



Sumário

Manejo do azevém no estabelecimento inicial de plantas, na ciclagem de nutrientes e no rendimento de grãos do arroz irrigado

Simulação do crescimento e produtividade de arroz no rio grande do sul pelo modelo simularroz

Physiological responses of rice cultivars exposed to different temperatures and flood depths in a water seeded system

Attenuation of low-temperature stress in rice seedlings

Sensibilidade do capim-capivara a herbicidas

Manejo do azevém no estabelecimento inicial de plantas, na ciclagem de nutrientes e no rendimento de grãos do arroz irrigado

Ryegrass management on the initial establishment of plants, nutrient cycling and grain yield of irrigated rice

Rafael Bruck Ferreira^I Enio Marchesan^{II} Lucas Lopes Coelho^I Maurício Limberger de Oliveira^I
Gustavo Mack Teló^{III} Alberto Cargnelutti Filho^I Gerson Meneghetti Sarzi Sartori^I

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes manejos da cultura do azevém na entressafra do arroz irrigado, sobre o estabelecimento inicial de plantas, a ciclagem de nutrientes e o rendimento de grãos de arroz. O experimento foi conduzido em área de várzea sistematizada durante os anos agrícolas de 2010/11 e 2011/12, sob delineamento de blocos ao acaso, com cinco repetições com os tratamentos constituídos por: épocas de dessecação do azevém, antecedendo a semeadura do arroz, pousio e retirada da palha através da produção de feno de azevém. Há redução do estande inicial de plantas de arroz irrigado à medida que a dessecação do azevém se aproxima da semeadura do arroz. A utilização do azevém em áreas de várzea intensifica a ciclagem de nutrientes, mas recomenda-se que, em azevém não pastejado, a dessecação seja realizada com antecedência de 60 dias antes da semeadura do arroz irrigado para não prejudicar o rendimento de grãos do mesmo. A produção de feno de azevém é uma alternativa viável para a entressafra em áreas de várzea, pois não prejudica o estabelecimento inicial de plantas de arroz irrigado.

Palavras-chave: *Oryza sativa*, sucessão de culturas, cobertura do solo, produção de feno.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the effect of different managements of ryegrass straw in the off-season of irrigated rice on the initial establishment of plants, nutrient cycling and grain yield of the irrigated rice. The experiment was conducted in lowland area during the 2010/11 and 2011/12 crop seasons, in a randomized complete block, with five replications and the treatments were constituted by: ryegrass desiccation timings before the rice planting, fallow and straw removal through ryegrass hay production. There is a reduction of rice stand as there is a delay in the ryegrass desiccation approaches to rice planting.

Use of ryegrass in lowlands intensifies the nutrient cycling; however, it is recommended that in non grazed ryegrass the desiccation should be performed 60 days before the irrigated rice planting without reducing grain yield. Ryegrass hay production is a viable alternative for the off-season in lowlands because it does not reduce the initial establishment of irrigated rice plant.

Key words: *Oryza sativa*, crops succession, cover crop, hay production.

INTRODUÇÃO

O sistema de semeadura direta em áreas de várzea pode ser incrementado através da implantação de plantas de cobertura de solo após a colheita do arroz irrigado (*Oryza sativa*). Essa prática pode incrementar a renda do produtor rural, através da utilização de uma cultura forrageira para produção de feno ou para pastejo. Além disso, esse sistema pode impactar positivamente na sustentabilidade do sistema de produção, em razão da ciclagem de nutrientes oriundos da palha remanescente do arroz irrigado pela cultura sucessora, o que possibilitaria otimizar o uso desses nutrientes e minimizar as suas perdas para o ambiente.

Desse modo, quando se utilizam culturas em sucessão, busca-se, além da ciclagem de nutrientes, o sincronismo entre a liberação destes pela planta de cobertura e a absorção pela cultura sucessora. Nesse sentido, considera-se uma condição ideal

^IUniversidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil.

^{II}Departamento de Fitotecnia, Centro de Ciências Rurais (CCR), UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: eniomarchesan@gmail.com. Autor para correspondência.

^{III}Embrapa Clima Temperado/ CAPES, Estação Experimental de Terras Baixas, Pelotas, RS, Brasil.

aquela em que o solo esteja sempre coberto por uma espécie de planta em desenvolvimento, dessa forma, determinando alto fluxo de carbono e de energia no sistema solo-planta-atmosfera, beneficiando seus atributos físicos, químicos e biológicos (VEZZANI & MIELNICZUK, 2009).

O azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) é uma espécie que, além de ser adaptada aos solos de várzea, apresenta baixo custo de sementes, parcial recuperação do nitrogênio residual, rápido estabelecimento, tolerância ao frio, tolerância a doenças, além de auxiliar na supressão de plantas daninhas (REDDY, 2001), embora esteja se observando aumento da incidência de brusone em panículas e folhas no azevém, indicando necessidade de pesquisa nesta área para manejo sustentável da sucessão azevém/arroz. No entanto, uma das dificuldades na utilização de plantas de cobertura no período de entressafra é definir o manejo a ser adotado, pois MENEZES et al. (2001) evidenciaram uma diminuição no rendimento de grãos do arroz irrigado, cultivado em sistema de semeadura direta com cobertura de azevém, na entressafra, quando comparado ao sistema convencional de preparo do solo.

Nesse sentido, busca-se melhor entendimento sobre o sistema de semeadura direta em áreas de várzea a fim de se identificar o manejo mais eficiente da planta de cobertura utilizada após a colheita do arroz irrigado. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes manejos na cultura do azevém sobre o estabelecimento inicial de plantas de arroz, a ciclagem de nutrientes e o rendimento de grãos do arroz irrigado.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido durante os anos agrícolas de 2010/11 e 2011/12, na área didático experimental de várzea do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, em Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico, pertencente à unidade de mapeamento Vacacaí (EMBRAPA, 2006).

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao caso, nas mesmas unidades experimentais para os dois anos agrícolas em estudo, com cinco repetições, e área útil por unidade experimental de 7,65m² (5x1,53m), composto pelos seguintes tratamentos: [1] feno de azevém I, com corte no florescimento; [2] dessecação do azevém aos 60 dias antes da semeadura do arroz (DAS); [3] dessecação do azevém aos 45 DAS; [4] dessecação do azevém aos 30 DAS; [5] dessecação do azevém aos 30 DAS + rolo-faca (RF); [6] dessecação do azevém 15 DAS + RF; [7] feno de azevém II, com corte no enchimento

de grãos; [8] pousio da área antecedendo a semeadura do arroz (área sem azevém).

O azevém foi semeado a lanço nos dois anos de experimento na densidade de 40kg ha⁻¹ (27/03/10 e 24/03/11). Antes da semeadura, os restos culturais do arroz foram roçados para proporcionar maior contato da palha com o solo e, com isso, favorecer sua decomposição. A adubação nitrogenada no azevém foi parcelada igualmente em três aplicações, aos 20, 45 e 60 dias após a emergência, totalizando 75kg N ha⁻¹.

Para as dessecações do azevém, foi utilizado o herbicida glyphosate na dose de 960g i.a. ha⁻¹, aplicado com pulverizador costal pressurizado por CO₂ com volume de calda de 140L ha⁻¹, para todos tratamentos. No momento da dessecação, para o tratamento aos 60 DAS, as plantas de azevém encontravam-se com quatro perfilhos, para o tratamento aos 45 DAS em pré-florescimento, aos 30 DAS no florescimento pleno e aos 15 DAS no enchimento de grãos. Nos tratamentos com utilização de rolo-faca, este foi operacionalizado sete dias após a dessecação. Nos tratamentos onde foi realizado feno, as plantas de azevém foram cortadas com auxílio de roçadeira motorizada, a uma altura média de 5cm do solo.

A semeadura do arroz ocorreu em 19 e 20 de outubro, respectivamente, para os anos agrícolas de 2010/11 e 2011/12, sendo utilizada a cultivar IRGA 424, na quantidade de 90kg de sementes ha⁻¹. A adubação de base foi distribuída na linha de semeadura, sendo utilizado 15kg N ha⁻¹, 60kg P₂O₅ ha⁻¹ e 90kg K₂O ha⁻¹. A adubação de cobertura foi dividida em dois momentos, sendo a primeira aplicação realizada com 90kg N ha⁻¹ no estádio V₃, conforme escala fenológica proposta por COUNCE et al. (2000), e a segunda aplicação com 45kg N ha⁻¹ e 30kg K₂O ha⁻¹ no estádio R₀. Os demais tratos culturais foram realizados conforme as recomendações técnicas para a cultura do arroz irrigado no Sul do Brasil (SOSBAI, 2010).

A determinação da quantidade de massa seca remanescente do azevém, no momento da semeadura do arroz irrigado, foi realizada através da coleta de duas amostras de 0,25m² por unidade experimental. Após, o material foi mantido em estufa com circulação de ar forçada à temperatura de 65°C até atingir peso constante, sendo posteriormente realizada a pesagem.

As avaliações realizadas na cultura do arroz irrigado foram: o estande inicial de plantas realizado aos 10 dias após a emergência, em local representativo da unidade experimental, onde foi demarcado um metro na segunda linha de semeadura

e efetuada a contagem das plantas; no mesmo local, realizou-se a contagem do número de colmos por planta nos estádios fenológico V_4 , V_5 , V_7 e V_9 , para estimar a evolução e a duração do perfilhamento. Foi avaliado o acúmulo de massa seca nos estádios fenológicos V_3 e V_6 , através da coleta de 20 plantas por unidade experimental, sendo posteriormente levadas à estufa a 65°C até atingir peso constante. O rendimento de grãos de arroz foi estimado através da colheita manual em uma área útil de $5,10\text{m}^2$ ($5 \times 1,02\text{m}$), quando os grãos apresentavam grau de umidade média de 22%. Após, realizaram-se os procedimentos de trilha, limpeza, secagem e pesagem dos grãos com casca, sendo os dados corrigidos para 13% de umidade e convertidos em kg ha^{-1} .

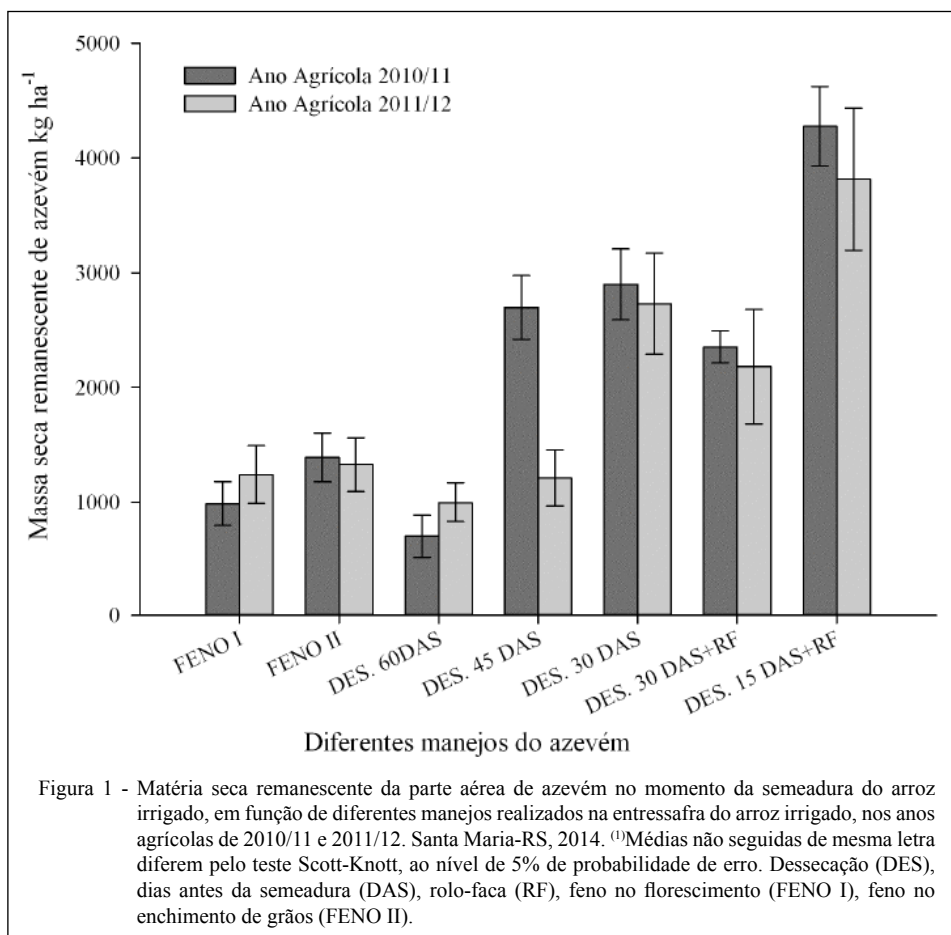
As análises químicas para determinação dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) na massa seca do arroz foram realizadas conforme a metodologia descrita por TEDESCO et al. (1995).

Os dados obtidos foram submetidos ao teste das pressuposições do modelo matemático (normalidade e homogeneidade das variáveis). A

análise de variância foi realizada através do teste F e as médias comparadas pelo teste Scott-Knott, ao nível de probabilidade de erro de 5%. Para os resultados plotados no gráfico, determinou-se o intervalo de confiança ($P \leq 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve diferença em relação à massa seca remanescente da parte aérea do azevém (Figura 1), com menor quantidade nos manejos de produção de feno e no tratamento com dessecação aos 60 DAS. Esses resultados são esperados, visto que a produção do feno consiste no corte do azevém e na retirada deste da área. Da mesma forma, a dessecação realizada aos 60 DAS proporciona maior tempo para a decomposição dos resíduos vegetais pelos microrganismos do solo (CRUSCIOL et al., 2008), evidenciando assim menor quantidade de massa seca remanescente. Com o atraso da época de dessecação, ocorreu o aumento da massa seca remanescente do azevém na superfície do solo, sendo importante



destacar que a quantidade presente na superfície do solo interfere na perda de água por alterar a ação dos elementos meteorológicos que compõem a demanda evaporativa da atmosfera (CHEN et al., 2007).

O uso do implemento agrícola rolo-faca proporciona maior contato dos resíduos de azevém com o solo e, assim, acelera o processo de decomposição dos resíduos vegetais, como observado para a dessecação realizada aos 30 DAS+RF, onde reduziu em 20% a massa seca remanescente, em comparação ao tratamento sem o uso do implemento rolo-faca (30 DAS).

No entanto, os diferentes manejos adotados não retardaram a semeadura do arroz irrigado, que foi realizada na época preferencial para a cultura, na segunda quinzena do mês de outubro, nos dois anos de estudo, ou seja, no momento em que o arroz pode expressar o máximo potencial de rendimento de grãos.

Os teores de N, P e K encontrados na planta de arroz irrigado foram afetados pelos tratamentos utilizados (Tabela 1). A dessecação aos 15 DAS+RF resultou num menor valor de N na planta de arroz no estágio fenológico V_3 , para o ano agrícola de 2010/11, evidenciando uma redução de 11% em relação ao tratamento pousio. Esse comportamento pode ser atribuído à maior relação C/N nos resíduos vegetais do azevém em função da maior proporção de colmos nos estádios fenológicos mais adiantados (TEIXEIRA et al., 2011), diminuindo, assim, a velocidade de decomposição dos resíduos vegetais aos 15 DAS+RF, quando comparado aos demais tratamentos.

As plantas de azevém, dessecadas com maior antecedência à semeadura do arroz irrigado, tendem a apresentar uma menor relação C/N, bem como maior proporção de folhas em relação a colmos de azevém, onde, além de aumentar a velocidade de decomposição dos resíduos vegetais, proporcionam maior contato entre as folhas e o solo, culminando em maior área exposta para ação dos microrganismos do solo. No estágio fenológico V_6 , não houve diferença para o teor de N avaliado nas plantas de arroz irrigado.

Para o ano agrícola de 2011/12, o teor de N nas plantas de arroz avaliado no estágio fenológico V_3 apresentou pouca variação entre os diferentes manejos da massa de azevém; os menores teores foram observados para as dessecações realizadas aos 30 e aos 45 DAS, além do tratamento com corte do azevém no florescimento para feno (Feno I). No estágio fenológico V_6 das plantas de arroz, o efeito do manejo empregado na massa de azevém foi mais pronunciado; os tratamentos com manejo de dessecação com maior antecedência à semeadura do arroz (60, 45 e 30 DAS) apresentaram os maiores teores de N nas plantas. Isso

evidencia que a dessecação realizada ao 15 DAS+RF resulta num período menor de aerobiose para os microrganismos do solo realizarem a mineralização do N dos resíduos vegetais.

Os teores de P na planta de arroz avaliados nos dois estádios fenológicos não foram influenciados pelos diferentes manejos realizados no período de entressafra do arroz irrigado. Isso possivelmente deve-se à baixa concentração de P liberado pela cultura do azevém após a realização das dessecações, pois há a tendência de liberação mais lenta desse nutriente dos resíduos vegetais das gramíneas (GIACOMINI et al., 2003). É importante ressaltar que a demanda nutricional de P pelas plantas de arroz irrigado é inferior em comparação à demanda de N e K (SILVA et al., 2012). Dessa forma, a adubação de base utilizada na semeadura do arroz ($60\text{kg P}_2\text{O}_5\text{ ha}^{-1}$) pode ter sido suficiente para o nível de produtividade obtido, não sendo influenciado pelos manejos utilizados.

Com relação aos teores de K na planta de arroz, para ambos os anos agrícolas estudados, os menores teores foram observados nos manejos com dessecações com maior antecedência à semeadura do arroz e no manejo com corte do azevém no florescimento para feno (Feno I), além do pousio. Esse fato pode estar relacionado com a perda do K liberado pelas plantas de azevém, ou com a incapacidade de a planta de arroz irrigado absorver o nutriente naquele momento. Normalmente, a adição de resíduos vegetais aumenta a disponibilidade do K no solo, pela intensificação da atividade microbiana ou pela liberação direta de nutrientes dos resíduos vegetais e, assim, as plantas são beneficiadas com maior disponibilidade do nutriente (SOUSA & BORTOLON, 2002).

O estande inicial de plantas de arroz irrigado foi influenciado pelos diferentes manejos realizados na cultura do azevém (Tabela 2), sendo que a dessecação aos 15 DAS+RF apresentou os menores valores nos dois anos agrícolas estudados (2010/11 e 2011/12). Um dos fatores determinantes para esse resultado foi a presença da maior quantidade de massa seca remanescente de azevém sobre a superfície do solo no momento da semeadura do arroz irrigado, acarretando em menor contato da semente com o solo.

É importante ressaltar que o estande inicial de plantas foi superior no manejo com corte do azevém no florescimento para feno (Feno I), quando comparado aos tratamentos com dessecação mais próxima da semeadura do arroz irrigado. Esse aspecto pode indicar que a agregação de renda da propriedade através da produção de feno de azevém em áreas de várzea não influencia negativamente no estabelecimento da cultura do arroz irrigado em sucessão.

Tabela 1 - Teores médios de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) na matéria seca do arroz irrigado, em dois estádios fenológicos, em função de manejos da palha do azevém no período de entressafra nos anos agrícolas de 2010/11 e 2011/12. Santa Maria-RS, 2014.

Tratamentos	-----Ano agrícola de 2010/11-----					
	-----Teor de N (g kg ⁻¹)-----		-----Teor de P (g kg ⁻¹)-----		-----Teor de K (g kg ⁻¹)-----	
	-----Estádio-----		-----Estádio-----		-----Estádio-----	
	V ₃ ¹	V ₆	V ₃	V ₆	V ₃	V ₆
Pousio	42,6 a ²	28,3 ^{ns}	5,9 ^{ns}	2,8 ^{ns}	35,3 b	32,0 ^{ns}
Feno I	40,5 a	26,6	4,8	2,6	36,3 b	34,0
Feno II	40,7 a	28,6	5,2	2,8	38,0 a	35,0
Des. 60 DAS ³	43,4 a	30,6	5,4	3,4	36,5 b	33,0
Des. 45 DAS	40,2 a	27,7	5,4	3,7	35,5 b	33,3
Des. 30 DAS	40,6 a	28,9	5,7	2,7	39,8 a	31,3
Des. 30 DAS+RF	40,2 a	29,2	5,3	2,3	37,5 a	34,5
Des. 15 DAS+RF ⁴	36,5 b	30,0	5,5	3,3	39,3 a	32,5
Média	40,5	28,7	5,4	3,0	37,6	33,2
CV (%)	4,6	6,1	9,1	9,5	3,9	5,8
-----Ano agrícola de 2011/12-----						
Pousio	36,0 a	28,0 b	5,2 ^{ns}	2,9 ^{ns}	37,1 b	38,3 ^{ns}
Feno I ⁵	34,3 b	32,2 a	5,9	3,0	35,5 b	36,8
Feno II ⁶	35,3 a	26,6 b	6,5	3,1	38,6 a	38,3
Des. 60 DAS	35,8 a	30,2 a	5,7	2,8	34,8 b	36,0
Des. 45 DAS	32,9 b	31,3 a	6,1	3,6	41,4 a	38,8
Des. 30 DAS	34,3 b	30,4 a	6,0	3,3	40,6 a	39,0
Des. 30 DAS+RF	36,4 a	30,2 a	7,2	4,1	40,1 a	41,0
Des. 15 DAS+RF	35,8 a	23,9 c	6,0	3,3	40,8 a	40,0
Média	35,1	29,1	6,1	3,3	38,6	38,5
CV (%)	3,4	6,9	8,6	11,7	5,7	10,5

(¹)Estádio fenológico segundo a escala proposta por COUNCE et al. (2000); (²)médias não seguidas de mesma letra diferem pelo teste Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro; ^{ns}não significativo pelo teste F; (³)dias antes da semeadura do arroz irrigado; (⁴)rolo-faca;

(⁵)feno no florescimento; (⁶)feno no enchimento de grãos.

O número de colmos por planta de arroz foi influenciado pelos diferentes manejos do azevém no período de entressafra, verificando maior número de colmos naqueles tratamentos em que a população de plantas foi menor, como ocorreu na dessecação aos 15 DAS+RF, onde o número de colmos por plantas foi superior desde o estádio fenológico V₄ até V₆, para ambos os anos agrícolas estudados. Isso pode estar relacionado à compensação pelo baixo estande inicial de plantas, já que uma maior quantidade de área disponível no dossel vegetativo estimula o perfilhamento da planta de arroz (PRABHA et al., 2011).

Nos dois anos de estudo, o acúmulo de massa seca da parte aérea do arroz foi influenciado pelos diferentes manejos realizados no azevém, sendo que o manejo com dessecação aos 15 DAS+RF foi o que apresentou os menores acúmulos nos estádios fenológicos avaliados. Essa resposta pode estar relacionada ao estiolamento verificado nas plantas de arroz em função da elevada quantidade de massa seca

remanescente de azevém, o qual foi de aproximadamente 4 toneladas ha⁻¹ (Figura 1). Esse fato pode ter alterado a luminosidade para as plantas de arroz, pois MEROTTO JR et al. (2002), avaliando a variação da qualidade da luz através da presença de plantas daninhas ou da reflexão da luz resultante da presença de seis toneladas de palha de aveia sobre o solo, encontraram que a cobertura do solo com palha influencia diretamente a altura das plantas de soja em função das formas de luminosidade utilizada. Além disso, no sistema de plantio direto, a presença de elevadas quantidades de resíduos vegetais sobre o solo pode resultar na produção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular e cadeia curta, como os ácidos propiônico e butírico (SCHMIDT et al., 2007).

O rendimento de grãos do arroz irrigado no ano agrícola de 2010/11 não foi afetado pelos diferentes manejos realizados na cultura do azevém. Resultados semelhantes foram obtidos por CORREIA et al. (2013), os quais não verificaram diferença no rendimento de grãos do arroz para os diferentes

Tabela 2 - Estande inicial de plantas (EP), número de colmos planta⁻¹, acúmulo de matéria seca (AMS) e rendimento de grãos (RG) de arroz irrigado em função de manejos da palha do azevém no período de entressafra nos anos agrícolas de 2010/11 e 2011/12. Santa Maria-RS, 2014.

