 96, n. 1, p. 501-505, 2005.
- KOMATSU, S. et al. Characterization of a novel flooding stress-responsive alcohol dehydrogenase expressed in soybean roots. **Plant Molecular Biology**, Dordrecht, v. 77, n. 3, p. 309-322, 2011.
- LADYGIN, V. G. The effect of root hypoxia and iron deficiency on the photosynthesis, biochemical composition, and structure of pea chloroplasts. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 51, n. 1, p. 28-40, 2004.
- LANGE, C. **Avaliação de desempenho agrônômico de cultivares comerciais de soja cultivados em solo de várzea**. In: REUNIÃO ANUAL DE PESQUISA, 8., 2010. **Anais...** Cachoeirinha: [s.n.], 2010. p. 541-562.
- LAZÁR, D. Chlorophyll-a fluorescence induction. **Biochemistry Biophysica Acta**, Amsterdam, v. 1412, n. 1, p. 1-28, 1999.
- LICAUSI, F.; PERATA, P. Low oxygen signaling and tolerance in plants. **Advances in Botanical Research**, Londres, v. 50, n. 4, p. 139-198, 2009.
- LIESACK, W.; SCHNELL, S.; REVSBECH, N. P. Microbiology of flooded rice paddies. **FEMS Microbiology Reviews**, Malden, v. 24, n. 5, p. 625-645, 2000.
- LIEVENANTONIOU, C. A.; WHITTAM, T. S. Specificity in the symbiotic association of *Lotus corniculatus* and *Rhizobium loti* from natural populations. **Molecular Ecology**, Oxford, v. 6, n. 7, p. 629-639, 1997.
- LINKEMER, G.; BOARD, J. E.; MUSGRAVE, M. E. Waterlogging effects on growth and yield components in late-planted soybean. **Crop Science**, Madison, v. 38, n. 6, p. 1576-1584, 1998.

- MARCHESAN, E. et al. Resposta de sistemas de implantação na resistência mecânica do solo a penetração e na produtividade de soja em área de várzea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: [s.n.], 2013. p. 1120-1123.
- MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 51, n. 345, p. 659-668, 2000.
- MINOLTA CAMERA Co. Ltda. **Manual for Chlorophyll meter SPAD 502**. Osaka: Radiometric Instruments divisions, 1989, 22 p.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Mi microbiologia e Bioquímica do solo**. Fixação biológica de nitrogênio atmosférico. Lavras: Editora UFLA, 2005. 471p.
- NEUMIER, N. et al. Estresses de ordem ecofisiológica. In: BONATO, E. R. **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 253 p.
- NIDERA SEMENTES LTDA. **Catálogo de Cultivares**. Disponível em: <http://www.niderasementes.com.br/>. Acesso em: 4 dia abr. 2013.
- NOVAIS, R. F. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. 1017 p.
- OLIVEIRA, H. C.; SODEK, L. Effect of oxygen deficiency on nitrogen assimilation and amino acid metabolism of soybean root segments. **Amino Acids**, Vienna, v. 44, n. 2, p. 743-755, 2013.
- OLIVEIRA, J. G.; ALVES, P. L. C. A.; MAGALHÃES, A. C. The effect of chilling on the photosynthetic activity in coffee (*Coffea arabica* L.) seedlings. The protective action of chloroplastid pigments. **Brazilian Journal Plant Physiology**, Londrina, v. 14, n. 2, p. 95-104, 2002.
- OLIVEIRA, A. C. B. et al. Avaliação de genótipos de soja submetidos ao encharcamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 6., 2012. Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: EMBRAPA, 2012. p. 1-3.
- PAULETO, E. A.; SOUZA, R. O.; GOMES, A. S. Caracterização e manejo de solos de várzea cultivados com arroz irrigado. In: PESKE, S. T. et al. **Produção de arroz irrigado**. Pelotas: UFPel, 1998. 659 p.
- PAZZIN, D. **Comportamento de cultivares de soja cultivadas em solos de várzea submetidas a períodos de excesso hídrico**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologias de Sementes, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