-----Ano agrícola de 2010/11-----								
Tratamentos	EP (pl. m ²)	-----Colmos planta ⁻¹ -----				-----AMS (kg ha ⁻¹)-----		RG (kg ha ⁻¹)
		-----Estádio-----				-----Estádio-----		
		V ₄	V ₅	V ₇	V ₉	V ₃	V ₆	
Pousio	250 b	2,0 a	3,5 a	4,3 a	4,2 a	81 b ²	2266 a	12774 ^{ns}
Feno I	297 a	1,4 b	2,5 b	3,0 b	3,2 b	133 a	1965 a	12650
Feno II	242 b	1,9 a	3,9 a	4,4 a	4,4 a	121 a	1558 b	12544
Des. 60 DAS ³	269 b	1,3 b	2,5 b	3,5 b	3,3 b	89 b	1480 b	12290
Des. 45 DAS	278 a	1,6 b	2,6 b	3,3 b	3,3 b	113 a	1703 a	11951
Des. 30 DAS	296 a	1,4 b	2,5 b	3,2 b	3,5 b	94 b	2131 a	12244
Des. 30 DAS+RF	289 a	1,5 b	3,0 b	3,4 b	3,5 b	81 b	2119 a	12470
Des. 15 DAS+RF ⁴	184 c	1,8 a	3,4 a	4,8 a	5,0 a	49 c	1345 b	12091
Média	262	1,6	3,0	3,7	3,8	95	1821	12377
CV (%)	9,09	7,43	9,03	9,38	9,29	9,59	8,61	5,59
-----Ano agrícola de 2011/12-----								
Pousio	240 a	2,4 b	3,3 c	4,2 c	3,9 c	69 a	1627 a	11269 b
Feno I ⁵	226 a	2,4 b	3,1 c	4,7 c	4,8 b	63 a	1316 b	11438 b
Feno II ⁶	193 b	2,5 b	3,5 c	5,2 b	5,7 b	63 a	963 c	10024 c
Des. 60 DAS	235 a	2,0 b	3,2 c	4,3 c	4,7 b	78 a	1585 a	12296 a
Des. 45 DAS	212 b	2,3 b	3,5 c	4,2 c	4,8 b	64 a	1117 b	10765 b
Des. 30 DAS	202 b	1,5 c	3,9 b	4,5 c	4,5 b	67 a	868 c	10220 c
Des. 30 DAS+RF	151 c	2,9 a	4,2 b	5,3 b	5,6 b	57 a	731 d	10251 c
Des. 15 DAS+RF	99 d	2,4 b	4,8 a	5,9 a	6,2 a	34 b	610 d	8590 d
Média	195	2,3	3,7	5,0	5,2	62	1102	10657
CV (%)	6,8	9,49	8,89	7,74	7,55	9,78	8,55	6,79

(¹)Estádio fenológico segundo a escala proposta por COUNCE et al. (2000); (²)médias não seguidas de mesma letra diferem pelo teste Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro; ^{ns}não significativo pelo teste F; (³)dias antes da semeadura do arroz irrigado; (⁴)rolo-faca; (⁵)feno no florescimento; (⁶)feno no enchimento de grãos.

manejos empregados na cultura do azevém, no período de entressafra e pousio.

Para o ano agrícola 2011/12, a dessecação realizada aos 60 DAS resultou no maior rendimento de grãos de arroz (12296kg ha⁻¹), no entanto, a dessecação do azevém aos 15 DAS+RF apresentou uma redução de 30% no rendimento de grãos, em comparação à dessecação 60 DAS. Esse fato pode estar associado ao menor estande inicial de plantas, e também ao baixo teor de N verificado no estágio fenológico V₆, visto que esse nutriente é determinante na emissão de panículas e no enchimento de grãos em gramíneas (ZHANG et al., 2008).

CONCLUSÃO

Há redução do estande inicial de plantas de arroz irrigado à medida que a dessecação do azevém se aproxima da semeadura do arroz.

A utilização do azevém em áreas de várzea intensifica a ciclagem de nutrientes, mas

recomenda-se que, em azevém não pastejado, a dessecação seja realizada com antecedência de 60 dias da semeadura do arroz irrigado para não prejudicar o rendimento de grãos de arroz.

A produção de feno de azevém pode ser uma alternativa viável economicamente para entressafra em áreas de várzea, pois não prejudica o estabelecimento inicial de plantas de arroz irrigado.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro e pelas bolsas de estudo e pesquisa e ao segundo autor pela bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

CHEN, S.Y. et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on

- the North China Plain. **Annals of Applied Biology**, v.150, n.3, p.261-268, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00144.x>>. Acesso em: 7 ago. 2013. doi: 10.1111/j.1744-7348.2007.00144.x.
- COUNCE, P.A. et al. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, v.40, n.2, p.436-443, 2000. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2000.402436x>>. Acesso em: 7 ago. 2013. doi: 10.2135/cropsci2000.402436x.
- 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**, v.37, n.2, p.512-520, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000200022>>. Acesso em: 10 out. 2013. doi: 10.1590/S0100-06832013000200022.
- CRUSCIOL, C.A.C. et al. Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palha de aveia preta em plantio direto. **Bragantia**, v.67, n.2, p.481-489, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052008000200024>>. Acesso em: 10 ago. 2013. doi: 10.1590/S0006-87052008000200024.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. Brasília: Embrapa-SPI, 2006. 306p.
- GIACOMINI, S.J. et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.9, p.1097-1104, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.590/S0100-204X2003000900011>>. Acesso em: 7 ago. 2013. doi: 10.590/S0100-204X2003000900011.
- MENEZES, V.G. et al. Semeadura direta de genótipos de arroz irrigado em sucessão a espécies de cobertura de solo no inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.9, p.1107-1115, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2001000900004>>. Acesso em: 7 ago. 2013. doi: 10.1590/S0100-204X2001000900004.
- MEROTTO JR, A. et al. Interferência das plantas daninhas sobre o desenvolvimento inicial de plantas de soja e arroz através da qualidade da luz. **Planta Daninha**, v.20, n.1, p.9-16, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582002000100002>>. Acesso em: 9 ago. 2013. doi: 10.1590/S0100-83582002000100002.
- PRABHA, A.C.S. et al. System of rice intensification principles on growth parameters, yield attributes and yields of rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Agronomy**, v.10, n.1, p.27-33, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3923/ja.2011.27.33>>. Acesso em: 7 ago. 2013. doi: 10.3923/ja.2011.27.33.
- REDDY, K.N. Effects of cereal and legume cover crop residues on weeds, yield, and net return in soybean (*Glycine max*). **Weed Technology**, v.15, p.660-668, 2001. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1614/0890-037X\(2001\)015\[0660:EOCALC\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1614/0890-037X(2001)015[0660:EOCALC]2.0.CO;2)>. Acesso em: 7 ago. 2013. doi: 10.1614/0890-037X(2001)015[0660:EOCALC]2.0.CO;2.
- SCHMIDT, F. et al. Toxidez pelos ácidos propiônico e butírico em plântulas de arroz. **Ciência Rural**, v.37, n.3, p.720-726, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782007000300018>>. Acesso em: 7 ago. 2013. doi: 10.1590/S0103-84782007000300018.
- SILVA, L.S. et al. Teores de macronutrientes em cultivares de arroz irrigado de acordo com a parte da planta analisada e do estágio de desenvolvimento. **Revista Ceres**, v.59, n.4, p.544-549, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2012000400016>>. Acesso em: 10 ago. 2013. doi: 10.1590/S0034-737X2012000400016.
- SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil, 28. Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado. Bento Gonçalves, RS - Porto Alegre: SOSBAI, 2010. 188p.
- SOUSA, R.O.; BORTOLON, L. Crescimento radicular e da parte aérea do arroz (*Oryza sativa* L.) e absorção de nutrientes em solução nutritiva com diferentes concentrações de ácido acético. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.8, n.3, p.231-235, 2002.
- TEDESCO, M.J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim técnico, n.5).
- TEIXEIRA, M. et al. Decomposição e liberação de nutrientes da parte aérea de plantas de milho e sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.3, p.867-876, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000300021>>. Acesso em: 7 ago. 2013. doi: 10.1590/S0100-06832011000300021.
- VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.743-755, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>>. Acesso em: 10 ago. 2013. doi: 10.1590/S0100-06832009000400001.
- ZHANG, Y. et al. Effects of nitrogen nutrition on grain yield of upland and paddy rice under different cultivation methods. **Acta Agronomica Sinica**, v.38, n.6, p.1005-1013, 2008. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1875-2780\(08\)60038-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1875-2780(08)60038-3)>. Acesso em: 7 ago. 2013. doi: 10.1016/S1875-2780(08)60038-3.



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1159-1165>

Simulação do crescimento e produtividade de arroz no Rio Grande do Sul pelo modelo SimulArroz

Hamilton T. Rosa¹, Lidiane C. Walter¹, Nereu A. Streck², Cristiano De Carli³,
Giovana G. Ribas² & Enio Marchesan²

¹ Instituto Federal Farroupilha. Santo Augusto, RS. E-mail: hamilton.rosa@iffarroupilha.edu.br; lidiane.walter@iffarroupilha.edu.br (Autor correspondente)

² Departamento de Fitotecnia/Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. E-mail: nstreck2@yahoo.com.br; giovana.ghisleni@hotmail.com; eniomarchesan@gmail.com

³ Departamento de Fitossanidade/Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. E-mail: cristianodcarli@yahoo.com.br

Palavras-chave:

Oryza sativa
biomassa
rendimento
modelagem

RESUMO

O modelo SimulArroz é baseado em processos para simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de grãos na cultura do arroz. O objetivo neste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo SimulArroz em simular a produção de biomassa da cultura do arroz na Depressão Central do Rio Grande do Sul e a produtividade de grãos em diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. Para testar o desempenho do modelo SimulArroz em simular a biomassa foi conduzido um experimento de campo em Santa Maria, RS, com quatro cultivares (IRGA 421, BRS Querência, IRGA 424 e SCRBRS Tio Taka) com três datas de semeadura no ano agrícola 2011/2012 (17 de outubro, 18 de novembro e 19 de dezembro de 2011) e uma data de semeadura no ano agrícola 2012/2013 (19 de outubro de 2012). Dados da literatura foram usados para testar a capacidade de predição da produtividade de grãos em várias regiões orizícolas. O modelo SimulArroz simula com precisão média superior a 70% a produção de biomassa de diferentes cultivares e datas de semeadura de arroz na região central do Rio Grande do Sul, tal como a produtividade de grãos e a variação da produtividade nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul.

Key words:

Oryza sativa
biomass
yield
modeling

Simulation of rice growth and yield in Rio Grande do Sul with the SimulArroz

ABSTRACT

The SimulArroz is a process-based model for simulating growth, development and yield of rice. The objective of this study was to evaluate the performance of the SimulArroz model in simulating biomass in the Central Depression of Rio Grande do Sul and grain yield in different regions that grow rice in the Rio Grande do Sul State. To test the performance of SimulArroz model in simulating biomass, an experiment was conducted at Santa Maria, RS, with four cultivars of rice (IRGA 421, BRS Querência, IRGA 424 and SCRBRS Tio Taka) with three sowing dates during the 2011/2012 growing season (October 17, November 18 and December 19 2011) and one sowing date in the 2012/2013 growing season (October 19, 2012). Data from the literature were used to test the predictive ability of the model in simulating grain yield. The SimulArroz model simulates with an average accuracy better than 70% of the biomass production of rice cultivars and sowing dates of rice in the Central Depression of Rio Grande do Sul as well as grain yield and its variation across the different production regions of the Rio Grande do Sul.



INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de arroz (*Oryza sativa* L.) fora do continente asiático, sendo o Estado do Rio Grande do Sul (RS) responsável por aproximadamente 60% do arroz produzido internamente (IRGA, 2013). No RS são cultivados, anualmente, em torno de 1,1 milhões de hectares de arroz no sistema irrigado por inundação em seis regiões orizícolas (Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Zona Sul, Planície Costeira Interna e Planície Costeira Externa à Laguna dos Patos) as quais diferem em produtividade devido à disponibilidade de radiação solar e temperatura do ar durante a estação de crescimento da cultura (SOSBAI, 2012).

Modelos matemáticos estão sendo cada vez mais usados na agricultura. Tais modelos são simplificações da realidade que permitem a descrição das interações complexas que ocorrem em agroecossistemas (Streck & Alberto, 2006). Particularmente na área agrícola, para ser representativo e confiável, cada modelo matemático precisa ser adaptado e testado em diferentes ambientes. Após ter seu desempenho testado os modelos agrícolas são ferramentas que podem ser usadas, por exemplo, para prever o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura em função de variações das condições meteorológicas na cada safra (Shin et al., 2006; Shin et al., 2010; Streck et al., 2013a) e mesmo em cenários climáticos futuros (Streck et al., 2006; Streck et al., 2013b).

O modelo SimulArroz é um modelo de simulação, determinístico dinâmico, baseado em processos (process-based model) para simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de grãos na cultura do arroz (Streck et al., 2013c). Desenvolvido com base nos modelos InfoCrop (Aggarwal et al., 2006), ORYZA (Bouman & Laar, 2006) e no modelo de aparecimento de folhas de Wang-Engel modificado (Streck et al., 2008c) o SimulArroz é um modelo calibrado para cultivares de arroz usadas no Rio Grande do Sul e assim atende às demandas como ferramenta computacional em nível regional. A capacidade preditiva de produtividade de grãos do SimulArroz foi avaliada por Walter et al. (2012) nas condições de cultivo de arroz irrigado por inundação no município de Santa Maria, situado na região orizícola da Depressão Central do RS, quando obtiveram bons resultados de predição, com erros médios na ordem de 850 kg ha⁻¹. No entanto, o desempenho do SimulArroz em descrever variáveis do crescimento de arroz e a produtividade de grãos nas diversas regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul ainda não foi avaliado, o que constituiu motivação para este trabalho.

A hipótese neste trabalho é que o modelo SimulArroz, pelas suas bases ecofisiológicas, tem capacidade de simular com acurácia satisfatória a produção de biomassa da cultura e a produtividade de grãos nos ecossistemas orizícolas do Rio Grande do Sul. O objetivo neste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo SimulArroz em simular a produção de biomassa da cultura do arroz na Depressão Central do Rio Grande do Sul e a produtividade de grãos em diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo de simulação do rendimento de grãos de arroz usado neste estudo foi o modelo SimulArroz© (Streck et

al., 2013c). O SimulArroz calcula a taxa de crescimento dos diferentes compartimentos da planta (raízes, caule, folhas e panículas) e de desenvolvimento (emissão de folhas e avanço na fenologia da cultura) no passo de tempo de um dia usando variáveis meteorológicas disponíveis em estações meteorológicas (temperatura mínima e máxima diária do ar e radiação solar).

O SimulArroz é composto por funções matemáticas do modelo InfoCrop descritas em Aggarwal et al. (2006) e por funções do modelo ORYZA 2000 (Bouman & Laar, 2006) dos quais se distingue por ter, em seu código, funções de fenologia adaptadas para cultivares de arroz usadas no Rio Grande do Sul (Streck et al., 2011; Walter et al., 2012) e por conter um submodelo de emissão de folhas que calcula o número de folhas acumuladas na haste principal pela Escala de Haun (Streck et al., 2008a). A descrição do desenvolvimento foliar pela Escala de Haun dá um caráter mecanístico à variável do desenvolvimento pois ela é uma escala numérica contínua, o que facilita sua modelagem numérica (Streck et al., 2013c).

No modelo SimulArroz o ciclo de desenvolvimento da cultura é dividido em quatro fases (Walter et al., 2012): fase de emergência (semeadura-emergência), fase vegetativa (emergência-diferenciação da panícula), fase reprodutiva (diferenciação da panícula-antese) e fase de enchimento de grãos (antese-maturidade fisiológica). Cada uma das fases é completada quando atingida a soma térmica calculada pela metodologia usada por Streck et al. (2011) e acumulada diariamente com base na temperatura mínima e máxima diária do ar e se considerando as três temperaturas cardinais do desenvolvimento da cultura, temperatura base inferior (T_b – Abaixo da qual a planta não se desenvolve), temperatura ótima (T_{ot} – em que o desenvolvimento é máximo) e temperatura base superior (T_B – Acima da qual a planta não se desenvolve) variando de acordo com a fase de desenvolvimento, ao longo do ciclo da cultura, sendo T_b = 11 °C, T_{ot} = 30 °C e T_B = 40 °C para a fase de emergência e para a fase vegetativa; T_b = 15 °C, T_{ot} = 25 °C e T_B = 35 °C para a fase reprodutiva; T_b = 15 °C, T_{ot} = 23 °C e T_B = 35 °C para a fase de enchimento de grãos (Walter et al., 2012).

O estágio de desenvolvimento (DVS) da cultura é calculado diariamente de modo que a fase de emergência compreende os estágios de -1 (semeadura) até 0 (emergência), a fase vegetativa se inicia no estágio 0 e termina no estágio 0,65 (diferenciação do primórdio floral), a fase reprodutiva se inicia no estágio 0,65 e termina no estágio 1 (antese) e a fase de enchimento de grãos corresponde ao período entre os estágios 1 e 2 (maturidade fisiológica). O DVS é calculado por:

$$DVS = \frac{STa}{STT} \quad (1)$$

em que:

STa - soma térmica diária acumulada (°C); e

STT - soma térmica diária total (°C) para completar a fase.

O código fonte foi escrito em Fortran e o aplicativo em Java da versão 1.0 do SimulArroz usada neste estudo, está disponível para download gratuito em www.ufsm.br/

simularroiz. A opção 'produtividade potencial' foi escolhida uma vez que os experimentos usados neste trabalho e descritos a seguir, foram conduzidos em condições de manejo potencial, ou seja, aplicando-se todas as técnicas de manejo para obter a máxima produtividade.

Para testar o desempenho do modelo SimulArroz em simular a biomassa de folhas, colmos e panículas, foi conduzido um experimento de campo em Santa Maria, RS (29° 43' S, 53° 43' W e altitude de 95 m) nos anos agrícolas 2011/2012 e 2012/2013, com quatro cultivares, IRGA 421 (muito precoce), BRS Querência (ciclo precoce), IRGA 424 (ciclo médio) e SCSBRS Tio Taka (ciclo tardio) e três datas de semeadura no ano agrícola 2011/12 (17 de outubro, 18 de novembro e 19 de dezembro de 2011) e uma data de semeadura no ano agrícola 2012/2013 (19 de outubro de 2012) com as mesmas cultivares. O delineamento experimental foi em blocos ao caso, com quatro repetições. Cada parcela tinha 1,53 x 5 m, com linhas de plantas distanciadas 17 cm e uma densidade de plantas de 200 plantas m⁻². A adubação e as práticas de manejo, incluindo a irrigação por inundação a partir de V3, seguiram as indicações da cultura do arroz para o Rio Grande do Sul (SOSBAI, 2012).

Foram realizadas amostragens de massa fresca coletando-se plantas em 0,1 m² em cada parcela nos dois anos agrícolas. As plantas de arroz foram separadas em folhas, colmos, panículas e material senescente no ano agrícola 2011/12 e em folhas + colmos e panículas no ano agrícola 2012/13; após a separação o material foi colocado em sacos de papel identificados e, posteriormente, colocado para secagem em estufa a 60 °C até atingir massa constante.

Para testar a capacidade de predição da produtividade de arroz do modelo SimulArroz com dados independentes foi realizada uma busca bibliográfica de trabalhos científicos nos quais eram relatados valores de produtividade de grãos em experimentos conduzidos em diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul; apenas tratamentos sem deficiência ou estresse por fatores bióticos ou abióticos foram considerados na avaliação do desempenho do modelo; os detalhes de cada

um desses experimentos utilizados como dados independentes estão na Tabela 1.

Com exceção da região da Campanha, para a qual não foram encontrados dados de produtividade de cultivares descritas no SimulArroz ou não havia dados meteorológicos nos locais dos experimentos obteve-se, para todas as demais regiões orizícolas, o total de 91 dados de produtividade de grãos (kg ha⁻¹) para teste do modelo. As datas de semeadura variaram de 1º de outubro até 11 de março em safras desde 1984/85 a 2009/10 e as cultivares testadas tinham ciclos de maturação variando desde o ciclo muito precoce (como, por exemplo, a cultivar IRGA 421) até o ciclo tardio (cultivar SCSBRS Tio Taka).

Os dados meteorológicos diários (temperatura mínima, máxima e radiação solar), necessários para rodar o SimulArroz em cada experimento da Tabela 1, foram obtidos de estações meteorológicas do INMET do município ou mais próximo a este.

O desempenho modelo SimulArroz foi avaliado pelas estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME – Eq. 2), RQME normalizado (RQMEn – Eq. 3), índice "BIAS" (Eq. 4), coeficiente de correlação (r – Eq. 5), índice de concordância (dw – Eq. 6) e índice de confiança (c – Eq. 7).

O "RQME" expressa o erro médio do modelo (quanto menor o RQME melhor é o modelo) e foi calculado pela Eq. 2, como citado por Streck et al. (2008a,c):

$$RQME = \left[\frac{\sum (Si - Oi)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (2)$$

em que:

- Si - valores simulados;
- Oi - valores observados; e
- n - número de observações.

O RQME normalizado (RQMEn) que indica o erro médio relativo, foi calculado pela Eq. 3:

Tabela 1. Dados independentes de produtividade de grãos de arroz usados na avaliação do modelo SimulArroz nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul: Depressão Central (DC), Fronteira Oeste (FO), Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos (PCI), Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos (PCE) e Zona Sul (ZS)

Data(s) de semeadura	Cultivar(es)	Regiões orizícolas	Condição experimental	Referências
12/10/2009, 23/10/2009, 05/11/2009	IRGA 424, EPAGRI 109	PCI	Lavoura comercial	Marcolin et al. (2011)
21/10/2009, 23/10/2009, 29/10/2009 e 12/11/2009	IRGA 409, IRGA 417, IRGA 424, IRGA 409 e IRGA 417	DC, FO, PCI, PCE e ZS	Experimento a campo	Rosso et al. (2011)
09/11/2009, 21/10/2009	IRGA 424, SCSBRS TioTaka, IRGA 424, IRGA 425, SCS 116 Saturu	DC e PCE	Experimento a campo	Kempf et al. (2011)
20/11/1984 a 20/11/1995	IRGA 416, IRGA 409 e BRS TAIM	DC	Experimento a campo	Marchezan et al., (1996)
11/10/2000, 24/11/2000 e 19/11/2002	BR IRGA 409, IRGA 417, IRGA 420, BRS TAIM	DC	Experimento a campo	Marchezan et al. (2004)
30/11/2002, 18/10/2003 e 23/10/2004	IRGA 420 e BRS TAIM	DC	Experimento a campo	Marchezan et al. (2007)
11/03/2005	IRGA 417	DC	Experimento a campo	Camargo et al. (2008)
20/10/2009 e 13/11/2009	IRGA 424	PCE	Experimento a campo	Freitas & Oliveira (2011)
17/11/2007 e 30/10/2008	BRS Querência	ZS	Experimento a campo	Scivittaro et al. (2011)
01/10/2004, 29/10/2004, 27/10/2005, 03/11/2005 e 05/11/2005	SCSBRS Tio Taka, IRGA 417, EPAGRI 108, 109, IRGA 409, 410, 418, 419, 420, 421	PCE, ZS	Experimento a campo	Lopes et al. (2007)

$$RQMEn = \frac{100 \times RQME}{Oim} \quad (3)$$

em que:

Oim - média dos valores observados.

O RQME foi usado para a variável produtividade de grãos, pois tem aplicação prática já que é um erro absoluto e assim mais apropriado para esta variável (Walter et al., 2012). O RQMEn foi usado para as variáveis de biomassa visando facilitar a comparação com dados de literatura em que esta estatística foi usada (Bouman & Laar, 2006).

O valor de “BIAS”, utilizado por Samboranza et al. (2013) e por Souza et al. (2008), foi obtido pela fórmula:

$$BIAS = \frac{(\sum Si - \sum Oi)}{\sum Oi} \quad (4)$$

O índice “dw” foi calculado por (Borges & Mendiondo, 2007; Samboranza et al., 2013):

$$dw = 1 - \frac{\sum [(Si - Oi)^2]}{[\sum (|Si - Oim|) + (\sum |Oi - Oim|)]^2} \quad (5)$$

O valor de r foi calculado por Borges & Mendiondo (2007) e Samboranza et al. (2013):

$$r = \frac{\sum (Oi - Oim) \times (Si - Sm)}{\sqrt{[\sum (Oi - Oim)^2] \times \sum (Si - Sm)^2}} \quad (6)$$

em que:

Oim - média dos valores observados; e

Sm - média dos valores simulados.

O índice de confiança (c) indica o desempenho dos modelos e é calculado por (Borges & Mendiondo, 2007):

$$c = r \times dw \quad (7)$$

em que:

r - coeficiente de correlação e dw é o coeficiente de concordância.

Além das estatísticas acima também foram realizados a análise de variância (ANOVA) e o teste Tukey a 0,05, dentro de cada região considerando-se dois tratamentos (produtividade observada e simulada) e N repetições (dados coletados nos trabalhos em cada região orizícola).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Valores elevados de correlação (acima de 0,82) entre os valores de produção de biomassa observados e simulados foram verificados para todas as cultivares nos dois anos de cultivo (Tabela 2) significando que o SimulArroz consegue capturar

Tabela 2. Estatísticas do desempenho da simulação de biomassa seca de arroz (g m⁻²) com o modelo SimulArroz no ano agrícola 2011/2012 em Santa Maria, RS, em três datas de semeadura (17/11/2011, 18/11/2011, 19/12/2011) e quatro cultivares (IRGA 421, IRGA 417, BRS Querência e SCSBRS Tio Taka) e no ano agrícola 2012/2013

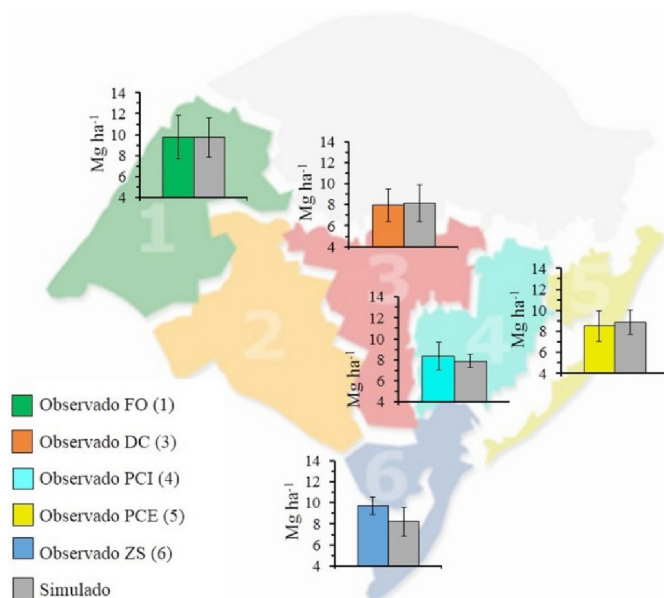
Compartimento	Estatística				
	RQMEn (%)	BIAS	dw	r	c
Ano agrícola 2011/12					
Parte aérea	34,7	-0,068	0,9987	0,9403	0,9390
Folhas	29,5	-0,106	0,9985	0,9381	0,9367
Colmos	35,3	-0,294	0,9968	0,9523	0,9492
Paniculas	29,5	-0,267	0,9990	0,8537	0,8508
Biomassa senescente	63,6	-0,308	0,9961	0,8253	0,8222
Ano agrícola 2012/13					
MS de colmos e folhas	16,64	-0,13	0,9946	0,9591	0,9539
Paniculas	22,77	-0,04	0,9899	0,9031	0,8939

RQMEn - Raiz do quadrado médio do erro normalizado; BIAS - Índice que mede o desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados; dw - Índice de concordância; r - Coeficiente de correlação; c - Índice de confiança

a variação de biomassa ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz. O desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados (BIAS) é ligeiramente negativo e o índice de concordância é próximo da unidade (Tabela 2) o que indica que o modelo SimulArroz tem elevada capacidade preditiva da produção de biomassa da cultura do arroz.

Avaliando a predição de biomassa do modelo ORYZA 2000, Bouman & Laar (2006) encontraram erros médios relativos de 25, 31, 39 e 14% para biomassa total, folhas, colmos e panículas, respectivamente. Comparando mencionados valores com os encontrados neste trabalho (RQMEn, Tabela 2) os erros médios para folhas e colmos são semelhantes enquanto os erros encontrados pelos autores supracitados são mais baixos para biomassa total e panículas. Com base nesses resultados considera-se aceitáveis os erros de simulação de biomassa com o SimulArroz para este conjunto de dados.

A média da produtividade de grãos de arroz observada nos experimentos nas regiões orizícolas da Depressão Central, Fronteira Oeste, Planície Costeira Externa e Interna à Lagoa dos Patos e Zona Sul, foi de 7938, 9774, 8501, 8314 e 9759 kg ha⁻¹, respectivamente. A média da produtividade de grãos simulada com o SimulArroz foi próxima da média observada nas diferentes regiões orizícolas e o desvio padrão observado também foi capturado pelo modelo (Figura 1). A região da Fronteira Oeste teve a maior produtividade observada (13.574 kg ha⁻¹) com a cultivar IRGA 417 e também a maior diferença entre a mínima e a máxima produtividade (7.511 kg ha⁻¹). Já a menor produtividade constatada, foi de 4.451 kg ha⁻¹ no município de Cachoeirinha, região da Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos, com a cultivar IRGA 421. O SimulArroz conseguiu simular satisfatoriamente a produtividade com erros próximos de 1000 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹ para a maior e a menor produtividades acima citadas, respectivamente. A comparação da média de produtividade observada e simulada em cada região orizícolas (gráficos de barra na Figura 1) com o teste de Tukey a 0,05 indicou que não há diferença estatística. Estes resultados indicam que o modelo demonstrou ser bastante versátil, capturando a variação de ambiente entre as regiões orizícolas e a diferença de potencial produtivo das diferentes cultivares.



As barras de erro são um desvio padrão da média. Não há diferença estatística entre a produtividade observada e a produtividade simulada em cada região orizícola pelo teste de Tukey a 0,05

Figura 1. Produtividade (Mg ha^{-1}) da cultura de arroz observada e simulada pelo modelo SimulArroz nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul durante vários anos agrícolas (safras de 1984/85 a 2009/10)

As estatísticas confirmam que o modelo SimulArroz conseguiu capturar as variações de produtividade existentes entre as regiões orizícolas do Estado (Tabela 3). O índice BIAS foi próximo de zero em todas as regiões. O índice de concordância foi superior a 0,98 nas regiões Fronteira Oeste, Depressão Central e Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos e nas regiões Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos e Zona Sul os valores do índice de concordância foram um pouco menores (Tabela 3) indicando que nessas regiões a predição do modelo foi um pouco inferior; mesmo assim, os valores do índice de concordância podem ser considerados satisfatórios de vez que as variações das produtividades de grãos observadas nas diferentes regiões foram capturadas pelo modelo. O coeficiente de correlação e o índice de confiança foram menores na Depressão Central e na Zona Sul, como mais um indicativo de que na Zona Sul o modelo teve menor precisão.

A RQME variou de 1.022 a 2.134 kg ha^{-1} e na média do estado do RS foi 1.541 kg ha^{-1} (Tabela 3) enquanto o RQME foi, para esses valores, 12, 21,9 e 17,4%, respectivamente. Utilizando rendimentos publicados pelo IRGA (Instituto Rio-

Tabela 3. Estatísticas do desempenho da simulação da produtividade de grãos de arroz (kg ha^{-1}) nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul com o modelo SimulArroz

Regiões orizícolas	Estatística				
	RQME (kg ha^{-1})	BIAS	dw	r	c
Depressão Central	1778	0,0273	0,9817	0,3734	0,3666
Fronteira Oeste	1422	-0,005	0,9874	0,7300	0,7208
PCI à Lagoa dos Patos	1165	0,0443	0,9910	0,6538	0,6479
PCE à Lagoa dos Patos	1022	-0,051	0,9336	0,6791	0,6340
Zona Sul	2134	-0,158	0,8411	0,5066	0,4252
Todas Regiões	1541	0,021	0,9960	0,5513	0,5491

RQME - Raiz do quadrado médio do erro; BIAS - Índice que mede o desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados; dw - Índice de concordância; r - Coeficiente de correlação; c - Índice de confiança; PCI - Planície Costeira Interna; PCE - Planície Costeira Externa

Grandense do Arroz) e resultados de experimentos realizados em Santa Maria (região da Depressão Central do Rio Grande do Sul), Walter et al. (2012) encontraram erros de 850 kg ha^{-1} no teste da versão do modelo fato que deu origem ao SimulArroz.

Os erros encontrados para este conjunto de dados (Tabela 3) na região da Depressão Central foram um pouco maiores que os encontrados por Walter et al. (2012) passível de ser explicado pelo maior número de safras usadas no presente trabalho (safras de 1984/85 a 2006/07) e principalmente safras anteriores às avaliadas por Walter et al. (2012). Quanto mais antigos os dados de safra são esperados, maiores erros de simulação, em função de que o SimulArroz, foi calibrado com experimentos durante a década de 2000 (Streck et al., 2013b) em que a utilização de tecnologias de manejo (data de entrada da água, manejo de adubação e fitossanitário) era maior que nos anos 80 e 90.

Entre as outras regiões se destaca a Planície Costeira Interna e Externa em que o RQME foi o menor com RQME de 14 e 12%, respectivamente. Esses erros são, em todas as regiões, considerados aceitáveis, com base nas condições tão diversas de anos e cultivares dos dados independentes (Tabela 1). Considerando que há vários fatores que contribuem para os erros neste tipo de teste, desde as próprias simplificações, que são inerentes ao uso de modelos matemáticos até a distância entre a estação meteorológica e o local do experimento os diferentes locais em que foram conduzidos os experimentos, tendência tecnológica de evolução da produtividade, cultivares, manejo etc. pode-se inferir que o modelo conseguiu capturar a variação da produtividade.

Como observaram Lorençoni et al. (2010) e Swain et al. (2007) que testaram a produção de matéria seca em arroz com o modelo ORYZA e apesar de observarem bom desempenho do modelo, enfatizaram a necessidade constante de melhorias e ajustes do modelo matemático. É provável que o SimulArroz também necessita de atualizações, principalmente no que diz respeito à simulação do crescimento da cultura pois muitos fatores precisam ser considerados para definição desta variável que influencia diretamente a produtividade; entretanto, a atual versão do SimulArroz (www.ufsm.br/simularroz) pode ser usada como ferramenta computacional para se estudar o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de arroz para todas as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul.

CONCLUSÕES

1. O modelo SimulArroz apresenta desempenho satisfatório em simular a produção de biomassa de diferentes cultivares e datas de semeadura de arroz, na região central do Rio Grande do Sul.

2. O modelo SimulArroz também é capaz de simular a produtividade de grãos e sua variação nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul com precisão média superior a 70%.

LITERATURA CITADA

Aggarwal, P. K.; Kalra, N.; Chander, S.; Pathak, H. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments, I. Model description. *Agricultural Systems*, v.89, p.1-25, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2005.08.001>

- Borges, A. C.; Mendiondo, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v.11, p.293-300, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000300008>
- Bouman, B. A. M.; Laar, H. H. van. Description and evaluation of rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. *Agricultural Systems*, v.87, p.249-273, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2004.09.011>
- Camargo, E. R.; Marchesan, E.; Avila, L. A. da; Silva, L. S. da; Rossato, T. L.; Massoni, P. F. Manutenção da área foliar e produtividade de arroz irrigado com a aplicação de fertilizantes foliares no estágio de emborrachamento. *Ciência Rural*, v.38, p.1439-1442, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782008000500038>
- Freitas, T. F. S.; Oliveira, J. V. Efeito do tratamento de sementes no desenvolvimento inicial e na produtividade de grãos de arroz irrigado. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 7, 2011. Balneário Camboriú, Anais...Itajaí: EPAGRI/SOSBAI, 2011. p.631-634.
- IRGA – Instituto Rio-Grandense do Arroz. Dados de safra: Série histórica da área plantada, produção e rendimento. http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131024101611producao_rs_e_brasil.pdf. 13 Mar. 2013.
- Kempf, D.; Lopes, S. I. G.; Lopes, M. C. B.; Rosso, A. de F.; Carmona, P. S.; Cremonese, J. L.; Freitas, P. R. S.; Ritzel, A.; Barroso, E.; Comoreto, R. C. de M. Rendimento de linhagens avançadas em semeadura pré-germinada, safra 2009/10. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 7, 2011, Balneário Camboriú, Anais...Itajaí: EPAGRI/SOSBAI, 2011. p.224-227.
- Lopes, M. C. B.; Lopes, S. I. G.; Carmona, P. G.; Oliveira, C. L. E.; Trojan, S. C. da; Hernandez, G. Avaliação de genótipos, no ensaio de rendimento preliminar, do programa de melhoramento genético do instituto Rio-grandense do arroz, na safra 2005/06. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 5, 2007, 1, 2007. Pelotas. Anais... Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007. p.195-197.
- Lorençoni, R.; Neto, D. D.; Heinemann, A. B. Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil. *Revista Ciência Agronômica*, v.41, p. 605-613, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902010000400013>
- Marchezan, E.; Aude, M. I. S.; Storck, L. Comportamento de genótipos de arroz irrigado em Santa Maria. *Ciência Rural*, v.26, p.147-148, 1996. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84781996000100027>
- Marchezan, E.; Camargo, E. R.; Lopes, S. I. G.; Santos, F. dos M.; Michelin, S. Desempenho de genótipos de arroz irrigado cultivados no sistema pré-germinado com inundação contínua. *Ciência Rural*, v.34, p.1349-1354, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782004000500005>
- Marchezan, E.; Garcia, G. A.; Camargo, E. R.; Massoni, P. F. S.; Arosemena, D. R.; Oliveira, A. P. B. de B. Manejo da irrigação em cultivares de arroz no sistema pré-germinado. *Ciência Rural*, v.37, p.45-50, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782007000100008>
- Marcolin, E.; Jaeger, R. L.; Fonseca, E. L. Rendimentos de grãos e eficiência de uso de água em lavouras comerciais de arroz irrigado com manejo adequado. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 7, 2011. Balneário Camboriú, Anais...Itajaí: EPAGRI/SOSBAI, 2011. p.362-365.
- Rosso, A. F.; Scherer, R.; Wang, L.; Yuntian, W.; Carmona, P. S.; Leal, C. E. B.; Freitas, P. R. da S.; Ritzel, A.; Oliveira, I. C. de P.; Cremonese, J. L.; Trojan, S.; Chaves, A. da C.; Neves, G.; Jaeger, R. L.; Piazzetta, D. Avaliação de genótipos de arroz híbrido do programa de melhoramento genético da parceria Instituto Rio-Grandense do Arroz/Fazenda Ana Paula, na safra 2009/10. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 7, 2011. Balneário Camboriú, Anais... Itajaí: EPAGRI/SOSBAI, 2011. p.54-57.
- Samboranza, F. K.; Streck, N. A.; Uhlmann, L. O.; Gabriel, L. F.; Modelagem matemática do desenvolvimento foliar em mandioca. *Revista Ciência Agronômica*, v.44, p.815-824, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902013000400019>
- Scivittaro, W. B.; Silva, P. da S.; Steinmetz, S.; Severo, A. C. M. Uso da água pelo arroz: efeito do período de supressão da irrigação. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 7, 2011. Balneário Camboriú, Anais...Itajaí: EPAGRI/SOSBAI, 2011. p.315-318.
- Shin, D. W.; Baigorria, G. A.; Lim, Y. K.; Cocke, S.; Larow, T. E.; O'Brien, J. J.; Jones, J. W. Assessing maize and peanut yield simulations with various seasonal climate data in the Southeastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v.49, p.592-603, 2010. <http://dx.doi.org/10.1175/2009JAMC2293.1>
- Shin, D. W.; Bellow, J. G.; Larow, T. E.; Cocke, S.; O'Brien, J. J. The role of an advanced land model in seasonal dynamical downscaling for crop model application. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v.45, p.686-701, 2006. <http://dx.doi.org/10.1175/JAM2366.1>
- Streck, N. A.; Alberto, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, p.1351-1359, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006000900002>
- Streck, N. A.; Bosco, L. C.; Lago, I. Simulating leaf appearance in rice. *Agronomy Journal*, v.100, p.490-501, 2008a. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2007.0156>
- Streck, N. A.; Bosco, L. C.; Lucas, D. D. P.; Lago, I. Modelagem da emissão de folhas em arroz cultivado e em arroz-vermelho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.559-567, 2008b. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2008000500002>
- Streck, N. A.; Charão, A. S.; Walter, L. C.; Rosa, H. T.; Benedetti, R. P.; Marchezan, E.; Silva, M. da R. SimulArroz: Um aplicativo para estimar a produtividade de arroz no Rio Grande do Sul. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 8, 2013, Santa Maria. Anais... Santa Maria: SOSBAI, 2013a. p.1618-1627.
- Streck, N. A.; Lago, I.; Gabriel, L. F.; Samboranza, F. K. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a nonlinear model. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.449-455, 2008c. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2008000400002>
- Streck, N. A.; Lago, I.; Oliveira, F. B.; Heldwein, A. B.; Avila, L. de A.; Bosco, L. C. Modeling the development of cultivated rice and weedy red rice. *Transactions of the ASAE*, v.54, p.371-384, 2011. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.36234>
- Streck, N. A.; Silva, M. R. da; Rosa, H. T.; Walter, L. C.; Benedetti, R. P.; Carli, C. de; Charão, A. S.; Marcolin, E.; Ferraz, S. E. T.; Marchesan, E. Acompanhamento da safra 2012/2013 de arroz irrigado no Rio Grande do Sul por modelagem numérica. *Ciência e Natura*, p.368-372, 2013b.

- Streck, N. A.; Uhlmann, L. O.; Gabriel, L. F. Leaf development of cultivated rice and weedy red rice under elevated temperature scenarios. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p.190-199, 2013c. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000200010>
- SOSBAI - Sociedade Sul Brasileira de Arroz Irrigado. Arroz irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil, 29. Itajaí: SOSBAI, 2012. 177p.
- Souza, C. A. M.; Silva, G. da F.; Xavier, A. C.; Mendonça, A. de R.; Almeida, A. de Q. Avaliação de modelos de afileamento não-segmentados na estimação da altura e volume comercial de *Eucalyptus* sp. *Ciência Florestal*, v.18, p.387-399, 2008.
- Swain, D. K.; Herath, S.; Bhaskar, B. C.; Krishnan, P.; Rao, K. S.; Nayak, S. K.; Dash, R. N. Developing ORYZA IN for medium- and long-duration rice: variety selection under non water stress Conditions. *Agronomy Journal*, v.99, p.428-440, 2007. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2006.0204>
- Walter, L. C.; Rosa, H. T.; Streck, N. A.; Ferraz, S. E. T. Adaptação e avaliação do modelo InfoCrop para simulação do rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado. *Engenharia Agrícola*, v.32, p.510-521, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000300010>

Physiological responses of rice cultivars exposed to different temperatures and flood depths in a water seeded system

Gerson Meneghetti Sarzi Sartori*, Enio Marchesan, Fernando Teixeira Nicoloso, Júlia Gomes Farias, Cristian Fernandes Azevedo, Lucas Lopes Coelho, Maurício Limberger de Oliveira

Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, 1000, Bairro Camobi, Santa Maria – RS, CEP 97105-900, Brasil

*Corresponding author: dudumeneghetti@hotmail.com

Abstract

Temperature and flood depths influence the growth and development of irrigated rice. The objective of this study was to evaluate the initial response of two rice genotypes on oxidative stress, growth and nitrogen accumulation of rice seedlings under different temperatures and flood depths in a water seeded system. The study was conducted in 2012 using a phytotron chamber. Treatments were a combination of two air temperatures regimes (17 and 20°C), two rice genotypes (IRGA 425 and Epagri114) and three flood depths (1, 5 and 9 cm). The results showed that temperature affected seedling performance, with greater dry mass for roots and shoots, as well as greater nitrogen accumulation at 20°C at a flood depth of 1 cm for both genotypes. The H₂O₂ concentration in the root increased with increasing flood depth, with a significantly greater increase for the 114 Epagri genotype. The activity of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) varied depending on the genotype, with SOD being the most expressive, increasing its activity with increasing flood depth. Chlorophyll and carotenoid contents decreased significantly with increasing flood depth, with less interference for IRGA 425. Temperature and flood depth affected nitrogen absorption, dry matter accumulation and oxidative stress in rice seedlings in the system tested. The lowest stresses were observed in rice plants subjected to the flood depth of 1 cm at 20 °C, and cultivar IRGA 425 was more tolerant to increased depth of water when compared to cultivar Epagri 114.

Keywords: Cold; Flooding depth; Nitrogen; *Oryza sativa*; Oxidative stress.

Abbreviation: H₂O₂_hydrogen peroxide; SOD_ superoxide dismutase; CAT_ catalase; APX_ ascorbate peroxidase; DAS_days after seeding; S_ shoots; R_ roots; MDA_malondialdehyde.

Introduction

Irrigated rice is an important crop worldwide and a staple food for a large part of the population (Kanno et al., 2009). Rice yield is influenced by either high or low air temperature extremes (Gammulla et al., 2010). Low air temperature reduces the vegetative growth of the rice plant and increases grain sterility, decreasing grain yield by 30-40% in some parts of the world (Gammulla et al., 2010). One of the most important ways to increase the potential grain yield of rice crops is to match the period of greater crop responsiveness with the occurrence of higher appropriate solar radiation and temperature in the region (Freitas et al., 2008; Katsura et al., 2008; Safdar et al., 2008; Lack et al., 2012). However, for this to occur, early seeding is held in the period when air and soil temperatures are low, causing stress and a number of morphological and physiological changes in the crop (Ohsumi et al., 2012). Thus, the biomass production (Ohsumi et al., 2012), as well as the absorption and use of nitrogen, which is one of the determining factors in crop yield (Azam et al., 2003; Kanno et al., 2009), may be impaired. An alternative to minimize stress caused by low temperatures at the early development stages of rice crops is to use a water seeded system, where growth and early development of the radicle and/or shoot occur under the water layer. Thus, the properties of water such as specific heat and latent heat, contribute to buffering temperature fluctuations (Taiz and Zeiger, 2006). However, in this system, there is a demand for

genotypes with improved early development, because the performance of rice seedlings under anaerobic conditions depends on seed vigor and seedling capacity to degrade the reserve substances of the seed and convert them into new biomolecules, allowing them to grow until they reach the water surface (Wielewicz and Barros, 2003). In addition, in a water seeded system, the amount of water (flooding) is one of the factors causing stress (Mittal et al., 2009), because the O₂ concentration is low in this environment, which leads to anoxia (no O₂) or hypoxia (low O₂), generating toxic levels of H₂O₂ (Damanik et al., 2012). Thus, morphological changes may occur, such as stem elongation of plants and chlorosis in some rice genotypes that are not very tolerant to flooding (Kawano et al., 2002). According to Kocsy et al. (2011), low temperature stress causes significant yield loss in cereals. Moreover, this kind of stress may increase the production of reactive oxygen species (ROS) (Upadhyaya et al., 2007; Gill and Tujeta, 2010; Ranawake et al., 2012) and consequently damage membrane lipids, proteins, photosynthetic pigments and nucleic acids, which may result in cell death (Mittler 2002; Gill and Tujeta 2010). There are several established mechanisms that can reduce or prevent oxidative stress (Bonnecarrère et al. 2011). The antioxidant defense system is responsible for maintaining a balanced production of ROS. The system may be comprised of enzymatic antioxidants such as superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and

ascorbate peroxidase (APX) (Ella et al., 2003) and non-enzymatic ones such as carotenoids, which play a significant role in the photosynthetic system of plants (Salguero et al., 2003). This study evaluated the initial response of two rice genotypes at different air temperatures and flood depths in a water seeded system by verifying oxidative stress parameters, growth and nitrogen accumulation of seedlings. This is the first report to use a combination of different air temperatures and flood depths in a water seeded system to assess effective rice seedling establishment.

Results and discussion

Effect of air temperature on water and soil temperature

At the two target levels of air temperatures (17 and 20°C), water and soil temperatures were influenced by flood depth during the 25 days of the experiment (Fig 1 A, B). Soil temperature was always higher compared to water temperature at the same flood depth. Furthermore, in general, an increase in flood depth reduced both water temperature and soil temperature. The greatest reductions occurred in water temperature, with an average reduction of 0.4°C when the depth increased from 1 cm to 9 cm during the entire period.

Effect of air temperature and flood depth on root dry mass

There was a triple interaction among air temperature, cultivar and flood depth. As shown in Fig 2 A and B, root dry mass of cultivars IRGA 425 and Epagri 114 was influenced by temperature and flood depth, indicating sensitivity of the root system of these cultivars to the factors tested. In general, there was increased production of root biomass at the depths of 1 and 5 cm at 20°C compared to 17°C for both cultivars. A linear reduction of root dry mass occurred with increased flood depth for cultivars IRGA 425 and Epagri 114, at 17 and 20°C, respectively. These results are in agreement with Broch et al. (1997), who found a reduction in root dry mass as well as root and shoot length with increased flood depth at 21 days after seeding when assessing levels of flood depth (0, 1.5 and 3.0 cm) in a water seeded system with BR-IRGA 410. According to these authors, changes in root and shoot development can be explained by the reduced concentration of oxygen resulting from lack of O₂, which directly produces many biochemical reactions, and by the stress generated by water as a physical barrier to the growth of seedlings. However, in the present study, this reduction was more pronounced at the air temperature of 20°C, and higher root dry mass production was observed at the depth of 1 cm. Every plant species has a set of particular requirements for temperature, which enable proper growth and development. Many species, especially those which are native to hot habitats, show symptoms of injury when exposed to low temperatures (Kaniuga, 2008). These plants, including maize (*Zea mays*), soybean (*Glycine max*), cotton (*Gossypium hirsutum*), banana (*Musa sp.*) and rice (*Oryza sativa*), are generally sensitive to temperatures around 15°C. At a temperature of 20°C, cultivar IRGA 425 presented decreased root dry weight with increasing flood depth. This reduction was lower when compared to that of Epagri 114, showing that IRGA 425 was less sensitive to flood depth. At 17°C, however, there was less influence of flood depth on the root dry mass of the cultivars, and IRGA 425 presented the opposite behavior, showing greater reduction than Epagri 114, which showed no significant changes in biomass. According to Kocsy et al. (2011), exposure to cold, with or

without freezing, induces oxidative stress. Symptoms of injury induced by cold stress in plants occur in the first hours of exposure to low temperatures (Bonnecarrère et al., 2011). However, this period varies across species and genotypes, depending on their sensitivity to cold stress. Several phenotypic symptoms in response to cold stress include reduced leaf expansion, reduced root biomass, wilting, chlorosis (yellowing of leaves) and necrosis, in extreme cases. Low temperature also seriously hampers the reproduction and development of plants. Because increased flood depth resulted in reduced water and soil temperatures (Fig 1 A, B), it can be suggested that growth responses are an additional effect of cold stress; therefore, according to Ohsumi et al. (2012), low temperature not only reduces biomass production but also reduces rice grain yield as a result of the morphological and physiological changes that occur.