- PEREIRA, C. R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura da soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- PIEKIELEK, W. P.; FOX, R. H. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 1, p. 59-65, 1992.
- PIRES, J. L. F. et al. Efeito de populações e espaçamentos sobre o potencial de rendimento da soja durante a ontogenia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1541-1547, 2000.
- PIRES, J. L. F.; SOPRANO, E.; CASSOL, B. Adaptações morfofisiológicas da soja em solo inundado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 1, p. 41-50, 2002.
- RHINE, M. et al. Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean cultivars. **Irrigation Science**, Nova Iorque, v. 28, n. 2, p. 135-142, 2010.
- ROHACEK, K.; SOUKUPOVA, J.; BARTAK, M. Chlorophyll fluorescence: a wonderful tool to study plant physiology and plant stress. **Plant Cell Compartments**, Kerala, v. 37, n. 2, p. 41-104, 2008.
- ROSA, G. F. et al. Acúmulo de massa seca em genótipos de soja fixando N₂ simbioticamente sob influência do alagamento. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16., 2007, Pelotas. **Anais...** Pelotas: UFPel, 2007.
- SCHOFFEL, E. R. et al. Excesso hídrico sobre os componentes do rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 7-12, 2001.
- SCHOENFELD, R. **Sistemas de rotação arroz e soja em sucessão a plantas de cobertura em planossolo halpico**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- SCHOLLES, D.; VARGAS, L. K. Viabilidade da inoculação de soja com estirpes de *Bradyrhizobium* em solo inundado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 973-979, 2004.
- SCOTT, H. D. et al. Flood duration effects on soybean growth and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 631-636, 1989.
- SILVA, J. A.; CANTERI, M. G.; SILVA, A. L. Haste verde e retenção foliar na cultura da soja. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 39, n. 3, p. 151-156, 2013.

SMEAL, D.; ZHANG, H. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Oxford, v. 25, n. 9, p. 1495-1503, 1994.

SOSBAI. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Itajaí: SOSBAI, 2012. 179 p.

SOUSA, R. O.; BOHNEN, H.; MEURER, E. J. Composição da solução de um solo alagado conforme a profundidade e o tempo de alagamento, utilizando novo método de coleta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 343-348, 2002.

SOUSA, S.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos alagados. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. Porto Alegre: GÊNESIS, 2000. 175 p.

STRASSER, R. J.; SRIVASTAVA, A. G. Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria. **Photochemistry and Photobiology**, Hoboken, v. 61, n. 1, p. 32-42, 1995.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER RS, 2008. 222 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.

TAKAHASHI, T.; HOSOKAWA, H.; MATSUZAKI, M. N₂ fixation of nodules and N absorption by soybean roots associated with ridge tillage on poorly drained upland fields converted from rice paddy fields. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 52, n. 3, p. 291-299, 2006.

TEDESCO, J. M. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

THOMAS, A. L. **Modificações morfológicas e assimilação de nitrogênio em plantas de soja (*Glycine max*) com sistemas radiculares sob deficiência de O₂**. 2004. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal, Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

THOMAS, A. L. Modificações morfológicas na planta de soja como indicadoras da tolerância à inundação. In: REUNIÃO DA PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 36., 2008, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: FEPAGRO, 2008. p. 75.

THOMAS, A. L. Tolerância de genótipos de soja à inundação do sistema radicular. In: REUNIÃO DA PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 36., 2008, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: FEPAGRO, 2008. p.74

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

THOMAS, A. L.; GUERREIRO, S. M. C.; SODEK, L. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root system of nodulated soybean. **Annals of Botany**, Oxford, v. 96, n. 7, p. 1191-1198, 2005.

THOMAS, A. L.; PIRES, J. L. F.; MENEZES, V. G. Rendimento de grãos de cultivares de soja em solo de várzea. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 107-112, 2000.

USDA. Department of Agriculture. Economic Research Service. **Data products**. Washington, 2013. Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov>>. Acesso em: 5 dia abr. 2014.