Effect of air temperature and flood depth on shoot dry mass and plant nitrogen accumulation

An interaction was found between the factors temperature and flood depth for shoot dry mass (SDM) and accumulated nitrogen (AN) per plant. Air temperature and flood depth not only interfered with root dry weight but also negatively affected shoot dry mass and nitrogen accumulation in the tissue of the cultivars (Fig 2 C and D, respectively). In general, higher production of shoot mass and greater nitrogen accumulation occurred at 20°C. According to Kanno et al. (2009), biomass production is dependent on the availability of photoassimilates produced and the efficiency of their use for growth, in addition to factors such as increased CO₂ assimilation, which may be due to the increase in leaf area and relative growth at suitable temperatures. In another study, the same authors evaluated biomass production and rice plant growth during the vegetative phase under three different night temperatures (17, 22, and 27°C), with a constant temperature of 27°C during the day. They found greater accumulation of sucrose and starch in plants under low temperature; according to Ohashi et al. (2000), this is indicative of the inefficient use of assimilates for plant growth. Another important point is that the greater accumulation of nitrogen observed in plant tissues at 20°C may have contributed to the higher shoot dry matter production in the present study. Additionally, at 20°C, there was a linear reduction in dry matter production and nitrogen accumulation with increasing flood depth. The depth of 1 cm provided greater shoot dry mass and nitrogen accumulation in the tissues. Interestingly, at 17°C flood depth did not affect these parameters. Cold stress effects include reduction of metabolic activity (Chinnusamy et al., 2007), which results in lower biomass production (Ohsumi et al., 2012), and this may be partly associated with the lower photosynthetic activity (Bagnall et al., 1988). A study by Bonnacarrère et al. (2011) evaluated two genotypes of japonica rice for tolerance to low temperatures, and a decrease was observed in the fresh weight of the genotypes at 10°C compared to that observed at 28°C. Under field conditions, Ohsumi et al. (2012) investigated two seeding dates (during the same season), one in which the average air temperature was 16.1 and 15.1°C and the other with average temperatures of 19.8 and 19°C. Based on that study, the parameters associated with number of leaves, shoot length and dry weight were higher during the period when temperatures were higher. According to the authors, the decrease in the shoots of plants grown at lower temperatures (16.1 and 15.1°C) implies that plants have a lower tissue volume to store photoassimilates. In addition to

Table 1. Total chlorophyll at 25 days after seeding (DAS), depending on air temperatures and irrigated rice cultivars. Santa Maria, RS. 2013.

	Cultivars	
	IRGA 425	Epagri 114
17	1.167 NS a*	1.217 a
20	1.084 NS b	1.027 b
Mean	1.125	1.122
CV%	6,49	

* means not followed by the same lowercase letter in the column and the same uppercase letter in the row, does not differ by Tukey's test at 5% probability; NS - non-significant.

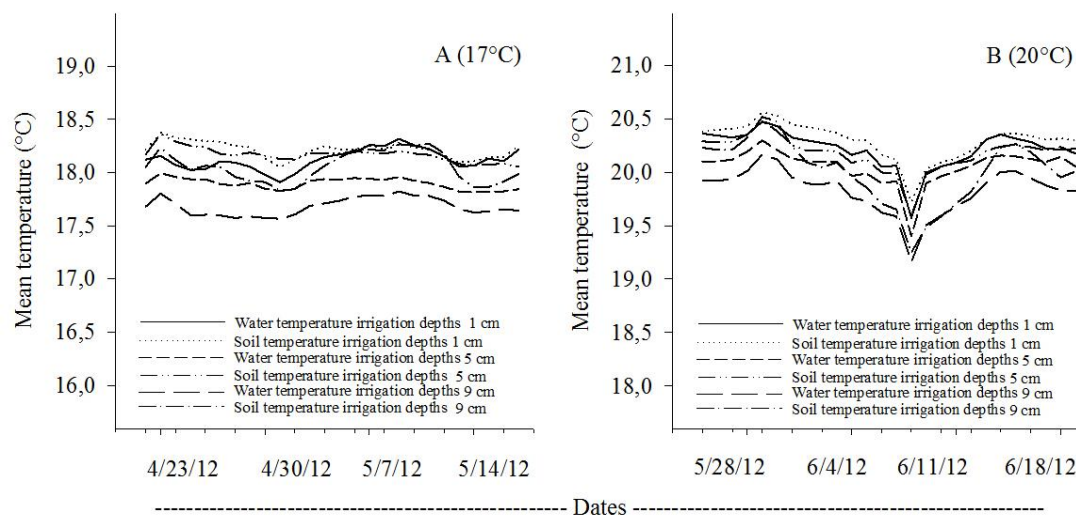


Fig 1. Water and soil temperatures at 17 and 20°C at flood depths of 1, 5 and 9 cm. Santa Maria, RS. 2013.

the production of biomass, mineralization and nitrogen availability for the plants are considerably dependent on the temperature of the rhizosphere (Azam et al., 2003). According to these authors, there may be genotypic differences for the effect of temperature in the root zone in terms of root development, nutrition and nutrient cycling. Shimono et al. (2012) evaluated nitrogen absorption in rice at different water temperatures (16 to 25 °C) and found an increase in the rate of nitrogen absorption with increasing water temperatures. They observed that low temperature affects the rate of nitrogen absorption, corroborating the data of this study. Accordingly, this reduction may have been decisive for the lack of differentiation in growth response across flood depths at 17°C, because reduced growth was observed even at the lowest flood depth. Temperature, coupled with flood depth, may account for the lower accumulation of nitrogen in shoots and, more markedly, in the root system.

Effect of air temperature and flood depth on root/shoot ratio

For root/shoot ratio (RSR), there was a triple interaction among air temperature, cultivar and flood depth. The biomass ratio (R/S) (Fig 2 E, F) showed a similar behavior to that of root dry mass. At 20°C, both rice cultivars showed a linear decrease in the R/S ratio with increasing flood depth. These data show that the partition of reserves and production of photoassimilates of these rice cultivars are sensitive to increased flood depth, which results in less biomass allocated to roots compared to shoots. This behavior may be partly associated with ethylene production, which is induced by submerging (Kawano et al., 2002). This can result in morphological and physiological changes, depending on how much the cultivar tolerates submersion. On the other hand, at the temperature of 17 °C, the flood depth did not affect the

biomass ratio of IRGA 425, while cultivar Epagri 114 showed a quadratic behavior with a higher R/S ratio at flood depths of 5 and 9 cm. Furthermore, there was a greater R/S ratio at 20 °C compared to 17 °C at the depths of 1 and 5 cm for cultivar IRGA 425. Responses to stress by submersion may vary with the genotype and species tested, and there may also be common responses to genotypes and species. These types of stress may go unnoticed during the plant cycle, and they are relevant components of the metabolism; however, if stress exceeds the capability of the plant to respond via the antioxidant system and does not follow the normal cell cycling, metabolic structural damage is observed, and cell division, cellular membranes and organelles are negatively affected (Damanik et al., 2012).

Shoot and root H_2O_2 concentration

There was a triple interaction among temperature, cultivar and flood depth for: H_2O_2 concentration in shoots. However, for H_2O_2 concentration in the roots, there was a double interaction between cultivar and flood depth. H_2O_2 concentration in shoots of cultivar IRGA 425 at 17 °C was not altered by variations in flood depth (Fig 3 A, B). However, at 20 °C, there was a linear reduction of H_2O_2 concentration (11%) with increasing flood depth, indicating that this cultivar is more tolerant to flood depth with regard to shoot growth. On the other hand, cultivar Epagri 114 showed a 60% increase in H_2O_2 concentration in the shoot as flood depth increased from 1 to 9 cm at 17 °C, but no influence was observed at 20 °C. In the roots (Fig 3C), both cultivars showed increased H_2O_2 concentration with increasing flood depth. The greatest change was observed for Epagri 114, with a 15% increase as flood depth increased from 1 to 9 cm. Thus, it appears that the root system is more sensitive to increased flood depth than are the shoots. In general, it was also observed that cultivar Epagri 114 showed higher H_2O_2

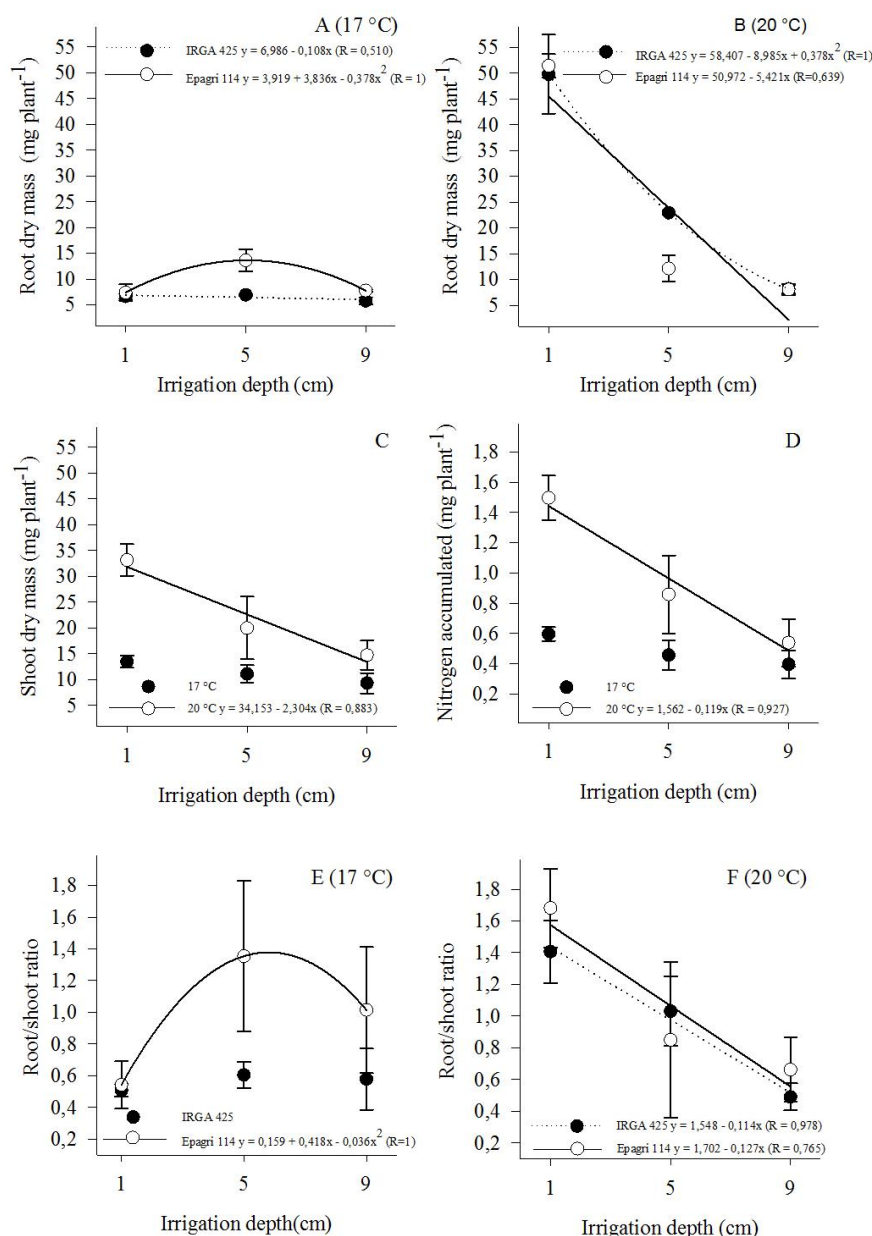


Fig 2. Root dry mass at 25 days after seeding (DAS) at 17°C (A) and 20°C (B); shoot dry mass at 25 DAS (C), accumulated nitrogen per plant in the shoots at 25 DAS (D); and root/shoot ratio at 25 DAS at 17°C (E) and 20°C (F) as a function of rice cultivar and flood depth. Santa Maria, RS. In 2013.

concentrations in roots than IRGA 425 at all flood depths, indicating its greater sensitivity. Increased H₂O₂ concentration has been observed not only at temperatures lower than the optimum (25°C) for growth of rice but also at temperatures higher than ideal. Bhattacharjee (2012), evaluating the effect of air temperatures (8, 25 and 40°C) on two rice cultivars for 24 hours, reported increased H₂O₂ concentration in roots and shoots at extreme temperatures (40 and 8°C) compared to the control (25°C). Matsumura et al. (2002), also studying rice, evaluated the effect of exposure to temperatures ranging from 5 to 25°C. In that study, H₂O₂ concentration increased in leaves of rice plants temporarily exposed to low temperature, and this resulted in an increase in senescent leaves. According to these authors, exposure to low temperatures for a long period of time may lead to H₂O₂ accumulation and disturbance of the redox state equilibrium. Zhang et al. (2012) also reported morphological and physiological changes in the root system of cucurbits

(*Cucumis sativus* L.) induced by low temperatures, including a reduction in fresh weight, and increased H₂O₂ concentration at 14 °C compared to 24°C. According to these authors, ROS are produced at low levels in organelles such as chloroplasts, mitochondria and peroxisomes under optimal growth conditions, whereas their production is markedly increased during stress. According to Cheng et al. (2007), the function of H₂O₂ is to mediate signal transduction in response to biotic and abiotic stresses in plant cells. Moreover, rice crops are sensitive even to mild cold stress, particularly at the early stages of seedling establishment, and japonica cultivars are generally more tolerant than most indica cultivars (Cheng et al., 2007).

Lipid peroxidation (MDA concentration)

There was a triple interaction among temperature, cultivar and flood depth for lipid peroxidation (MDA concentration).

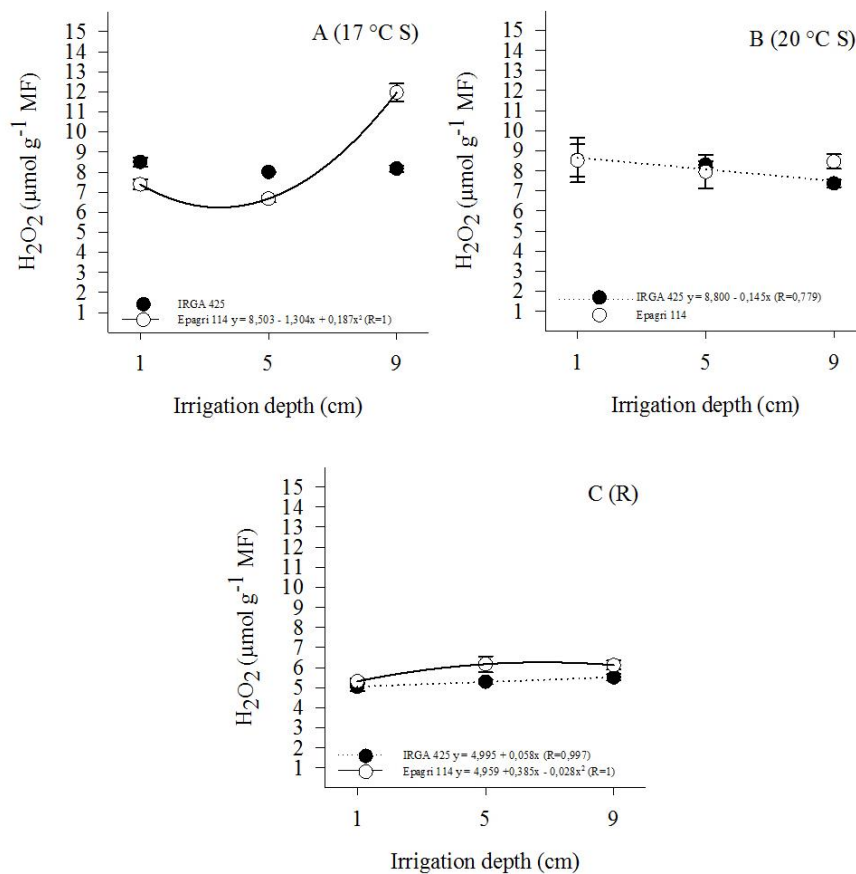


Fig 3. H_2O_2 concentration in shoots (S) (A, B) at 17°C and 20°C and H_2O_2 concentration in roots (R) (C) at 25 days after seeding (DAS) as a function of rice cultivar and flood depth. Santa Maria, RS. 2013.

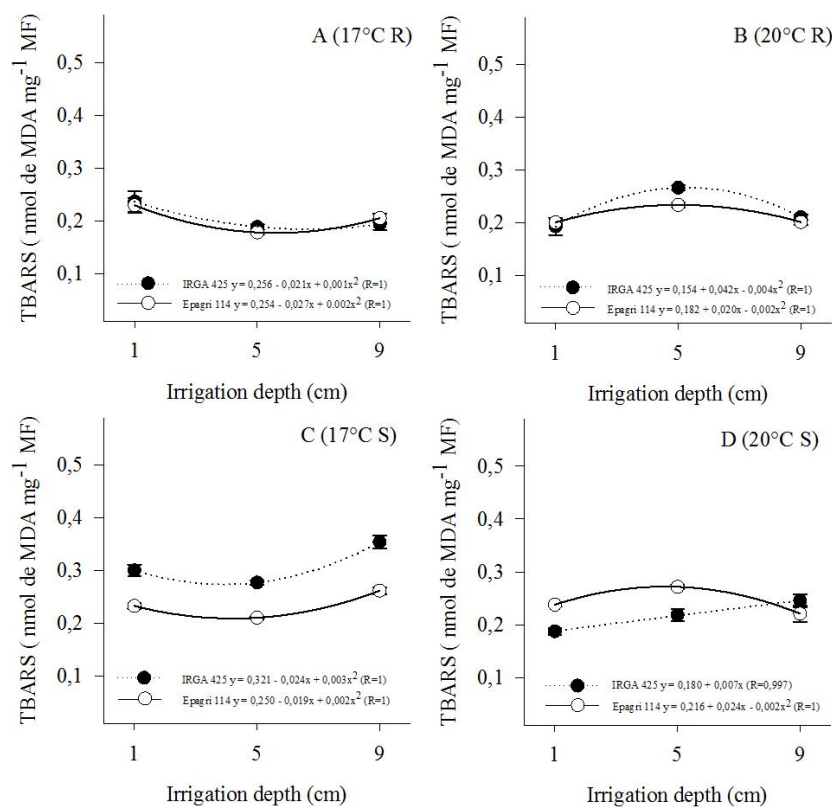


Fig 4. Lipid peroxidation in roots (R) (A, B) and shoots (S) (C, D) at 17°C and 20°C at 25 days after seeding (DAS) as a function of rice cultivar and flood depth. Santa Maria, RS. 2013.

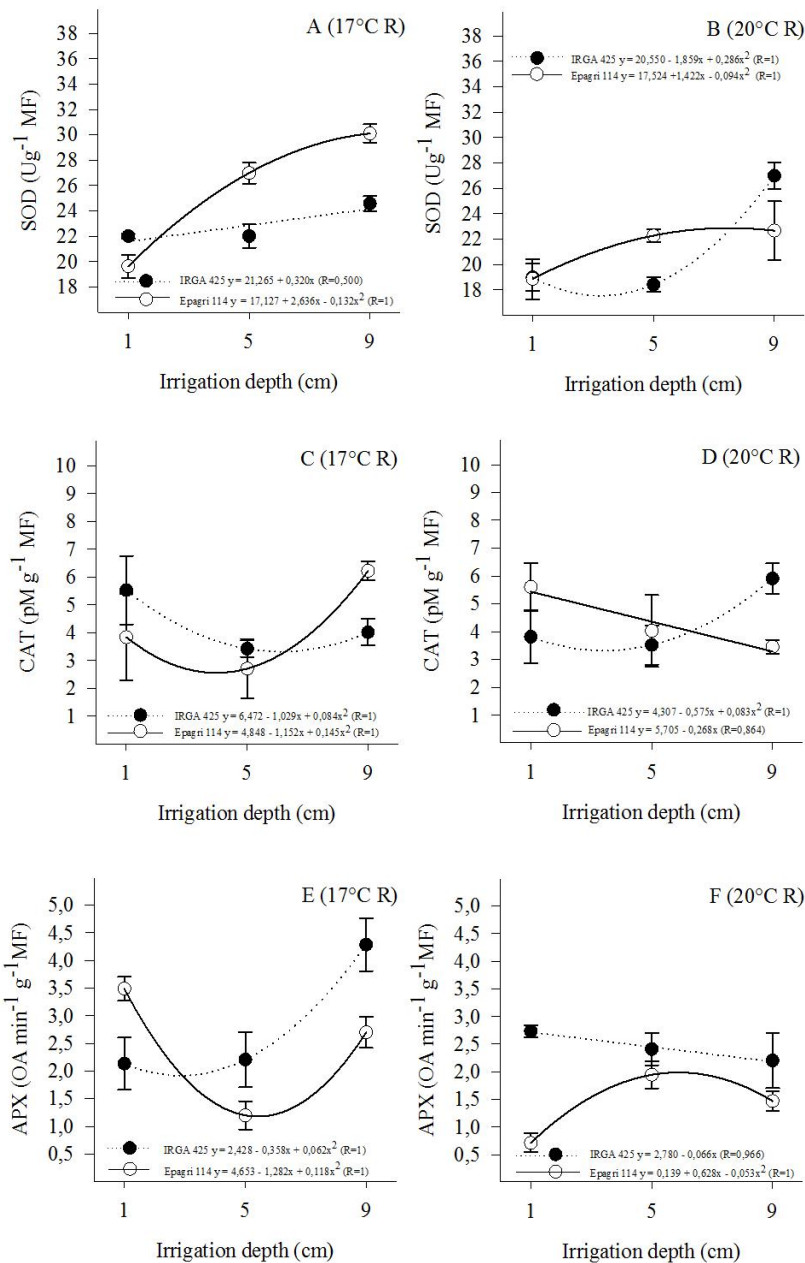


Fig 5. SOD (A, B), CAT (C, D) and APX (E, F) activity in roots (R) at 17°C and 20°C at 25 days after seeding (DAS) as a function of rice cultivar and flood depth. Santa Maria, RS. 2013.

In the roots, there was a slight reduction in MDA concentration for both IRGA 425 and Epagri 114, with increasing flood depth at 17 °C (Fig 4 A). When the temperature increased to 20 °C (Fig 4B), there was a smaller effect of flood depth on MDA concentration, with the highest concentration observed at the flood depth of 5 cm, where MDA levels were 38% and 16% higher in the tissue of roots as compared to that observed at the depth of 1 cm for cultivars IRGA 425 and Epagri 114, respectively. The increased MDA levels in roots might be due to the increased H₂O₂ concentration, resulting in increased lipid peroxidation (Ella et al., 2003; Upadhyaya et al., 2007). This would account for the reduced root growth of the two cultivars at increased flood depths. Lipid peroxidation is considered to be one of the most harmful processes in living organisms, indicating damage occurring in cell membranes (Gill and Tujeta, 2010). Furthermore, lipid peroxidation may have

damaged the chloroplast by inhibiting the synthesis of chlorophyll and, thus, photosynthesis (Ella et al., 2003). In the shoots (Fig 4C), unlike that which occurred in the roots, at 17°C there was an increase in MDA concentration with increasing flood depths (from 1 to 9 cm). The increase, by 18% for IRGA 425 and by 12% for cultivar Epagri 114, was also due to the higher production of H₂O₂. In this study, no significant differences were observed in MDA concentration in relation to changes in temperature. However, some studies have shown increased MDA concentration with decreasing temperature (Shi et al., 2006; Bonnacarrère et al., 2011; Kim and Tai, 2011). At 20°C (Fig. 4 D), this behavior was also observed, with an increase of 31% for IRGA 425. For Epagri, an increase of 14% in MDA was observed at a depth of 5 cm when compared to that observed at 1 cm.

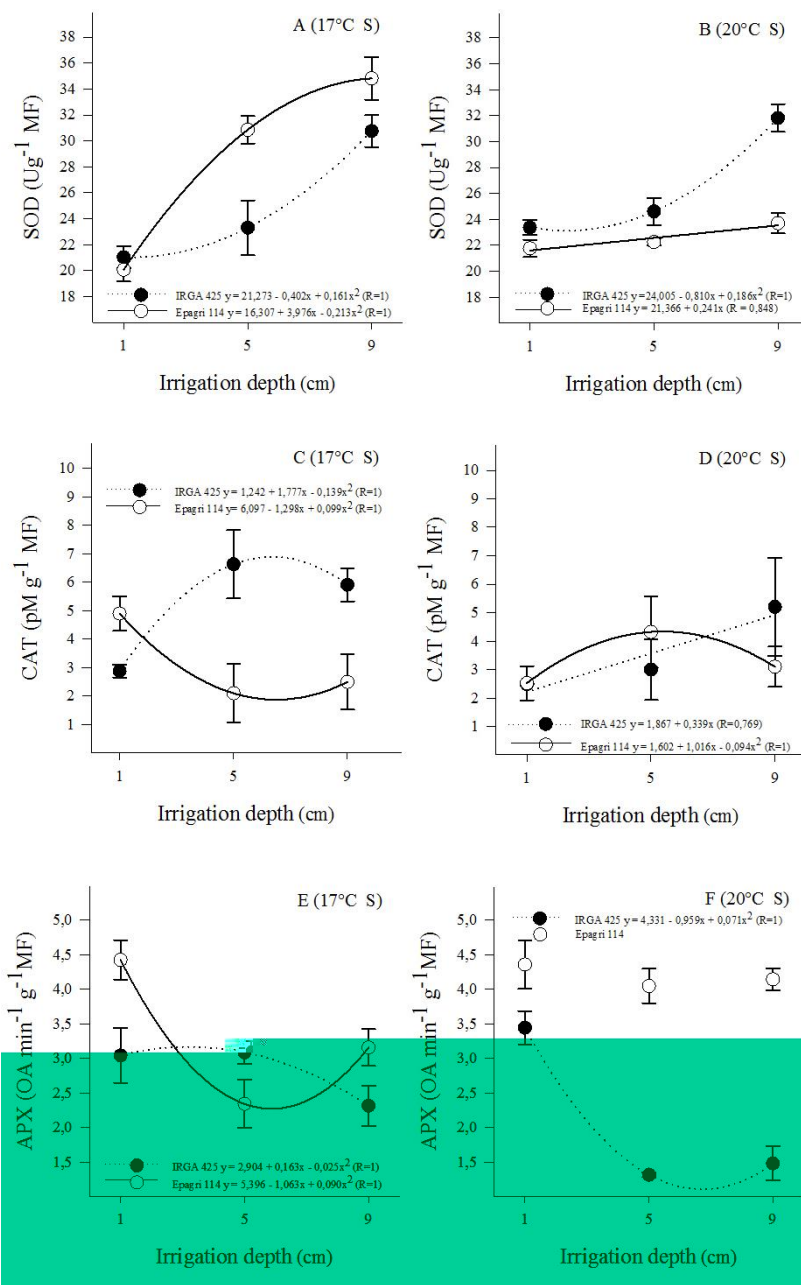


Fig 6. SOD (A, B), CAT (C, D) and APX (E, F) activity in shoots (S) at 17°C and 20°C at 25 days after seeding (DAS) as a function of rice cultivar and flood depth. Santa Maria, RS. 2013.

Antioxidative enzyme activities

There was a triple interaction among temperature, cultivar and flood depth for SOD activity, CAT activity and APX activity in roots and shoots. SOD activity in roots (Fig 5 A, B) increased with increasing flood depth at 17 °C and 20 °C for both cultivars. For cultivar IRGA 425, the increase was of 53 and 20% at 17 °C and 20°C, respectively, while for Epagri 114 the increase in SOD activity was of 12 and 42% at 17°C and 20 °C, respectively. In general, there was increased SOD activity at the lower temperature (17 °C). SOD activity in the shoots (Fig 6 A, B) was similar to SOD activity in the roots. For both cultivars and air temperatures, the highest SOD activity occurred at the depth of 9 cm. At this flood depth, SOD activity for Epagri 114 was 73 and 8% higher when compared to 1 cm, for 17°C and 20°C, respectively. For IRGA 425, the increase was of 46 and 36% at 17°C and

20°C, respectively. Similar to that observed in the root, SOD activity was also higher at the lower temperature. Based on the results shown in Fig 6 A and B, it can be concluded that cultivar Epagri 114 shows greater sensitivity to flood depth at the lower temperature (17 °C) when compared to IRGA 425. However IRGA 425 shows a similar behavior at both temperatures, but also presents higher SOD activity at a flood depth of 9 cm. CAT activity in roots (Fig 5 C, D) presented variations in accordance with the cultivar and temperatures evaluated. At 17°C, CAT activity for the cultivar IRGA 425 was 37% higher at 1 cm than at 9 cm of depth. However, the same cultivar had an opposite behavior at 20°C, where there was higher CAT activity at the greatest flood depth of 9 cm. Considering the temperature, cultivar Epagri 114 also behaved differently in terms of CAT activity, which was 62% higher at the depth of 9 cm, when compared to the depth of 1 cm at 17°C. However, at 20 °C, this cultivar showed higher

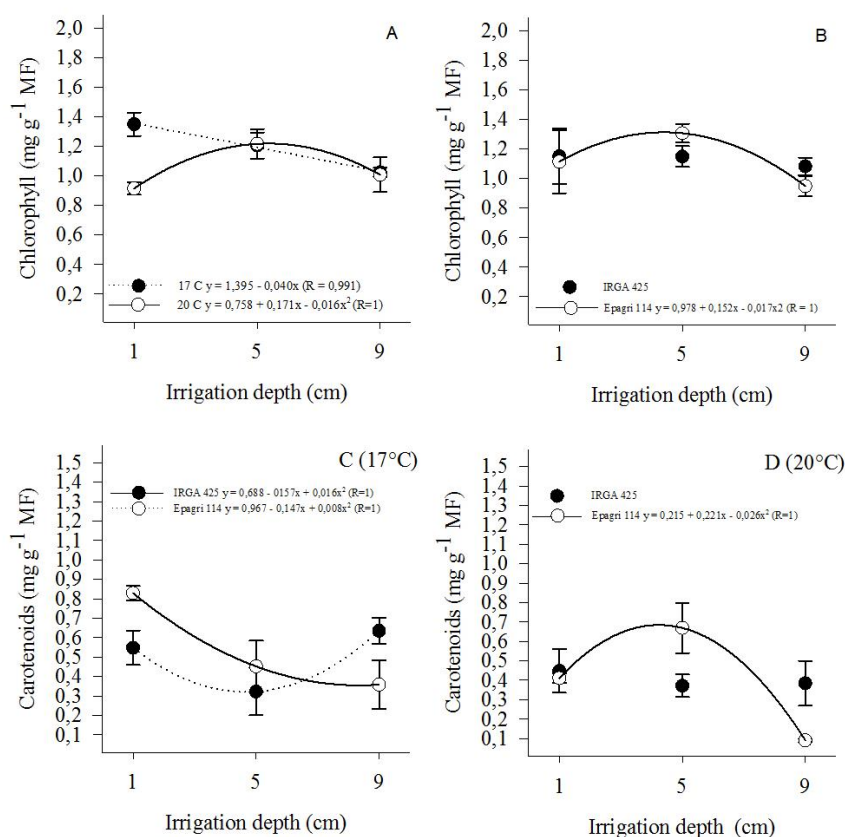


Fig 7. Concentration of total chlorophyll (A, B) and carotenoids at 17°C (C) and 20°C (D) at 25 days after seeding (DAS) as a function of rice cultivar and flood depth. Santa Maria, RS. 2013.

CAT activity at the depth of 1 cm, showing a linear decrease with increasing flood depth. In the shoots (Fig 6 C, D), for both temperatures, cultivar IRGA 425 showed an increase in CAT activity with increasing flood depth. However, Epagri 114 showed higher CAT activity at the smallest flood depth (1 cm) at the lower temperature (17°C), and there was increased activity with increasing temperature and depth, with 71% higher activity at 5 cm compared to 1 cm. It was also observed that, in general, at the lower temperature, CAT activity was higher for IRGA 425, but there were no differences between the cultivars at 20°C. At 17 °C, APX activity in roots (Fig 5 E, F) for cultivar IRGA 425 was 100% higher at 9 cm compared to the depth of 1 cm. However, at 20°C, higher APX activity was observed at 1 cm, with a subsequent reduction with increased flood depth. Epagri 114 showed a different behavior than IRGA 425, with a 30% increase of APX activity at 1 cm (17°C), than at the highest depth (9 cm), and increased activity with increasing temperature and flood depth. In the shoots (Fig 6 E, F), cultivars IRGA 425 and Epagri 114 generally showed higher APX activity at the lower flood depth (1 cm). It was also observed that Epagri 114, except for the depth of 5 cm at 17 °C, presented higher APX activity compared to IRGA 425 at all flood depths and temperatures. Thus, it appears that there was variation between the cultivars with regards to the assessed antioxidant enzymes (SOD, CAT and APX). However, SOD stood out as an important enzyme in the defense system of rice, clearly demonstrating the effect of temperature and flood depth in irrigated rice crops. This is due to the fact that SOD is the first enzyme to act in the detoxification process, converting the superoxide anion radical into hydrogen peroxide (Damanik et al., 2012), while CAT and APX catalyze the reduction of hydrogen peroxide

into water and oxygen (Ella et al. 2003). According to Damanik et al. (2012), an efficient combination of SOD and CAT can minimize the effects of oxidative stress, playing an important role in the regulation of ROS. According to Saher et al. (2005), SOD is a key enzyme in the response to anoxia, which can result from the formation of toxic levels of H₂O₂. It is well established that various environmental stresses often increase the generation of ROS, with SOD playing an important role in plant tolerance to stresses, considered the first mechanism of defense against the toxic effects of high levels of ROS (Gill and Tujeta, 2010). According to Bonnacarrère et al. (2011), high SOD activity may help to establish tolerance during the early hours of cold stress. In other species, such as *Cucumis sativus* L., Zhang et al. (2012) found an increase in SOD activity at low temperatures, with no effect on CAT and APX. Bonnacarrère et al. (2011) reported that several studies have shown differences in the behavior of SOD, CAT and APX after plant exposure to low temperatures, both in tolerant and susceptible genotypes, which implies that a response of these antioxidant enzymes may or may not reflect the mechanisms involved in tolerance or susceptibility to cold temperatures. In addition to antioxidant enzymes, other studies in rice have shown more than 1900 proteins expressed at a given temperature (12 and 20°C or 36 and 44°C), 850 of which were responsive to both temperature extremes (Gammulla et al., 2010).

Chlorophyll and carotenoid

For chlorophyll in plant shoots there were double interactions for temperature and cultivar; temperature and flood depth; and cultivar and flood depth. For carotenoids in the shoots there was a triple interaction among temperature, cultivar and

flood depth. For total chlorophyll content (Fig 7 A, B), cultivar IRGA 425 presented a higher content at the lowest flood depth (1 cm) at 17 °C, with reducing content as flood depth increased. At 20 °C, there was no change in chlorophyll content with increasing flood depth for this cultivar. For Epagri 114, at the lower temperature, there was a small increase in chlorophyll content with increasing flood depth, but there was a reduction in chlorophyll content with increasing flood depth at 20 °C. Between the cultivars (Table 1), there was no difference for either temperature, but there was lower chlorophyll content at the higher temperature (20 °C). The concentration of carotenoids was also affected by the change in flood depth, with lower concentrations at the highest depth (9 cm), at both temperatures, for cultivar Epagri 114 (Fig 7 C, D). For the same cultivar, there was a reduction of 30 and 16% in the concentration of carotenoids at 9 cm when compared to the depth of 1 cm at 17°C and 20°C, respectively. On the other hand, IRGA 425 suffered less interference from temperature and flood depth. The lower concentrations of chlorophyll and carotenoids with increasing flood depth may have resulted from the increased H₂O₂ concentration. Upadhyaya et al. (2007) evaluated the effect of various H₂O₂ concentrations (0 to 1 mM) in the primary leaves of rice, and found lower content of carotenoids and chlorophyll with an increase in H₂O₂ concentration. Carotenoids b-carotene and zeaxanthin and tocopherols play an important photoprotective role, either by dissipating excess energy as heat or cleaning ROS (Gill and Tujeta, 2010). According to these authors, there are over 600 carotenoids in nature. Carotenoids such as neoxanthin and lutein have been associated with the cleaning processes of ROS (Bonnecarrère et al., 2011). A study by Shi et al. (2006) evaluated the effects of low temperature on the pigment content and antioxidant activity on flag leaves of two varieties of rice. They found a reduction in the content of photosynthetic pigments (chlorophyll and carotenoids) with decreasing temperatures. However, the lower chlorophyll content observed in the present study for the higher temperature (20 °C) may be explained by the dilution effect resulting from higher plant growth, observed by measuring dry mass at this temperature compared to 17 °C (Table 1). The decrease in carotenoid content with increasing flood depth has important consequences for plants, such as slower growth and development, or lower dry matter accumulation, as observed in this study. This is because carotenoids are important pigments for absorbing light during photosynthesis, and their reduction results in a reduction in photosynthetic activity and therefore, in growth and development.

Summary

It was found that air temperature and flood depth are important factors in rice production as they may cause stress in plants with consequences for nitrogen absorption in plant growth and development. However, this behavior was observed in plants at 25 DAS and at constant temperature conditions. After this period, the presence or absence of plant recovery will depend on exposure conditions, which can result in yield loss. The resulting effect will depend on the cultivar, because stress response varies with the tolerance of the plant to air temperature and flood depth. In this study, the lowest flood depth (1 cm) and the highest temperature (20°C) resulted in higher plant performance due to increased nitrogen absorption and dry matter accumulation in plants. Furthermore, cultivar IRGA 425 was found to be more tolerant to these factors when compared to Epagri 114.

The lower performance of rice plants observed in this study is reflective of oxidative stress, which was identified by the enzymatic and non-enzymatic defense systems of the plants. These stresses are caused by low temperature (17°C) and great flood depth (9 cm). As a management strategy, lower flood depth should be used for rice at the beginning of seeding or when the temperature is low during this period. However, this depth must be great enough to provide enhanced nitrogen absorption and, thus, increased plant growth and efficient weed control.

Materials and Methods

Experimental design, plant material and growth conditions

The study was conducted in 2012 in a phytotron chamber at the Federal University of Santa Maria (UFSM), in the state of Rio Grande do Sul (RS), Brazil. The experimental design was completely randomized in a factorial scheme (2 x 2 x 3), with four replications. The A factor consisted of air temperatures of 17 and 20 °C, the C factor, of irrigated rice cultivars IRGA 425 and Epagri114, and the D factor, flood depths of 1, 5 and 9 cm. The two cultivars were chosen because they are the most widely used in the water seeded system. IRGA 425 presents a normal growth cycle while Epagri 114 presents a late cycle. The experimental units consisted of plastic trays with an area of 0.129 m². The substratum was unfertilized soil with the following physico-chemical composition at the time of seeding: water pH (1:1) = 5.6; Ca cmol_c DM⁻³ = 3.3, Mg cmol_c dm⁻³ = 1.0; Al cmol_c dm⁻³ = 0.0, Al saturation (%) = 0.0; Base saturation (%) = 58.2; MO (%) = 2.2, P - Mehlich mg dm⁻³ = 24.8; K mg dm⁻³ = 200.

The water seeded seeding system was used with flood depths formed 20 days before seeding. For each flood depth, the desired height was identified to maintain uniformity. An amount of 40 seeds per tray was used, corresponding to 310 seeds m⁻² for both genotypes. For pre-germination, the seeds were soaked in water for a period of 36 h. After this period they were removed from the water and placed in the shade in a protected environment for a period of 36 h until the primary root and coleoptile reached 2 to 3 mm (Sosbai, 2010). After this period, the seeds were seeded manually.

Air, water, soil temperatures and light intensity

The experiment was conducted at air temperatures of 17°C (day and night) and 20°C (day and night) up to 25 days after seeding (DAS), when the experiment was terminated. A 12:12 photoperiod was utilized with a light intensity of 325 µ mol s⁻¹m⁻². During this period, temperature of the water near the soil surface was recorded for each flood depth and soil temperature was recorded at a depth of 1 to 2 cm. Water and soil temperatures were monitored with 107-L34-PT sensors, and the data were recorded in a CR1000 data logger.

Growth parameters

Shoot length was measured at 25 DAS (V3 stage). For this evaluation, three plants per tray were collected, and shoot length was measured with a graduated scale. The mean value was obtained by summing the values of the three plants measured and then dividing the sum by the number of plants. In the same period, an evaluation was made of the dry weight of shoots and roots by drying them in a forced air heating system at 65 °C until constant weight.

Nitrogen concentration (N) and N accumulated per plant

To determine the concentration of N and N accumulated plant⁻¹, after the determination of the dry mass of the shoots harvested at 25 DAS, N was determined in these plants with a FLASH 2000 (NCS) autoanalyzer.

Determination of hydrogen peroxide

The concentration of hydrogen peroxide (H₂O₂) was determined according to Loreto and Velikova (2001): 0.05 g fresh matter (roots and shoots) were homogenized in 2 mL of 0.1% trichloroacetic acid. The homogenate was centrifuged at 12,000 g for 15 min. Then, 0.5 ml of the supernatant was added to 0.5 ml of 10 mM potassium phosphate buffer (pH 7.0) and 1 ml of 1M KI. The H₂O₂ concentration of the supernatant was measured by comparing its absorbance at 390 nm using a standard calibration curve (Loreto and Velikova, 2001).

Determination of chlorophyll and carotenoids

The concentrations of carotenoids and chlorophyll were determined by the method of Hiscox and Israelstam (1979) and estimated with Lichtenthaler's method (Lichtenthaler, 1987), using 0.1 g of frozen leaves. The leaves were incubated at 65 °C in dimethyl sulfoxide (DMSO) until the tissues were completely bleached. The absorbance of the solution was then measured at 470 nm, 645 and 663 to determine the concentration of carotenoids and chlorophylls.

Estimation of lipid peroxidation

The level of lipid peroxidation products was estimated according to the method of El-Moshaty et al. (1993), by determining the concentration of malondialdehyde (MDA) as the product of lipid peroxidation by reaction with thiobarbituric acid. The mixture was heated at 95 °C for 40 min and then cooled on ice for 15 min. After centrifugation at 5,000 g for 15 min at 4°C, the absorbance of the supernatant was determined at 532 nm. A correction for non-specific turbidity was made by subtracting the absorbance value obtained at 600 nm. Lipid peroxidation was expressed as nmoles of MDA (mg fresh mass⁻¹).

Enzyme activities

One gram of frozen tissue homogenized in 3 ml of 0.05 M sodium phosphate buffer (pH 7.8) including 1 mM EDTA and 2% (w/v) PVP was used for each assay (Zhu et al. 2004). The supernatant was used for the assays of Catalase (CAT), Ascorbate peroxidase (APX) and Superoxide dismutase (SOD). The CAT activity was assayed following the modified Aebi (1984) method. The APX activity was measured according to Zhu et al. (2004) and SOD activity was assayed according to Misra and Fridovich (1972).

Statistical analysis

The measured outcomes were tested by the assumptions of the mathematical model (normality and homogeneity of variance); the variable root dry mass at 25 DAS was transformed by the Box-Cox transformation. The values given are untransformed. The analysis of variance of the experimental data was performed using the F-test. The means of the qualitative factors, when significant, were compared by Tukey's test at 5% probability. The quantitative factor, when

significant, was subjected to polynomial regression analysis, by testing the linear and quadratic models. The level of significance was 5% probability of error.

Conclusion

Air temperature and flood depth affect nitrogen absorption, dry matter accumulation and oxidative stress in rice seedlings in the water seeded system, with differences between cultivars. Fewer stresses are observed in rice plants subjected to a flood depth of 1 cm at 20 °C with IRGA 425 being more tolerant to greater flood depth when compared to Epagri 114.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support of Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

References

- Aebi H (1984) Catalase *in vitro*. Methods Enzymol. 105:121-126.
- Azam F, Lodhi A, Farooq S (2003) Response of flooded rice (*Oryza sativa* L.) to nitrogen application at two root-zone temperature regimes in a pot experiment. Biol Fertil Soils. 38:21-25.
- Bagnall DJ, King RW, Farquhar GD (1988) Temperature-dependent feedback inhibition of photosynthesis in peanut. Planta. 175:348-354.
- Bhattacharjee S (2012) An inductive pulse of hydrogen peroxide pretreatment restores redox-homeostasis and oxidative membrane damage under extremes of temperature in two rice cultivars. Plant Growth Regul. 68:395-410.
- Bonnecarrère V, Borsani O, Díaz P, Capdevielle F, Blanco P, Monza J (2011) Response to photooxidative stress induced by cold in *japonica* rice is genotype dependent. Plant Sci. 180:726-732.
- Broch DL, Possenti J, Bevilacqua G (1997) Influência da lâmina de água e de reguladores de crescimento no estabelecimento do arroz pré-germinado. Rev Bras Agrocienc. 3:51-57.
- Cheng C, Yun KY, Ransom HW, Mohanty B, Bajic VB, Jia Y, Yun SJ, Reyes BG (2007) An early response regulatory cluster induced by low temperature and hydrogen peroxide in seedlings of chilling-tolerant *japonica* rice. BMC Genom. 175:1-18.
- Chinnusamy V, Zhu J, Zhu JK (2007). Cold stress regulation of gene expression in plants. Trends Plant Sci. 12:444-451.
- Damanik RI, Ismail MR, Shamsuddin Z, Othman S, Zain AM, Maziah M (2012) Response of antioxidant systems in oxygen deprived suspension cultures of rice (*Oryza sativa* L.). Plant Growth Regul. 67:83-92.
- Ella ES, Kawano N, Ito O (2003) Importance of active oxygen-scavenging system in the recovery of rice seedlings after submergence. Plant Sci. 165:85-93.
- El-Moshaty FIB, Pike SM, Novacky AJ, Sehgal OP (1993) Lipid peroxidation and superoxide production in cowpea (*Vigna unguiculata*) leaves infected with tobacco ringspot virus or southern bean mosaic virus. Physiol Mol Plant Pathol. 43:109-119.
- Freitas TFS, Silva PRF, Mariot CHP, Menezes VG, Anghiononi I, Bredemeier C, Vieira VM (2008) Produtividade de arroz irrigado e eficiência da adubação

- nitrogenada influenciadas pela época da semeadura. *Rev Bras Cienc Solo*. 32:2397-2405.
- Gammulla CG, Pascovici D, Atwell BJ, Haynes PA (2010) Differential metabolic response of cultured rice (*Oryza sativa*) cells exposed to high- and low-temperature stress. *Proteomics*. 10:3001-3019.
- Gill SS, Tujeta N (2010) Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol Biochem*. 48:909-930.
- Hiscox JD, Israelstam GF (1979) A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Can J Bot*. 57:1332-1334.
- Kanno K, Mae T, Makino A (2009) High night temperature stimulates photosynthesis, biomass production and growth during the vegetative stage of rice plants. *Soil Sci Plant Nutr*. 55:124-131.
- Kaniuga Z (2008) Chilling response of plants: importance of galactolipase, free fatty acids and free radicals. *Plant Biol*. 10:171-184.
- Katsura K, Maeda S, Lubis I, Horie T, Kao W, Shiraiwa T (2008) The high yield of irrigated rice in Yunnan, China 'A cross-location analysis. *Field Crops Res*. 107:1-11.
- Kawano N, Ella E, Ito O, Yamauchi Y, Tanaka K (2002) Metabolic changes in rice seedlings with different submergence tolerance after desubmergence. *Environ Exp Bot*. 47:195-203.
- Kim SI, Tai TH (2011) Evaluation of seedling cold tolerance in rice cultivars: a comparison of visual ratings and quantitative indicators of physiological changes. *Euphytica*. 178:437-447.
- Kocsy G, Pál M, Soltész A, Szalai G, Boldizsár Á, Kovács V, Janda T (2011). Low temperature and oxidative stress in cereals. *Acta Agron Hung*. 59:169-189.
- Lack S, Marani N, Mombeni M (2012) The effects of planting date on grain yield and yield components of rice cultivars. *Adv Environ Biol*. 6:406-413.
- Lichtenthaler HK (1987) Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Method Enzymol*. 148:350-382.
- Loreto F, Velikova V (2001) Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. *Plant Physiol*. 127:1781-1787.
- Matsumura T, Tabayashi N, Kamagata Y, Souma C, Saruyama H (2002). Wheat catalase expressed in transgenic rice can improve tolerance against low temperature stress. *Physiol Plant*. 116:317-327.
- Misra HP, Fridovich I (1972) The role of superoxide anion in the autoxidation of epinephrine and simple assay for superoxide dismutase. *J Biol Chem*. 247:3170-31755.
- Mittal D, Chakrabarti S, Sarkar A, Singh A, Grover A (2009) Heat shock factor gene family in rice: Genomic organization and transcript expression profiling in response to high temperature, low temperature and oxidative stresses. *Plant Physiol Biochem*. 47:785-795.
- Mittler R (2002) Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends Plant Sci*. 7:405-410.
- Ohashi K, Makino A, Mae T (2000). Growth and carbon utilization of rice plants under conditions of physiologically low temperature and irradiance. *Aust J Plant Physiol*. 27:99-107.
- Ohsumi A, Furuhashi M, Matsumura O (2012) Varietal differences in biomass production of rice early after transplanting at low temperatures. *Plant Prod Sci*. 15:32-39.
- Ranawake AL, Mori N, Nakamura C (2012) Expression profiles of stress responsive genes in rice (*Oryza sativa* L.) under abiotic stresses. *Biotechnol Bioengineer*. 26:2838-2843.
- Safdar ME, Ali A, Muhammad S, Sarwar G, Awan TH (2008) Effect of transplanting dates on paddy yield of fine grain rice genotypes. *Pak J Bot*. 40: 2403-2411.
- Salguero A, Morena B, Vigar J, Vega JM, Vilchez C, León R (2003) Carotenoids as protective response against oxidative damage in *Dunaliella bardawil*. *Biomol Eng*. 20:249-253.
- Saher S, García NF, Piqueras A, Hellín E, Olmos E (2005) Reducing properties, energy efficiency and carbohydrate metabolism in hyperhydric and normal carnation shoots cultured in vitro: a hypoxia stress?. *Plant Physiol Biochem*. 43:573-582.
- Shi DW, Mang CJ, Chen GX, Wang P, Wang J, Lu CG (2006) Effects of low temperature on photosynthetic pigments and antioxidant enzymes in flag leaves of high-yielding hybrid rice cultivars. *J Ecol Rural Environ*. 22:40-44.
- Shimono H, Fujimura S, Nishimura T, Hasegawa T (2012) Nitrogen uptake by rice (*Oryza sativa* L.) exposed to low water temperatures at different growth stages. *J Agron Crop Sci*. 198:145-151.
- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI) (2010) Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil / 28. Reunião Técnica da cultura do Arroz Irrigado, Bento Gonçalves, RS. Porto Alegre. 188 p.
- Taiz L, Zeiger E (2006) *Fisiologia Vegetal*. 3 ed., Porto Alegre: Artmed, 722p.
- Upadhyaya H, Khan MH, Panda SK (2007) Hydrogen peroxide induces oxidative stress in detached leaves of *Oryza sativa* L. *Gen Appl Plant Physiol*. 33:83-95.
- Wielewicki AP, Barros ACSA (2003) Atividade enzimática de genótipos de arroz irrigado sob diferentes condições ambientais. *Pesqui Agropecu Gaucha*. 9:25-31.
- Zhang YP, Jia FF, Zhang XM, Qiao YX, Shi K, Zhou YH, Yu JQ (2012) Temperature effects on the reactive oxygen species formation and antioxidant defence in roots of two cucurbit species with contrasting root zone temperature optima. *Acta Physiol Plant*. 34:713-720.
- Zhu Z, Wei G, Li J, Qian Q, Yu J (2004) Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Sci*. 167: 527-533.