VAN TOAI, T. T.; BEERLEIN, J. F. Genetic variability for flooding tolerance in soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 4, p. 1112-1115, 1994.

VAN TOAI, T. T. et al. Flooding tolerance of soybean [*Glycine max* (L.) merr.] germplasm from southeast asia under field and screen-house environments. **The Open Agriculture Journal**, Ohio, v. 4, n. 1, p. 38-46, 2010.

VEDELAGO, A. et al. **Fertilidade e aptidão de uso dos solos para o cultivo da soja nas regiões arroyeiras do Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA, 2012. 56 p. (Boletim Técnico, 9).

VOESENEK L. A. C. J. et al. Plant hormones regulate fast shoot elongation under water: from genes to communities. **Ecology**, Washington, v. 85, n. 1, p. 16-27, 2004.

WAGNER, J. F. Parâmetros fisiológicos e nutricionais de cultivares de soja resistentes ao glifosato em comparação com cultivares isogênicas próximas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 3, p. 393-399, 2014.

WANG, W.; VINOCCUR, B.; ALTMAN, A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. **Planta**, Heidelberg, v. 218, n. 1, p. 1-14, 2003.

7 APÊNDICES

APÊNDICE 1. Quadrados médios obtidos na análise de variância do peso médio do grão e estande inicial, sobrevivência e estande final de plantas. EEA/IRGA, 2012/2013.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Peso do grão	Estande inicial	Sobrevivência	Estande final
Parcela principal					
Blocos	3	106,6 ^{ns}	7,12 ^{ns}	339,6 ^{ns}	50,4 ^{ns}
Cultivar (C)	1	167,4 ^{ns}	6,12 ^{ns}	171,1 ^{ns}	48,2 ^{ns}
Resíduo (a)	3	82,7	4,12	108,2	16,7
Subparcela					
Inundação (I)	3	440,5*	16,45 ^{ns}	8189,6**	1376,4**
Resíduo (b)	9	111,7	6,68	113,9	17,43
C x I	3	7,7 ^{ns}	5,45 ^{ns}	431,5**	69,75*
Resíduo (c)	9	55,5	2,56	61,4	12,99
CV Cultivar (%) ¹		5,0	5,2	15,3	15,1
CV Inundação (%) ¹		5,8	6,6	15,7	15,5

¹ Coeficiente de variação

^{ns} Não significativo

* Significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 2. Quadrados médios obtidos na análise de variância no teor de manganês, ferro e N mineral (amônia, nitrato e nitrito) na solução durante a inundação. EEA/IRGA, 2012/2013.

Fontes de Variação	Graus de liberdade	Mn	Fe	N mineral
Blocos	7	0,059	0,002	165,7
Tratamento	1	0,011 ^{ns}	0,018*	997,3*
Resíduos	7	0,014	0,002	109,6
CV (%) ¹		42,2	66,7	44,0

¹ Coeficiente de variação

^{ns} Não significativo

* Significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 3. Quadrados médios obtidos na análise de variância da estatura de planta, teor relativo de clorofila na folha (unidades SPAD) em três datas de avaliação e retenção foliar. EEA/IRGA, 2012/2013.

Fontes de Variação	Graus de liberdade	Estatura de planta	Teor relativo de clorofila (SPAD)			Retenção foliar
			07/12	14/12	17/12	
Parcela principal						
Blocos	3	167,7 ^{ns}	0,2 ^{ns}	5,5 ^{ns}	2,15 ^{ns}	761,5 ^{ns}
Cultivar (C)	1	8,21 ^{ns}	76,8 ^{ns}	235,4 ^{**}	24,67 [*]	17531,3 ^{**}
Resíduo (a)	3	17,79	15,1	4,88	2,42	395,7
Subparcela						
Inundação (I)	3	1469,7 ^{**}	3,0 ^{ns}	2,06 ^{ns}	83,67 ^{**}	879,4 ^{ns}
Resíduo (b)	9	26,65	3,8	6,39	5,5	380,2
C x I	3	32,42 ^{ns}	1,8 ^{ns}	15,5 ^{**}	5,53 ^{ns}	186,7 ^{ns}
Resíduo (c)	9	14,61	5,3	1,29	1,75	138,3
CV Cultivar (%) ¹		6,7	11,1	7,2	5,5	29,6
CV Inundação (%) ¹		8,2	5,6	8,3	8,2	29,0