Attenuation of low-temperature stress in rice seedlings¹

Mara Grohs², Enio Marchesan², Rodrigo Roso², Bibiana Silveira Moraes²

ABSTRACT

Rice is a cold-sensitive crop, and its exposure to low-temperature stress, during germination and early seedling growth, can negatively affect the initial stand establishment. Substances that act as growth regulators can be used to mitigate this initial stress. Thus, the influence of gibberellic acid, thiamethoxam and a phytohormone was investigated at the growth variables and antioxidant enzyme activity of the 'Irga 424' and 'Puita Inta CL' rice cultivars, at low-temperature (17 °C). The products act on the germination percentage of 'Puita Inta CL', but vigor is only influenced by gibberellic acid. Gibberellic acid influences shoot length, irrespective of cultivar, while thiamethoxam and the phytohormone only affect length in 'Puita Inta CL'. The antioxidant activity depends on the cultivar and organ tested (shoot or root). These products mitigate the effects of cold, thereby preventing the formation of reactive-oxygen species and lipid peroxidation, and positively influence the superoxide dismutase enzyme activity.

KEY-WORDS: *Oryza sativa* L.; growth regulator; gibberellic acid.

RESUMO

Atenuação de estresse
por baixa temperatura em plântulas de arroz

O arroz é uma cultura sensível ao frio, e a exposição ao estresse por baixa temperatura, durante a germinação e crescimento inicial das plântulas, pode afetar negativamente o estabelecimento do estande inicial. Substâncias que agem como reguladores de crescimento podem ser usadas para atenuar esse estresse. Nesse sentido, foi investigada a influência do ácido giberélico, tiametoxam e um fito-hormônio, nas variáveis de crescimento e atividade antioxidante de cultivares de arroz 'Irga 424' e 'Puita Inta CL', sob baixa temperatura (17 °C). Os produtos atuam na porcentagem de germinação de 'Puita Inta CL', mas o vigor somente é influenciado pelo ácido giberélico. O ácido giberélico influencia no comprimento da parte aérea, independentemente da cultivar, enquanto o tiametoxam e o fito-hormônio somente afetam o comprimento em 'Puita Inta CL'. A atividade antioxidante depende da cultivar e do órgão testado (raiz ou parte aérea). Esses produtos mitigam o efeito do frio, por meio da prevenção da formação de espécies reativas ao oxigênio e peroxidação lipídica, e influenciam positivamente na atividade da enzima superóxido dismutase.

PALAVRAS-CHAVE: *Oryza sativa* L.; regulador de crescimento; ácido giberélico.

INTRODUCTION

Abiotic stress is the primary cause of crop failure worldwide, reducing average yields for most major crops by more than 50 %. In response to these stress factors, various genes are upregulated, what can mitigate the stress effect and lead to adjustments in the cellular milieu and plant tolerance (Mahajan & Tuteja 2005, Gill & Tuteja 2010).

An important mechanism by which plants are damaged under adverse environmental conditions is the excessive production of reactive oxygen species (ROS), such as superoxide (O_2^-), hydrogen peroxide (H_2O_2) and hydroxyl radicals ($OH^\cdot$) (Apel & Hirt 2004).

Oxidative stress has been shown to occur in plants exposed to higher and lower temperatures, particularly in combination with high light intensities and drought. A common feature among the different ROS types is their capacity to cause oxidative damage to proteins, DNA and lipids (Gill & Tuteja 2010).

Each plant has its unique set of temperature requirements, which must be optimum for proper growth and development. In rice, the critical minimum temperature for shoot elongation ranges from 7 °C to 16 °C, and for root elongation from 12 °C to 16 °C (Yoshida 1981). In Brazil, rice should be sowed when soil temperature is 17 °C (Sosbai 2014), from September 1 (to coincide with the maximum solar radiation at flowering). In this

1. Manuscript received in Mar./2016 and accepted for publication in Jun./2016 (<http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632016v46a0436>).

2. Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Agronomia, Santa Maria, RS, Brazil.

E-mails: grohs.mara@gmail.com, eniomarchesan@gmail.com, rodrigoroso@yahoo.com.br, bibianamoraes@gmail.com.

period, soil temperature is low and can cause a delay in germination and emergence up to 32 days between sowing and emergence, when compared to 8 days, in periods of favorable temperatures (Mariot et al. 2009).

The major harmful effect of freezing is severe membrane damage (Morsy et al. 2005). This is largely due to the acute dehydration caused by freezing. Cold sensitive plants usually have a higher proportion of saturated fatty acids and, therefore, a higher transition temperature (Mahajan & Tuteja 2005).

In plants, ROS are continuously produced as byproducts of various metabolic pathways located in different cellular compartments. Under physiological steady state conditions, these molecules are scavenged by different antioxidative defense components that are often confined to particular compartments. The balance between ROS generation and scavenging may be disturbed by a number of adverse environmental factors, causing a rapid increase in the intracellular levels of ROS (Gill & Tuteja 2010).

Since rice is a cold-sensitive crop, the exposure to low-temperature stress, during germination and early seedling growth, can severely affect the stand establishment (Yoshida 1981). Thus, mechanisms that improve low-temperature stress tolerance, during germination and early seedling growth, are of immense interest to rice producers, mainly in the Rio Grande do Sul State, responsible for 70 % of the rice produced in Brazil. In this region, low temperature is very common during the growth season of flooded rice (Sosbai 2014).

The use of substances that act as growth regulators may improve seed germination and shoot emergence, particularly in weak or damaged seeds and under adverse conditions, such as temperature extremes or drought, resulting in a stand that is more uniform, vigorous and productive, thereby acting on germination (Cataneo et al. 2010). For example, gibberellic acid (GA_3) can act as a buffer to maintain good germination along with healthy stand establishment for rice (Lee et al. 2012).

Thiamethoxam is a novel broad-spectrum neonicotinoid insecticide used to control *Oryzophagus oryzae* in flooded rice. Although many reports describe its insecticidal, plant-protecting properties, just a few investigate its effect on seed germination activities, what may be a key control point in seedling vigor. Its mechanism of action is poorly understood

in plants and its stimulus on enzyme activity in the antioxidant system has been documented (Cataneo et al. 2010). Other products for treating seeds with an organic composition (polysaccharides, glycoproteins, peptides, fatty acids, amino acids and others), essential to plant growth and development, may have the potential to increase seed vigor by changing nitrogen metabolism.

This study aimed to investigate the effect of cold on germination and antioxidant enzyme activity in two rice cultivars treated with growth-regulating substances.

MATERIAL AND METHODS

The study was carried out in Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil, in 2012, using a Biochemical Oxygen Demand (BOD) incubation chamber equipped with a microprocessor based digital timer of the thermoperiod and photoperiod, forced air circulation in the vertical direction and temperature accuracy of ± 0.3 °C.

The experiment was conducted in a two-factor scheme, with four repetitions (2 x 4). The first factor was composed of seeds from two rice cultivars ('Irga 424' and 'Puita Inta CL'), while the second factor consisted of treating the seeds with gibberellic acid, thiamethoxam and a phytohormone (Haf Plus®) [mixture of nitrogen (5 %) + organic matter (25 %), L- α amino acids (6 %), *Ascomyllum nodosum* seaweed extract, polysaccharides, micronutrients (0.72 %)], and a control with water. The experiment was conducted at a temperature of 17 °C.

The products were applied directly to the seeds with a pressurized valve, 24 h before sowing. Fifteen grams of seeds from each cultivar were weighed, then treated with 0.7 mL of water and two drops of methylene blue designed to better visualize spray uniformity. Treatment flow was 4.6 L 100 kg⁻¹ of seeds.

Plant growth was quantified by germination percentage measurement of shoot and root lengths. For germination, four replicates of 100 seeds from each treatment were distributed on two sheets of blotter paper moistened with water (equivalent to 2.5 times the paper weight). Seedlings were evaluated at 7 and 14 days after sowing (DAS) (Brasil 2009). Results were expressed as the mean percentage of normal seedlings.

To measure shoot and root length, four replicates of 10 seeds were sown on a line drawn

on the upper third of the paper. Seedling length was measured with a millimeter ruler at 10 and 14 DAS. The values were obtained by adding the measurements of each repetition and dividing them by the number of seedlings. Seedlings from the germination test were separated into roots and shoots and frozen to carry out the biochemical tests.

The hydrogen peroxide content in the shoot and roots of seedlings treated with the products and the control treatment was determined according to Loreto & Velikova (2001). Lipid peroxidation was followed by the measurement of malondialdehyde (MDA) accumulation according to El-Moshaty et al. (1993). The activity of the superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) enzymes was assayed according to McCord & Fridovich (1969), Aebi (1984) and the modified method of Zhu et al. (2004), respectively. In all the enzyme preparations, protein was measured by the Coomassie Blue method (Bradford 1976), using BSA as a standard.

Statistical analysis was performed applying the Scott-Knott test at 5 %. Germination percentage (7 and 14 DAS) was transformed by the equation $yt = \sqrt{y} + 1$.

RESULTS AND DISCUSSION

The interaction between cultivars and products used was observed for all the variables analyzed (Table 1). In the germination stage, chilling injury symptoms are the most commonly observed in the delay and decrease in germination percentage (Mertz et al. 2009). Temperature has a significant influence on germination by affecting the activation stage and post germination growth. The effects of temperature on germination can be examined in relation to three aspects: temperature, time and germination percentage. In the present study, when rice seeds were treated with growth regulators, there was an increase in germination percentage, when compared to the control treatment (distilled water), in the 'Puita Inta CL' cultivar (Figure 1A).

For the 'Puita Inta CL' cultivar, GA₃ changed the germination rate (23 % of seedlings in the first evaluation), at 7 DAS, while the other treatments showed no seed germination. However, from 14 DAS, all the products were effective in stimulating germination, with a difference of 20 %, if compared to the control treatment. For the 'Irga 424' cultivar,

no significant difference was observed between treatments.

The shoot and root lengths were quantified to identify the organ of action of products (Figures 1B and C). For GA₃, there is a preference for shoot growth over the root system, in both cultivars. This is because GA₃ acts on mesocotyl elongation, mainly in Indica subspecies cultivars, showing a 10 mm difference between seedlings treated with GA₃ and control seedlings, due to increased cell wall plasticity and sugar hydrolysis, reducing water potential in the cell, resulting in water ingress and seedling elongation, especially in the mesocotyl (Lee et al. 2012). For thiamethoxam, there was a predominant growth of the root system up to 14 DAS, for 'Puita Inta CL'. The effect of thiamethoxam on the root system of plants has been reported by several authors

Table 1. Results of analysis of variance (Anova) of the *Oryza sativa* L. cultivar, products and their interaction for germination, shoot length, root length, H₂O₂ content, lipid peroxidation (MDA), ascorbate oxidase (APX), catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) activities.

Dependent variable	Organ	Day	Independent variable		
			Cultivar (C)	Product (P)	C x P
Germination	-	7	0.52*	2.20*	0.40*
	-	14	0.09*	0.11*	0.03*
Length	Shoot	10	0.88*	1.34*	0.10*
		14	15.69*	22.88*	1.56*
	Root	10	11.25*	0.99*	0.36*
		14	31.3*	1.00*	2.06*
H ₂ O ₂ content	Shoot	7	0.0002*	0.002*	0.001*
		14	0.0004*	0.002*	0.001*
	Root	7	0.0001*	0.00007*	0.00009*
		14	0.0005*	0.00004 ^{ns}	0.0001*
MDA content	Shoot	7	1.19*	0.27*	0.24*
		14	3.52*	2.63*	2.89*
	Root	7	1.99*	12.37*	3.03*
		14	0.38*	2.49*	0.32*
APX activity	Shoot	7	0.18*	0.26*	0.059*
		14	0.21*	0.19*	0.02*
	Root	7	0.02*	0.57*	0.03*
		14	0.15*	0.15*	0.49*
CAT activity	Shoot	7	1.77*	4.05*	3.6*
		14	0.8*	4.78*	0.92*
	Root	7	3.65*	3.44*	1.17*
		14	1.57*	3.97*	4.76*
SOD activity	Shoot	7	0.0006 ^{ns}	0.012*	0.013*
		14	0.31*	0.001*	0.08*
	Root	7	4.13*	2.29*	1.91*
		14	0.03*	0.04*	0.012*

Numbers represent F values at 5 %: ^{ns} not significant; * significant for p ≤ 0.05.

(Tavares et al. 2007, Lauxen et al. 2010, Almeida et al. 2011), but the reasons that lead to this stimulus have yet to be elucidated. In the field, this effect was attributed to greater water and nutrient absorption (Tavares et al. 2007). There were no significant differences in 'Irga 424', while, for 'Puita Inta CL', the effect of thiamethoxam on the root system was accompanied by phytohormone.

Disturbances to the germination process under stress conditions lead to excessive production of reactive oxygen species (ROS), in the absence of effective protection mechanisms (enzymatic or not), and metabolic changes that result in oxidative damage (Pan et al. 2006). In the present study, the

control treatment showed the highest H_2O_2 increase in the shoots under chilling stress, if compared to treatments with growth regulators, 7 and 14 DAS (Figure 2A), indicating that products mitigate abiotic stress (in this case the cold), avoiding the formation of ROS and their harmful effects on cell constituents.

However, this effect was only observed in the seedling shoots, because the H_2O_2 production in the root varied considerably between treatments (Figure 2B). At 7 and 14 DAS, significant differences were found only in the 'Puita Inta CL' cultivar, with an increase in H_2O_2 production in the roots of plants treated with GA_3 . Gibberellins are effective in stimulating mesocotyl elongation, promoting a

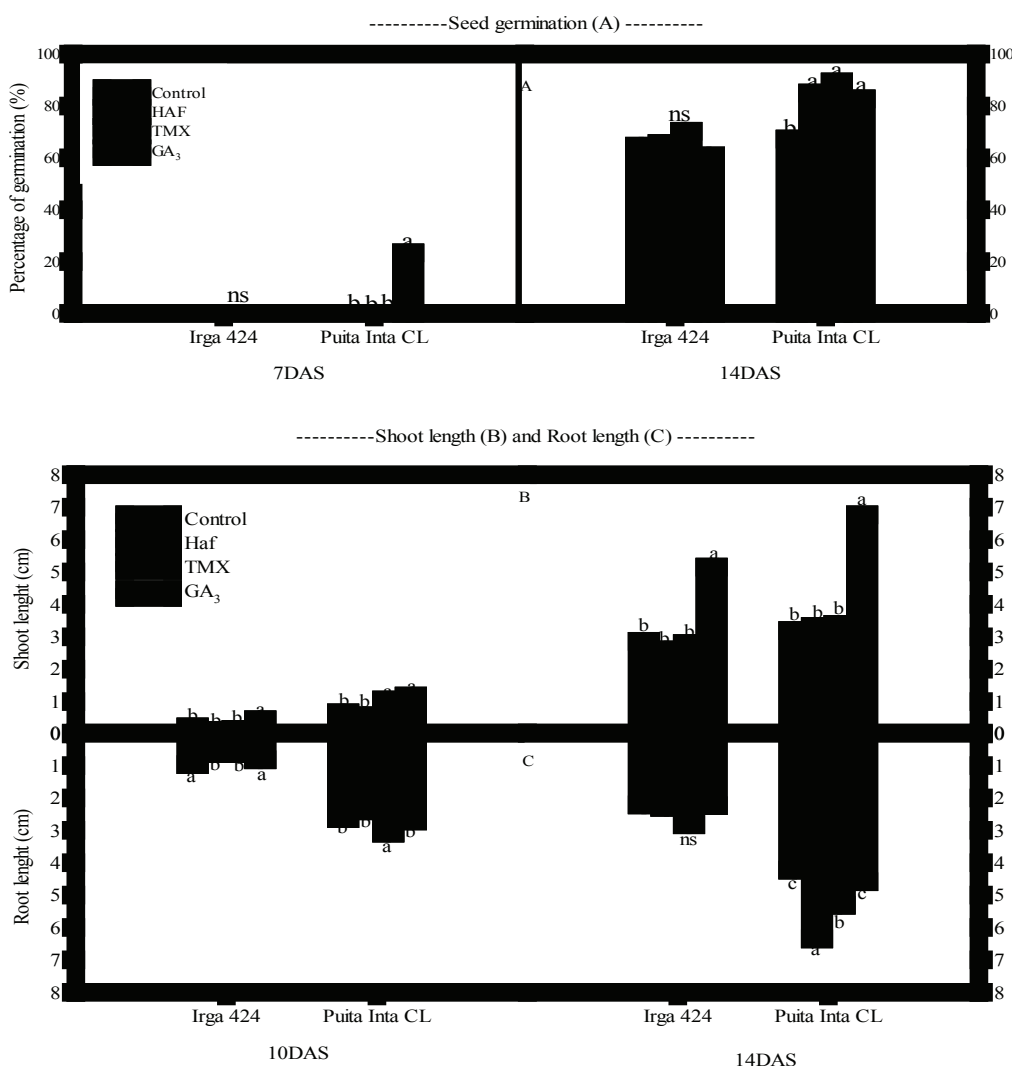


Figure 1. Effect of products, control, phytohormone (Haf), thiamethoxam (TMX) and gibberellic acid (GA_3) on germination percentage (A), shoot length (B) and root length (C) (cm) of two rice cultivars ('Irga 424' and 'Puita Inta CL'), at low temperature (17 °C; 10 and 14 days after sowing - DAS). Different letters indicate significantly different means between treatments (p ≤ 0.05).

rapid development of the seedling shoot (Yamaguchi 2008, Dai & Xue 2010). However, when shoot growth becomes excessive, the seedling moves its metabolites to nourish the organ at the expense of root development. This can lead to inhibited root growth. This inhibition is apparently responsible for the increase in H_2O_2 in the root.

ROS resulting from severe stress may cause lipid peroxidation damage to cell membranes, protein degradation of double-stranded breaks in DNA and cell death (Apel & Hirt 2004). Lipid peroxidation is the result of the presence of H_2O_2 caused by oxidative damage and its intensity may vary depending on the velocity of oxidative protection (Munns & Tester 2008). In this study, the high concentration of H_2O_2 in the control treatment affected the lipid peroxidation of the shoots at 7 and 14 DAS, in both cultivars used (Figure 3A). For the root, however, thiamethoxam and the phytohormone had a negative effect, showing high lipid peroxidation in both cultivars, at 7 and 14 DAS (Figure 3B). Although it had a positive influence on the germination of rice seedlings, depending on the dose used, thiamethoxam may exhibit toxicity

symptoms (Almeida et al. 2011). Moreover, according to Cavusoglu et al. (2011), increasing thiamethoxam doses can cause changes in mitosis and chromosomal aberrations, reducing the mitotic index and increasing lipid peroxidation, resulting in a decrease in the *Allium cepa* L. germination.

To mitigate the high production of ROS, plants have developed a good antioxidant defense system at the cellular level. The extent of oxidative stress in a cell is determined by the amount of superoxide, H_2O_2 and hydroxyl radicals. Therefore, the balance of superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX) and catalase (CAT) activities is crucial for suppressing toxic ROS levels in a cell.

Figures 4, 5 and 6 illustrate the activity of the antioxidant defense system represented by APX, CAT and SOD. APX activity showed an increase for most treatments, especially for the control treatment (Figures 4A and 4B). Stressed plants commonly react this way because the larger amount of H_2O_2 produced in this treatment acts as a second messenger inside the cell (Forman et al. 2010). This leads to the increased production of antioxidant enzymes (APX,

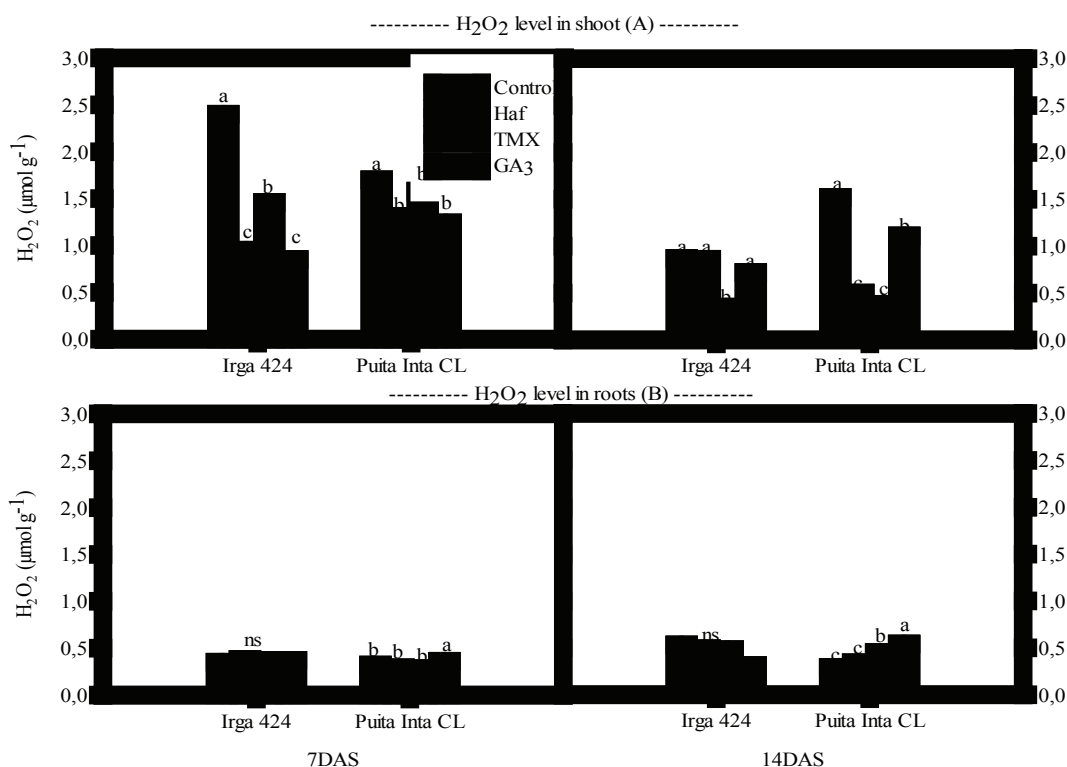


Figure 2. Endogenous content of oxidative products (H_2O_2) in rice seedlings, as a result of exposure to different products, under stress conditions [control, phytohormone (Haf), thiamethoxam (TMX) and gibberellic acid (GA_3)]. Different letters indicate a significantly different mean between treatments ($p \leq 0.05$).

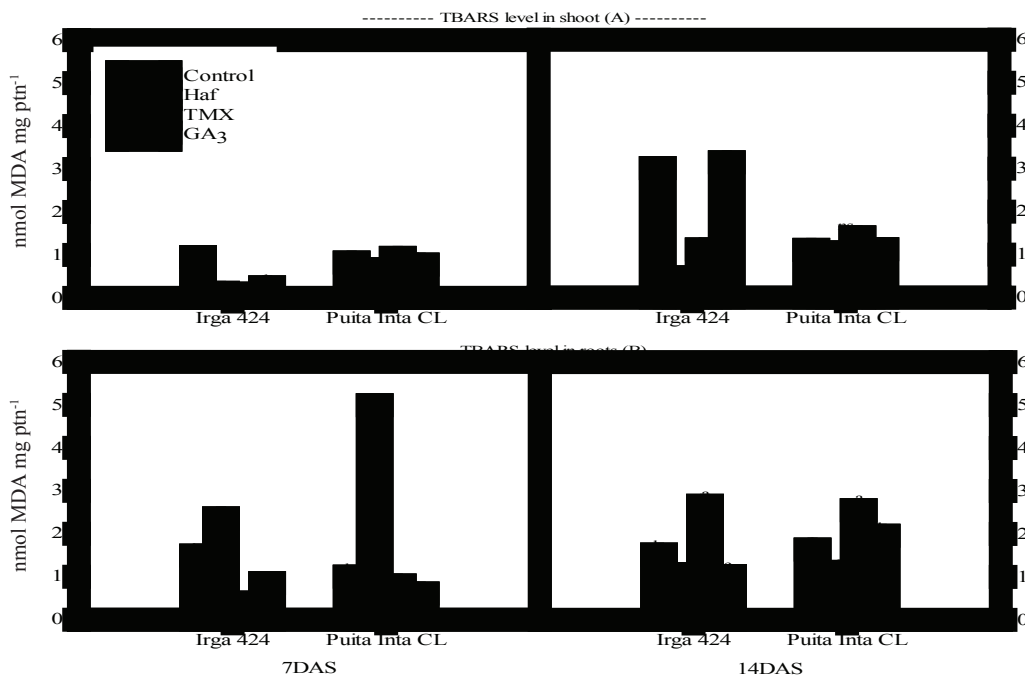


Figure 3. Lipid peroxidation in the rice seedlings, as a result of exposure to different products, under stress conditions [control, phytohormone (Haf), thiamethoxam (TMX) and gibberellic acid (GA₃)]. Different letters indicate a significantly different mean between treatments ($p \leq 0.05$).

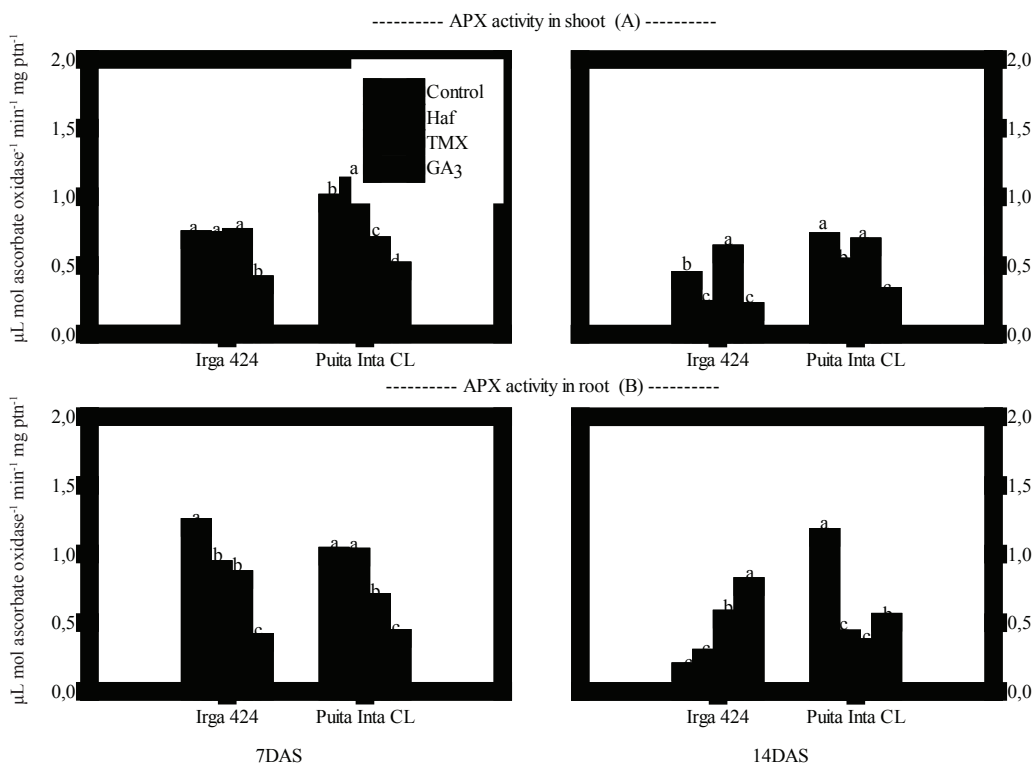


Figure 4. Ascorbate oxidase (APX) activity in the shoots (A) and roots (B) of 'Irga 424' and 'Puita Inta CL' cultivars, before treatment with products, under stress conditions [control, phytohormone (Haf), thiamethoxam (TMX) and gibberellic acid (GA₃)], at low temperature (17 °C; 7 and 14 days after sowing - DAS). Different letters indicate a significantly different mean between treatments ($p \leq 0.05$).

in this case), in an attempt to detoxify the cell. The treatment with GA_3 showed the lower activity of this enzyme in the shoots, probably because this growth regulator minimizes cold-related stress by activating hydrolytic enzymes such as α -amylase, which stimulates germination and shoot growth, even under stress conditions. The highest APX activity in the root was also dominant in the control treatment.

In contrast to APX, products showed greater CAT enzyme activity in the shoot and root of the 'Irga 424' cultivar (Figures 5A and 5B). For 'Puita Inta CL', the highest CAT activity was quantified in the control treatment. There is a difference in cold sensitivity between rice cultivars. According to Cruz et al. (2010), Indica subspecies cultivars are less tolerant to this type of abiotic stress. 'Irga 424' is classified as cold sensitive, with low initial vigor (Cruz et al. 2010), while 'Puita Inta CL' is classified as having high initial vigor and moderate tolerance to cold. These genetic traits led to the result obtained in the present study. With respect to their high sensitivity to cold, 'Irga 424' did not respond to the treatment

with growth regulators, in contrast to 'Puita Inta CL', concerning germination. There was an increase in H_2O_2 production and consequently greater stimulus to enzyme activation for the detoxification that occurred in all treatments. It was demonstrated that 'Puita Inta CL' is more responsive to growth regulators, what had a positive influence on germination. The consequences of stress were minimized, but not in the control treatment, resulting in an increased presence of ROS, and a consequent rise in enzyme activity antioxidants, such as CAT, in the shoot and root. There was a significant stimulus of GA_3 in the root of 'Irga 424', at 14 DAS.

Among the enzymes, SOD activity showed the lowest activity, when compared to the other enzymes studied. The activity of this enzyme depends on the cultivar and organ evaluated. SOD activity in the shoot of the 'Irga 424' cultivar (Figure 6) was stimulated mainly in seedlings treated with phytohormone, while, in 'Puita Inta CL', there was greater activity for GA_3 and thiamethoxam, depending on the evaluation.

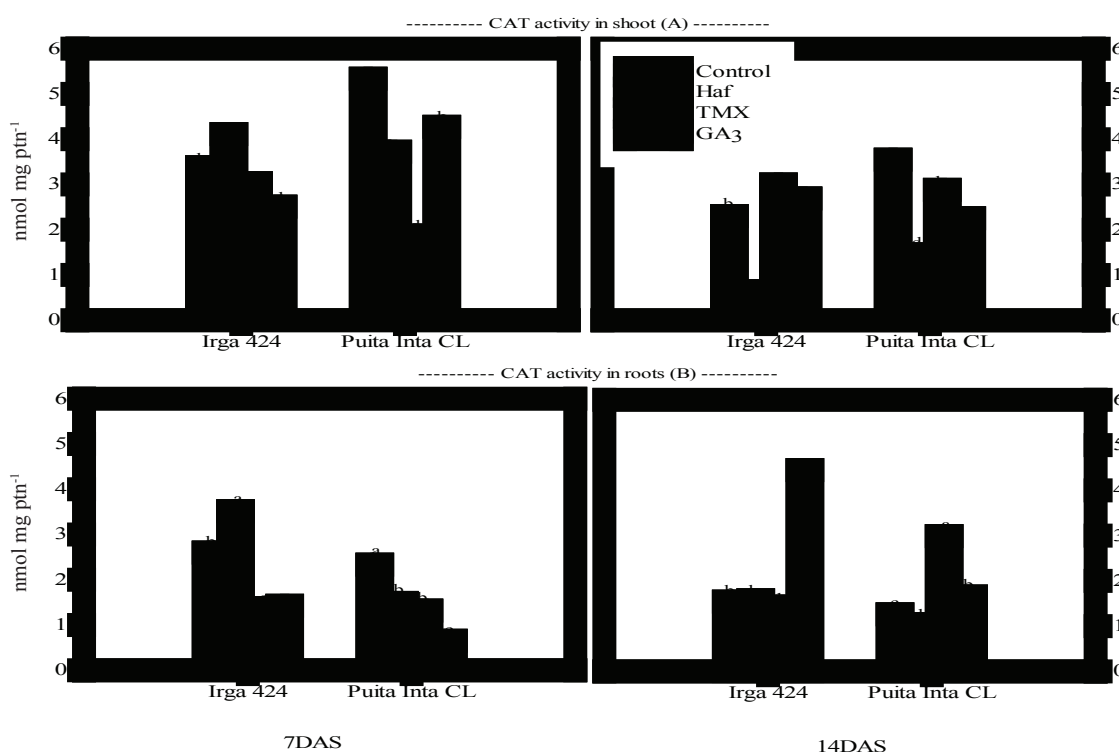


Figure 5. Catalase (CAT) activity in the shoots (A) and roots (B) of 'Irga 424' and 'Puita Inta CL' cultivars, before treatment with the products at low temperature (17 °C; 7 and 14 days after sowing - DAS), under stress conditions [control, phytohormone (Haf), thiamethoxam (TMX) and gibberellic acid (GA_3)]. Different letters indicate a significantly different mean between treatments ($p \leq 0.05$).

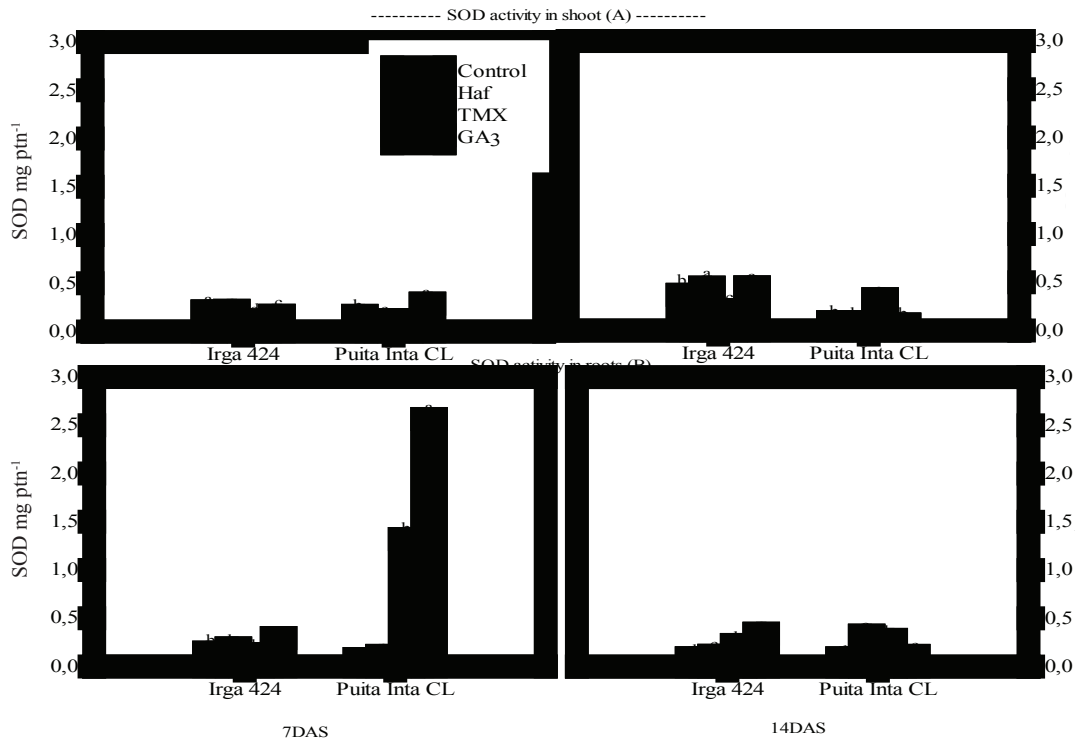


Figure 6. Superoxide dismutase (SOD) activity in the shoots (A) and roots (B) of 'Irga 424' and 'Puita Inta CL' cultivars, before treatment with the products at low temperature (17 °C; 7 and 14 days after sowing - DAS), under stress conditions [control, phytohormone (Haf), thiamethoxam (TMX) and gibberellic acid (GA_3)]. Different letters indicate a significantly different mean between treatments ($p \leq 0.05$).

There was an increase in the GA_3 activity in the root of 'Irga 424' (Figure 6B), while, for 'Puita Inta CL', all the products were effective at increasing SOD activity, with lower activity for the control treatment. This result is extremely important, because SOD is an enzyme in the first line of the plant defense, transforming the superoxide into H_2O_2 , while APX and CAT detoxify H_2O_2 . Thus, the H_2O_2 formed in response to temperature stress is rapidly converted into -OH, which is a less toxic product of ROS. Moreover, the lower presence of H_2O_2 in the treatments with the products demonstrated that they act predominantly on the activity of the SOD enzyme, decreasing H_2O_2 production and likely reducing the participation of CAT and APX enzymes.

CONCLUSIONS

1. Gibberellic acid, thiamethoxam and the phytohormone increase the final germination only in the 'Puita Inta CL' cold-tolerant cultivar.
2. Vigor is only influenced by gibberellic acid in 'Puita Inta CL'.

3. Gibberellic acid influences the shoot growth of seedlings, while the phytohormone and thiamethoxam affect the root system.
4. These products mitigate the effects of cold, thereby preventing the formation of ROS (H_2O_2) and lipid peroxidation in the shoot, and positively influencing SOD and CAT enzyme activity. This is primarily the case for 'Irga 424', which shows less activity in the root system of rice seedlings.

REFERENCES

- AEBI, H. Catalase *in vitro*. *Methods in Enzymology*, v. 105, n. 2, p. 121-126, 1984.
- ALMEIDA, A. S. et al. Bioativador no desempenho fisiológico de sementes de arroz. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 33, n. 3, p. 501-510, 2011.
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, v. 55, n. 1, p. 373-99, 2004.
- BRADFORD, M. M. A. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein

- utilizing the principle of protein dye binding. *Analytical Biochemistry*, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 1976.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para análise de sementes*. Brasília: DF: Ministério da Agricultura, 2009.
- CATANEO, A. C. et al. Improved germination of soybean seed treated with thiamethoxam under drought conditions. *Seed Science and Technology*, v. 38, n. 1, p. 248-251, 2010.
- CAVUSOGLU, K. Physiological, anatomical, biochemical, and cytogenetic effects of thiamethoxam treatment on *Allium cepa* (Amaryllidaceae) L. *Environmental Toxicology*, v. 27, n. 11, p. 635-543, 2011.
- CRUZ, R. P. da; DUARTE, I. T. L.; CABREIRA, C. Inheritance of rice cold tolerance at the seedling stage. *Science Agricola*, v. 67, n. 6, p. 669-674, 2010.
- DAI, C.; XUE, H. Rice early flowering1, a CKI, phosphorylates DELLA protein SLR1 to negatively regulate gibberellin signaling. *The EMBO Journal*, v. 29, n. 11, p. 1916-1927, 2010.
- EL-MOSHATY, F. I. B. et al. Lipid peroxidation and superoxide production in cowpea (*Vigna unguiculata*) leaves infected with tobacco ringspot virus or southern bean mosaic virus. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, v. 43, n. 1, p. 109-119, 1993.
- FORMAN, H. J.; MAIORINO, M.; URSINI, F. Signaling functions of reactive oxygen species. *Biochemistry*, v. 49, n. 5, p. 835-842, 2010.
- GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010.
- LAUXEN, L. R.; VILLELA, F. A.; SOARES, R. C. Desempenho fisiológico de sementes de algodoeiro tratadas com tiametoxam. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 32, n. 3, p. 61-68, 2010.
- LEE, H. et al. Mapping and characterization of quantitative trait loci for mesocotyl elongation in rice (*Oryza sativa* L.). *Rice*, v. 5, n. 13, p. 1-10, 2012.
- LORETO, F.; VELIKOVA, V. Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. *Plant Physiology*, v. 127, n. 4, p. 1781-1787, 2001.
- MAHAJAN, S.; TUTEJA, N. Cold, salinity and drought stresses: an overview. *Biochemistry and Biophysics*, v. 444, n. 2, p. 139-158, 2005.
- MARIOT, C. H. P. et al. Ensaio bioclimático de arroz irrigado nas regiões da Planície Costeira Externa e Fronteira Oeste do RS: safra 2008/09. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 6., 2009, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: Sosbai, 2009. 1 CD-ROM.
- McCORD, J. M.; FRIDOVICH, I. Superoxide dismutase: an enzymic function for erythrocuprein (hemocuprein). *Journal of Biological Chemistry*, v. 244, n. 22, p. 6049-6055, 1969.
- MERTZ, L. M. et al. Alterações fisiológicas em sementes de arroz expostas ao frio na fase de germinação. *Revista Brasileira de Sementes*, Londrina, v. 31, n. 2, p. 254-262, 2009.
- MORSY, M. R. et al. The OsLti6 genes encoding low molecular weight membrane proteins are differentially expressed in rice cultivars with contrasting sensitivity to low temperature. *Gene*, v. 80, n. 1, p. 344-171, 2005.
- MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, v. 59, n. 3, p. 651-81, 2008.
- PAN, Y.; WU, L. J.; YU, Z. L. Effect of salt and drought stress on antioxidant enzymes activities and SOD isoenzymes of liquorice (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch). *Plant Growth Regulation*, v. 49, n. 3, p. 157-165, 2006.
- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (Sosbai). Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. In: REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 30., 2004, Bento Gonçalves. *Anais...* Porto Alegre: Sosbai, 2014. p. 1-192.
- TAVARES, S. et al. Avaliação dos efeitos fisiológicos de tiametoxam no tratamento de sementes de soja. *Revista de Agricultura*, v. 82, n. 1, p. 47-54, 2007.
- YAMAGUCHI, S. Gibberellin metabolism and its regulation. *Annual Review of Plant Biology*, v. 59, n. 1, p. 225-251, 2008.
- YOSHIDA, S. *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños: International Rice Research Institute, 1981.
- ZHU, Z. et al. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus*, L.). *Plant Science*, v. 167, n. 2, p. 527-533, 2004.



SENSIBILIDADE DO CAPIM-CAPIVARA A HERBICIDAS¹

SILVA, K.S.², MACHADO, S.L.O.³, AVILA, L.A.⁴, MARCHESAN, E.⁵, ALVES, M.V.P.⁶ e
URBAN, L.J.K.⁷

RESUMO - Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação com o objetivo de identificar, através de curvas de dose-resposta, a sensibilidade de plantas jovens e perenizadas de capim-capivara a doses crescentes (0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 e 200% da dose recomendada para gramíneas perenes) de cyhalofop-butyl (315 g i.a. ha⁻¹), imazapic + imazapyr (24,5 g e.a. ha⁻¹ + 73,5 g e.a. ha⁻¹), glyphosate (2.160 g e.a. ha⁻¹) e amônio glufosinate (900 g i.a. ha⁻¹). O experimento 1 foi conduzido de janeiro a março de 2010, e o experimento 2, de janeiro de 2010 a janeiro de 2011. Plantas jovens apresentaram maior sensibilidade aos herbicidas amônio glufosinate e cyhalofop-butyl, entretanto, a morte das plantas ocorreu somente quando tratadas com glyphosate e a mistura formulada de imazapic + imazapyr. Em plantas perenizadas, os herbicidas não proporcionaram controle satisfatório.

Palavras-chave: arroz irrigado, controle químico,

ABSTRACT - Two experiments were conducted under greenhouse conditions to identify, based on dose-response curves, the sensitivity of young and perennial plants of West Indian Marsh grass to increasing doses (0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 and 200% of the recommended dose for perennial grasses) of cyhalofop butyl (315 g c.p. ha⁻¹), imazapic + imazapyr (24.5 g c.p. ha⁻¹ + 73.5 g c.p. ha⁻¹), glyphosate (2,160 g c.p. ha⁻¹) and ammonium glufosinate (900 g c.p. ha⁻¹). Experiment I was conducted from January to March 2010 and Experiment II, from January 2010 to January 2011. Young plants showed higher sensitivity to ammonium glufosinate and cyhalofop butyl; however, death occurred only when the plants were treated with glyphosate and a formulated mixture of Imazapic + Imazapyr. The herbicides did not provide satisfactory control against the perennial plants.

Keywords: flooded rice, chemical control,

INTRODUÇÃO

A cultura do arroz irrigado tem grande importância econômica e social para os Estados do Sul do Brasil. Seu cultivo normalmente ocorre em áreas de várzea ou próximo a corpos hídricos, em ambientes úmidos ou alagados que estão sujeitos, pela condição do relevo, à deposição de sedimentos férteis,

favorecendo, além da cultura, o crescimento de plantas daninhas. Essas espécies, além de competirem diretamente com o arroz por recursos como luz e nutrientes, infestam canais de irrigação e drenagem, dificultando o manejo da irrigação, assim como, ao serem colhidas juntamente com os grãos, são classificadas como impurezas, depreciando a qualidade final do produto.

¹ Recebido para publicação em 21.6.2011 e aprovado em 27.2.2012.

² Eng^a-Agr^a., Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, <keli_agro@yahoo.com.br>; ³ Eng^a-Agr^a., Dr., Professor Titular, Dep. de Defesa Fitossanitária, UFSM, Av. Roraima, 1000, 97105-900 Santa Maria-RS, Brasil, <slomachado@yahoo.com.br>; ⁴ Eng^a-Agr^a., Ph.D., Professor Adjunto, Dep. de Fitossanidade, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas – UFPel, <laavilabr@gmail.com>; ⁵ Eng^a-Agr^a., Dr., Professor Titular, Dep. de Fitotecnia, UFSM, <emarchezan@terra.com.br>; ⁶ Eng^a-Agr^a., Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, UFSM, <marcosvpalves@gmail.com>; ⁷ Aluno de Graduação do Curso de Agronomia, UFSM, <urban_686@hotmail.com>.



Entre essas espécies, *Hymenachne amplexicaulis*, conhecida como capim-capivara, capim-de-açúde ou grama-de-lagoa, forma densas infestações, vegetando áreas úmidas, cursos de água e canais de irrigação e drenagem. Embora seja uma gramínea C_3 , seu crescimento é agressivo, sendo considerada planta daninha problemática de áreas alagadas em diversos países onde foi introduzida, como nos EUA e na Austrália (Csurhes et al., 1999), onde é considerada planta daninha de significância nacional. No Brasil, é relatada como forrageira nas regiões da Amazônia e Pantanal (Dias-Filho, 2005), como infestante de reservatórios de água para a geração de eletricidade no Rio de Janeiro (Martins et al., 2003) e como planta daninha de áreas cultivadas com arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Andres & Machado, 2004; Amilibia et al., 2007).

O eficiente metabolismo do nitrogênio, promovendo o crescimento vigoroso de novas folhas e perfilhos (Anten et al., 1998), aliado à boa produção de sementes e estolões (Jiménes & Escobar, 1977; Medina & Motta, 1990), e o grande acúmulo de reservas em seus rizomas explicam o aumento significativo da população dessa planta daninha em áreas úmidas das Américas Central e do Sul, Estados Unidos, México, Austrália, Nova Zelândia e alguns países do continente africano. Em Queensland e Northern Territory, na Austrália, onde foi introduzida como forrageira, a proliferação dessa planta daninha está associada a graves danos ecológicos, como a extinção de espécies de pássaros e plantas, à contaminação ambiental pelos herbicidas utilizados em seu controle e a prejuízos econômicos, como obstrução de leitos navegáveis e infestação de culturas como cana-de-açúcar, com custos substanciais relacionados ao seu controle (Kinnear et al., 2008).

De acordo com Capitanio et al. (2003), a frequência dessa planta daninha nas lavouras de arroz irrigado tem aumentado nos últimos anos. Menezes & Ramirez (2003) relataram dados de produtores da região da Depressão Central do Rio Grande do Sul (RS), onde têm ocorrido infestações maciças de capim-capivara nos arrozais, principalmente junto às várzeas do rio Jacuí. Sua ocorrência também é relatada em lavouras de arroz e canais

de irrigação adjacentes, nos municípios de Formigueiro, Santa Maria e São Vicente do Sul, na mesma região (Sturza et al., 2011). *H. amplexicaulis* cresce rapidamente, impondo sombreamento à cultura; além disso, favorece o acamamento das plantas, pelo grande volume de material vegetal.

Nativa das Américas Central e do Sul, é uma planta perene, que se reproduz por sementes, fragmentos de rizomas e enraizamento dos nós caulinares basais (Csurhes et al., 1999). Práticas de manejo como a manutenção do solo inundado no período de entressafra, redução das operações de preparo, ou preparo com solo úmido, e utilização de herbicidas com baixa eficiência para plantas daninhas perenes têm favorecido o aumento e a dispersão de plantas de capim-capivara pelas várzeas gaúchas. Apresenta ainda elevada capacidade de alongar rapidamente as hastes e formar raízes adventícias quando em áreas alagadas, além de possuir aerênquimas nos tecidos das hastes, folhas e raízes (Kibbler & Bahnisch, 1999).

Para determinar a eficiência de herbicidas, parâmetros como mortalidade de plantas, redução da biomassa e rebrotamento têm sido utilizados por pesquisadores na Austrália. Em estudos preliminares, os herbicidas haloxyfop-methyl, fluazifop-p-buthyl, imazapyr, hexazinone e glyphosate têm-se destacado (Charleston, 2006), porém com informações vagas e divergentes quanto ao controle, devido principalmente a diferenças no estágio de desenvolvimento, ambiente (aquático ou terrestre), proporções do dossel no momento da aplicação, além de a maioria das informações estar direcionada para áreas não agrícolas.

Devido a essas características, estratégias eficazes para o controle de *H. amplexicaulis* são limitadas e a sua localização, em áreas sujeitas à deposição de nutrientes, agrava as dificuldades de controle, por favorecer o crescimento vegetativo e acúmulo de reservas pelas plantas. No Brasil, não há herbicidas registrados para o controle dessa planta daninha (Brasil, 2012), e os dados encontrados na literatura, além de escassos e restritos a poucos herbicidas, divergem quanto às doses e ao controle obtido.

Assim, estudos são necessários a fim de determinar a eficiência de herbicidas, em diversas doses, no controle de capim-capivara em diferentes estádios de desenvolvimento situação comumente constatada em campo. Este trabalho teve por objetivo identificar, através de curvas de dose-resposta, a sensibilidade de plantas jovens e perenizadas de *H. amplexicaulis* a diferentes doses de herbicidas, quantificada pelos percentuais de controle e redução da biomassa seca.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação. O experimento 1 foi conduzido de janeiro a março de 2010, utilizando vasos de polietileno de 2 L de capacidade, e o experimento 2, de janeiro de 2010 a janeiro de 2011, usando vasos de 15 L de capacidade, ambos em delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. Para ambos os ensaios, as mudas de capim-capivara, provenientes do enraizamento de nós caulinares basais, foram coletadas em infestações estabelecidas em lavoura de arroz irrigado, no município de Formigueiro, RS.

Os vasos foram preenchidos com solo, previamente peneirado e adubado conforme as recomendações de adubação para a cultura do arroz irrigado (Reunião..., 2010). O solo, um Planossolo Hidromórfico eutrófico arênico, de textura média, foi coletado em área de várzea, na profundidade de 0-10 cm. A análise

química do solo determinou $pH_{\text{água}(1:1)} = 4,7$; $P = 9,3 \text{ mg dm}^{-3}$; $K = 56 \text{ mg dm}^{-3}$; argila = 19%; $MO = 1,4\%$; $Ca = 2,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $Mg = 0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; e $Al = 0,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

No experimento 1, a aplicação dos herbicidas (Tabela 1) foi feita em 6 de março de 2010, quando as plantas se encontravam em pleno desenvolvimento vegetativo, com o colmo principal apresentando de três a quatro folhas desenvolvidas e, em média, três perfilhos pequenos por planta, utilizando-se um pulverizador costal pressurizado a CO_2 , equipado com pontas do tipo leque (110015), com volume de calda equivalente a 167 L ha^{-1} . A temperatura média no momento da aplicação foi de $22,8^\circ\text{C}$, e a umidade relativa média do ar, de 62,5%. Após 24 horas, os vasos foram irrigados, sendo mantidos com lâmina de água até o término do experimento, aos 21 dias após a aplicação (DAA) dos herbicidas.

No experimento 2, três plantas de *H. amplexicaulis* foram transplantadas em cada vaso, sendo realizadas duas adubações: a primeira, no preparo do solo, previamente ao transplante, e a segunda, em outubro de 2010, no início da nova estação de crescimento. Nesse ensaio, devido à restrição de espaço, os tratamentos foram compostos apenas por glyphosate e pela mistura formulada de imazapic e imazapyr. A pulverização foi realizada em 16 de dezembro de 2010, quando as plantas perenizadas, com estolões e estruturas de reservas (rizomas) bem desenvolvidos,

Tabela 1 - Tratamentos utilizados nos experimentos 1 e 2, para controle de plantas jovens e perenizadas de *Hymenachne amplexicaulis*. Santa Maria-RS, 2010

Herbicida	Dose aplicada								
	0	25 ^{5/}	50	75	100	125	150	175	200
Experimento 1 - Plantas jovens									
Cyhalofop-butyl ^{1/}	0	0,44 ^{6/}	0,88	1,31	1,75	2,19	2,62	3,06	3,50
Imazapic + imazapyr ^{2/}	0	35,00 ^{7/}	70,00	105,00	140,00	175,00	210,00	245,00	280,00
Glyphosate ^{3/}	0	1,12	2,25	3,38	4,50	5,62	6,75	7,88	9,00
Amônio glufosinate ^{4/}	0	1,12	2,25	3,38	4,50	5,62	6,75	7,88	9,00
Experimento 2 - Plantas perenizadas									
Imazapic + imazapyr	0	35,00	70,00	105,00	140,00	175,00	210,00	245,00	280,00
Glyphosate	0	1,12	2,25	3,38	4,5	5,62	6,75	7,88	9,00

^{1/} 180 g i.a. L⁻¹. ^{2/} 175 g e.a. kg⁻¹ + 525 g e.a. kg⁻¹. ^{3/} 480 g e.a. L⁻¹. ^{4/} 200 g i.a. L⁻¹. ^{5/} Percentual da dose-referência recomendada para o controle de gramíneas perenes. ^{6/} Cyhalofop-butyl, glyphosate e amônio glufosinate – doses expressas em L p.c. ha⁻¹. ^{7/} Imazapic + imazapyr – doses expressas em g p.c. ha⁻¹.



apresentavam novos perfilhos, com três a quatro folhas.

Utilizou-se o mesmo pulverizador, com volume de calda equivalente a 200 L ha⁻¹, devido à grande quantidade de material vegetal por pote. A temperatura média no momento da aplicação foi de 25,3 °C, e a umidade relativa média do ar, de 68,9%. As plantas, irrigadas 24 horas após o tratamento, foram conduzidas sob irrigação, com lâmina d'água até os 35 DAA. Os vasos, em ambos os experimentos, tiveram sua localização alterada de forma aleatória a cada sete dias.

As avaliações de controle, efetuadas por dois avaliadores independentes, foram realizadas aos 7, 14 e 21 DAA (experimento 1), quando houve 100% de controle para alguns tratamentos, e aos 7, 14, 21, 28 e 35 DAA (experimento 2). O efeito dos herbicidas sobre as plantas foi determinado por avaliações visuais, com base em escala percentual, em que 0 equivaleu à ausência de injúrias e 100%, à morte das plantas (Frans & Crowley, 1986).

Ao final das avaliações de controle, realizou-se a coleta das plantas, para determinação da biomassa verde e, após a secagem em estufa a 70 °C, da biomassa seca; entretanto, foram utilizados somente os dados da variável biomassa seca, pois a biomassa verde apresentou

grande variabilidade. Os resultados de biomassa da matéria seca da parte aérea foram transformados em porcentagem da testemunha. Os dados foram analisados quanto à homocedasticidade e à normalidade e submetidos à análise de variância. Para avaliação dos efeitos de dose, foram realizadas análises de regressão, utilizando o modelo log-logístico proposto por Seefeldt et al. (1995), sendo os valores estimados para o C₅₀ e BS₅₀ expressos em porcentagem das doses utilizadas como referência, para fins de comparação entre os herbicidas utilizados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Experimento 1 - Plantas jovens

As plantas de *Hymenachne amplexicaulis* manifestaram distinta sensibilidade aos herbicidas utilizados, porém apresentaram maiores percentuais de controle e redução da biomassa seca com o aumento das doses (Figura 1). Quando comparados os tratamentos, os herbicidas amônio glufosinate e cyhalofop-butyl promoveram maiores percentuais de controle e redução da biomassa seca em menores doses do que o glyphosate e a mistura formulada de imazapic e imazapyr. Entretanto, no intervalo de doses testado, somente os dois últimos causaram a morte das plantas.

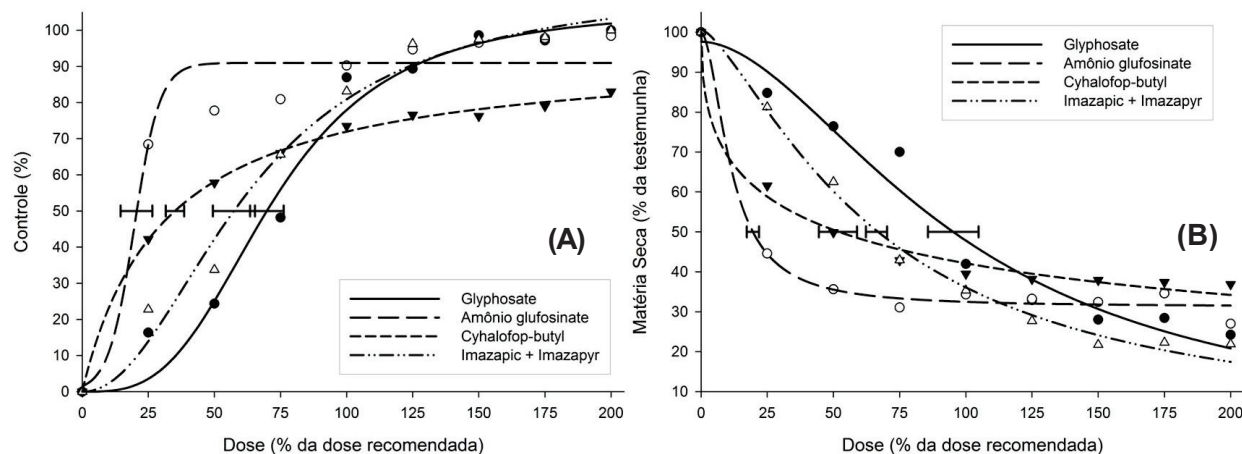


Figura 1 - Percentual de controle (A) e redução da biomassa seca (B) de plantas jovens de *Hymenachne amplexicaulis*, aos 21 DAA, por diferentes doses dos herbicidas glyphosate (480 g e.a. L⁻¹), amônio glufosinate (200 g i.a. L⁻¹), cyhalofop-butyl (180 g i.a. L⁻¹) e da mistura formulada de imazapic (175 g i.a. kg⁻¹) e imazapyr (525 g i.a. kg⁻¹). Santa Maria-RS, 2010. Barras de erro correspondem ao intervalo de confiança em 95% de probabilidade de erro da dose que causa 50% de controle (C₅₀) e de redução da biomassa seca (BS₅₀). Santa Maria-RS, 2010.

Os resultados de controle proporcionados pelo cyhalofop-butyl foram superiores aos relatados por Capitão et al. (2003), em ensaio conduzido em campo, com infestação preestabelecida, em que 1,5 L p.c. ha⁻¹ proporcionou controle de 62%, aos 15 DAA. Entretanto, aos 30 e 45 DAA, houve gradual recuperação das plantas, reduzindo os percentuais de controle para 54 e 52,5%, respectivamente. Ao avaliar o controle decorrente da aplicação desse herbicida em infestação estabelecida após o preparo do solo, Menezes & Ramirez (2003) relataram, para doses de 0,5; 0,75; 1,0; e 1,25 L p.c. ha⁻¹, controle de 90, 98, 98 e 100%, respectivamente, aos 30 DAA.

A divergência entre os resultados de controle de capim-capivara pelo cyhalofop-butyl pode ser explicada, entre outras causas, pela diferente quantidade de reservas e estágio fenológico no momento da aplicação, entre os experimentos mencionados. O estágio juvenil, de três a quatro folhas, assim como a fragmentação das plantas para o transplante, o que também ocorre após sucessivas gradagens, nas operações de preparo do solo, tornam as plantas mais sensíveis ao herbicida, que atua nos pontos de crescimento. Segundo Jordan et al. (1997), quando a aplicação de herbicidas é feita com as plantas daninhas nos estádios de uma a três folhas (pós-inicial), a eficiência aumenta, proporcionando nível aceitável de controle.

As plantas manifestaram elevada sensibilidade ao amônio glufosinate, desenvolvendo severa necrose das folhas já aos 7 DAA, com maiores percentuais de controle em menores doses, com C₅₀ de apenas 20% (Tabela 2); contudo, nas doses utilizadas, ocorreu a morte dos perfilhos jovens e injúrias severas na planta-mãe (colmo principal), mas não houve morte total de plantas, com início do rebrotamento já aos 21 DAA, quando do encerramento do experimento. Essa sensibilidade ao glufosinato foi confirmada pelos percentuais de biomassa seca, com significativa redução da biomassa em doses baixas (BS₅₀ = 11%), bem abaixo da dose-referência, mas sem resposta com o aumento da quantidade de herbicida.

O amônio glufosinate provoca o acúmulo de amônia nas plantas tratadas, devido à inibição da ação da enzima glutamina sintetase, a qual é responsável pela conversão de

glutamato mais a amônia em glutamina (Wendler et al., 1992), causando lesões foliares, como amarelecimento e necrose, e provocando a morte em até duas semanas. Por não translocar nas plantas, sua ação está limitada aos locais de contato com o tecido vegetal, exigindo maior qualidade da aplicação; em *H. amplexicaulis*, sua ação restrita pode ser atribuída à rápida recuperação das plantas.

Apesar de herbicidas com comportamentos diferentes – o glyphosate – de ação total, e a mistura formulada de imazapic e imazapyr, seletiva para cultivares de arroz irrigado portadores da tecnologia Clearfield® –, as plantas jovens de *H. amplexicaulis* apresentaram similar sensibilidade aos ativos, que causaram a morte das plantas, com 176 e 171% das doses-referência utilizadas para esses produtos, respectivamente (Tabela 3). Todos os herbicidas reduziram a biomassa seca das plantas em relação à testemunha; o glyphosate e o imazapic + imazapyr ocasionaram os maiores percentuais de redução.

O glyphosate transloca-se no floema seguindo a rota dos produtos da fotossíntese, das folhas fotossinteticamente ativas, em direção às partes em crescimento, para manutenção do metabolismo e/ou formação de produtos de reserva (Hetherington et al., 1998); assim, o estágio fenológico das plantas, pleno desenvolvimento vegetativo e início da formação de rizomas, teria favorecido o controle por esse herbicida.

Experimento 2 - Plantas perenizadas

Os herbicidas glyphosate e a mistura formulada de imazapic + imazapyr, por apresentarem maior controle das plantas jovens, foram reavaliados em plantas de capim-capivara cultivadas por aproximadamente um ano. Dentro do intervalo de doses testado, somente o glyphosate proporcionou percentuais de controle de 50% (Figura 2), com C₅₀ = 192 %, porém com BS₅₀ de 218% da dose-referência, com sintomas evoluindo de clorose, nas avaliações iniciais, até necrose, aos 35 DAA, mas com rebrotamento das plantas. Na Austrália, Charleston (2006) relata a utilização de até 5.040 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate (14 L p.c. ha⁻¹) ou 386 g i.a. ha⁻¹ de haloxyfop-methyl (0,77 L p.c. ha⁻¹) para



Tabela 2 - Parâmetros estimados para as equações de resposta de plantas jovens de *Hymenachne amplexicaulis* às doses dos herbicidas cyhalofop-butyl (180 g i.a. L⁻¹), imazapic (175 g e.a. kg⁻¹) + imazapyr (525 g e.a. kg⁻¹), glyphosate (480 g e.a. L⁻¹) e amônio glufosinate (200 g i.a. L⁻¹). Santa Maria-RS, 2010

Herbicida	y ₀	a	b	x ₀	R ²	P	Equação
Parâmetros estimados para controle							
Cyhalofop-butyl	-	94,5196	-0,9960	31,2223 ^{2/}	0,9974	0,0001	Log ^{3/}
		(5,2423) ^{1/}	(0,1360)	(3,4855)			
Imazapic + Imazapyr	-	112,8304	-2,0854	64,0264	0,9765	0,0001	Log
		(10,1511)	(0,4469)	(7,9381)			
Glyphosate	-	105,9784	-3,1637	72,3828	0,9666	0,0001	Log
		(8,2681)	(0,8037)	(6,3613)			
Amônio glufosinate	-	90,9813	4,8301	19,7108	0,9279	0,0002	Sig ^{4/}
		(3,1714)	(5,2462)	(6,0226)			
Parâmetros estimados para biomassa seca							
Cyhalofop-butyl	-	100,1585	0,4856	51,6940 ^{5/}	0,9865	0,0001	Log
		(2,3955)	(0,0549)	(7,2004)			
Imazapic + Imazapyr	-	100,6326	1,4128	66,2532	0,9905	0,0001	Log
		(2,7217)	(0,0966)	(3,9889)			
Glyphosate	-	97,6300	1,8233	97,8329	0,9561	0,0001	Log
		(5,3162)	(0,2966)	(9,5532)			
Amônio glufosinate	31,2122	68,7894	1,8421	11,5251	0,9843	0,0001	Log ^{6/}
	(2,3207)	(3,6496)	(1,2624)	(5,9950)			

^{1/} Valores entre parênteses correspondem ao erro-padrão do parâmetro.

^{2/} Dose do herbicida (percentual da dose usada como referência) que causa 50% de controle (C₅₀) em plantas de *H. amplexicaulis*.

^{3/} Equação logística de três parâmetros
$$y = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0} \right)^b}$$

^{4/} Equação sigmoidal de três parâmetros
$$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b} \right)}}$$

^{5/} Dose do herbicida (percentual da dose usada como referência) que causa 50% de redução de massa da biomassa seca (BS₅₀) da parte

aérea de plantas de *H. amplexicaulis*
$$y = y_0 + \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0} \right)^b}$$

^{6/} Equação logística de quatro parâmetros.

controle de *H. amplexicaulis* em áreas não agrícolas.

A mistura de imazapic e imazapyr, mesmo na dose de 200%, causou leves injúrias nas folhas e colmos, com sintomas como clorose, que evoluiu para nervuras arroxeadas, e

Tabela 3 - Doses de cyhalofop-butyl, imazapic + imazapyr, glyphosate e amônio glufosinate necessárias para os respectivos controles, calculadas por meio do modelo logístico ajustado para os dados das curvas de dose-resposta de plantas jovens de *Hymenachne amplexicaulis*. Santa Maria-RS, 2011

Herbicida	Dose-referência ^{1/}	C ₅₀ ^{2/}	C ₁₀₀ ^{3/}
	(L p.c. ha ⁻¹ ou g p.c. ha ⁻¹)		
Cyhalofop-butyl	1,75	0,61	^{4/}
Imazapic + Imazapyr	140,00	49,10	240,0
Glyphosate	4,50	3,14	7,9
Amônio glufosinate	4,50	0,89	-

^{1/} Correspondente à dose de 100%. ^{2/} Dose que proporcionou 50% de controle. ^{3/} Dose a partir da qual ocorreu morte das plantas.

^{4/} Nas doses testadas, não ocasionou morte das plantas.

necrose, principalmente do ápice foliar, porém sem causar a morte das plantas. Os valores do C₅₀ e do BS₅₀, 310 e 351% (Tabela 4), respectivamente superiores aos encontrados para o glyphosate, evidenciam a menor

sensibilidade das plantas perenizadas de capim-capivara ao herbicida, contudo, a ausência de controle pode estar limitada às doses utilizadas no experimento, para ambos os herbicidas.

A maior redução da biomassa seca das plantas de capim-capivara tratadas com glyphosate, no período avaliado, pode ser explicada pela maior velocidade de controle desse herbicida, se comparado à mistura formulada utilizada, pois ele interrompe o ciclo do carbono no cloroplasto, causando redução na síntese de carboidratos e diminuindo o transporte destes para os drenos (Satchivi et al., 2000). Segundo Taiz & Zeiger (2004), o glyphosate se movimenta muito rápido pela planta, e esse movimento está associado às velocidades de transporte de açúcares no floema, que são elevadas. Em contrapartida, ao avaliar o controle de *Brachiaria subquadriflora* e *B. mutica*, Carbonari et al. (2003) constataram que o controle proporcionado pelo imazapyr é bastante lento, porém sempre crescente.

De acordo com Charleston (2006), na Austrália, o glyphosate é o principal herbicida usado no controle químico de *H. amplexicaulis*, porém sua eficiência pode ser variável – e em alguns casos, de apenas 50%; assim, as infestações são monitoradas e novamente tratadas a cada três meses. Segundo Diaz et al. (2003), pesquisas conduzidas na Universidade da Flórida mostraram que 4.260 g e.a. ha⁻¹ de

glyphosate ou 1.121 g i.a. ha⁻¹ de imazapyr promoveram controle superior a 90%, três meses após o tratamento. Ainda segundo esses autores, quando tratadas com glyphosate, verifica-se rebrotamento das plantas, ao passo que o controle proporcionado por imazapyr é mais duradouro, podendo chegar a um ano ou mais, conforme condições ambientais (Ismail & Ahmad, 1994).

Os resultados comprovam a necessidade de doses maiores do que o normalmente recomendado para gramíneas perenes, para controle satisfatório do capim-capivara, e permitem concluir que plantas de *H. amplexicaulis* em estádios juvenis de desenvolvimento são sensíveis aos herbicidas testados. Entretanto, nas doses avaliadas, somente o glyphosate e a mistura formulada de imazapic e imazapyr causam a morte das plantas. Em plantas perenizadas, as doses testadas desses herbicidas não proporcionam controle satisfatório, evidenciando a dificuldade de controle dessa planta daninha quando em estádios avançados de desenvolvimento.

Sumarizando os resultados deste estudo, a utilização de doses acima das recomendadas a fim de proporcionar maiores percentuais de controle não se justifica. Assim, a integração de práticas de manejo que desfavoreçam o estabelecimento de plantas de capim-capivara – como drenagem do solo na entressafra, preparo com solo seco, controle em estádios

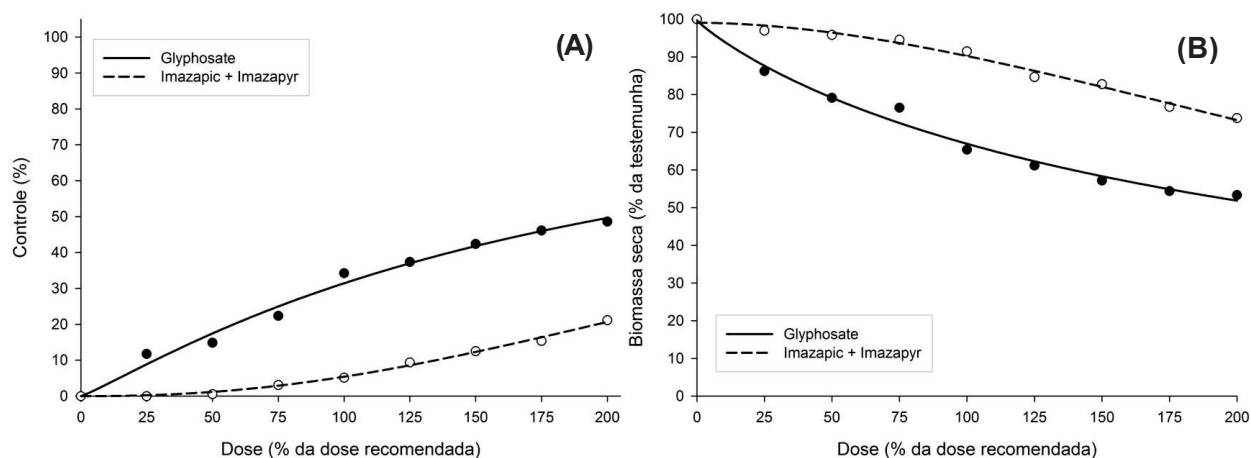


Figura 2 - Percentual de controle (A) e redução da biomassa (B) de plantas perenizadas de *Hymenachne amplexicaulis* por diferentes doses dos herbicidas imazapic (175 g e.a. kg⁻¹) + imazapyr (525 g e.a. kg⁻¹) e glyphosate (480 g e.a. L⁻¹), aos 35 DAA. Santa Maria-RS, 2011.

Tabela 4 - Parâmetros estimados para as equações de resposta de plantas cultivadas de *Hymenachne amplexicaulis* às doses dos herbicidas imazapic (175 g e.a. kg⁻¹) + imazapyr (525 g e.a. kg⁻¹) e glyphosate (480 g e.a. L⁻¹). Santa Maria-RS, 2011

Herbicida	a	b	x ₀	R ²	P	Equação
Parâmetros estimados para controle						
Imazapic + Imazapyr	77,2029	-2,2808	310,9012 ^{2/}	0,9934	<0,0001	Log ^{3/}
	(31,8314) ^{1/}	(0,1830)	(86,0718)			
Glyphosate	97,0857	-1,1268	192,2585	0,9854	0,0001	Log
	(21,5083)	(0,1312)	(72,9568)			
Parâmetros estimados para biomassa seca						
Imazapic + Imazapyr	99,0204	1,8487	351,5283 ^{4/}	0,9815	<0,0001	Log
	(0,9423)	(0,2105)	(26,3432)			
Glyphosate	99,7084	0,9148	218,3986	0,9832	<0,0001	Log
	(2,0325)	(0,0858)	(15,0396)			

^{1/} Valores entre parênteses correspondem ao erro-padrão do parâmetro. ^{2/} Dose do herbicida (% da dose-referência) que causa 50% de

controle (C50) em plantas de *H. amplexicaulis*. ^{3/} Equação logística de três parâmetros $y = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b}$. ^{4/} Dose do herbicida (% da dose-

referência) que causa 50% de redução de massa da biomassa seca (BS₅₀) da parte aérea de plantas de *H. amplexicaulis*.

juvenis, aplicações sequenciais de herbicidas e inibição da produção de sementes – pode auxiliar na redução da infestação por essa planta daninha.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor.

LITERATURA CITADA

AMILIBIA, E.P., et al. **Controle químico da grama-boiadeira na cultura do arroz irrigado**. 2007. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20070919130022.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2010.

ANDRES, A.; MACHADO, S. L. O. Plantas daninhas em arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. (Eds.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 