¹ Coeficiente de variação

^{ns} Não significativo

* Significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 4. Quadrados médios obtidos na análise de variância da fluorescência da clorofila para os parâmetros de eficiência quântica (YIELD) e taxa de transporte de elétrons (ETR). EEA/IRGA, 2012/2013.

Fontes de Variação	Graus de liberdade	YIELD		ETR	
		14/12	17/12	14/12	17/12
Parcela principal					
Blocos	3	0,001 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	428,544 ^{ns}	139,6 ^{ns}
Cultivar (C)	1	0,00007 ^{ns}	0,0066 ^{ns}	227,004 ^{ns}	457,7 ^{ns}
Resíduo (a)	3	0,00156	0,0073	1139,662	378,2
Subparcela					
Inundação (I)	3	0,0105 ^{**}	0,0641 ^{**}	16554,98 ^{**}	1937,6 ^{**}
Resíduo (b)	9	0,001	0,0069	443,5	407,9
C x I	3	0,0002 ^{ns}	0,0152 ^{ns}	127,5 ^{ns}	220,2 ^{ns}
Resíduo (c)	9	0,001	0,012	476,8	968,2
CV Cultivar (%) ¹		17,6	24,2	24,4	15,0
CV Inundação (%) ¹		14,5	23,6	15,3	15,6

¹ Coeficiente de variação

^{ns} Não significativo

* Significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 5. Quadrados médios obtidos na análise de variância da produção de massa seca, teor de nitrogênio e nitrogênio acumulado na parte aérea. EEA/IRGA, 2012/2013.

Fontes de Variação	Graus de liberdade	Massa seca	Teor de nitrogênio	Nitrogênio acumulado
Parcela principal				
Blocos	3	274466,2 ^{ns}	0,166 ^{ns}	275,8 ^{ns}
Cultivar (C)	1	11605,3 ^{ns}	0,219*	76,2 ^{ns}
Resíduo (a)	3	13807,8	0,036	147,4
Subparcela				
Inundação (I)	3	858560,2**	3,584**	4135,3**
Resíduo (b)	9	50071,1	0,133	64,11
C x I	3	63204,8 ^{ns}	0,089 ^{ns}	87,26 ^{ns}
Resíduo (c)	9	24975,1	0,126	90,5
CV Cultivar (%) ¹		15,8	8,4	22,2
CV Inundação (%) ¹		9,5	16,1	14,6

¹ Coeficiente de variação

^{ns} Não significativo

* Significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 6. Quadrados médios obtidos na análise de variância do rendimento de grãos e número de legumes por m², legumes por planta e grãos por legume. EEA/IRGA, 2012/2013.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Rendimento de grãos	Legumes m ⁻²	Legumes planta ⁻¹	Grãos legume ⁻¹
Parcela principal					
Blocos	3	1924018,2*	144559,4 ^{ns}	245,3 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Cultivar (C)	1	203435,8 ^{ns}	979636,0*	109,5 ^{ns}	0,15 ^{ns}
Resíduo (a)	3	195475,7	82500,4	229,6	0,25
Subparcela					
Inundação (I)	3	7061716,3**	2205291,4**	1151,0**	0,23 ^{ns}
Resíduo (b)	9	246434,8	58579,4	90,7	0,07
C x I	3	196714,2 ^{ns}	633964,2 ^{ns}	109,9 ^{ns}	0,34**
Resíduo (c)	9	160380,3	186774,5	82,2	0,05
CV Cultivar (%) ¹		15,5	18,1	24,6	24,2
CV Inundação (%) ¹		17,4	15,2	15,5	12,6

¹ Coeficiente de variação

^{ns} Não significativo

* Significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade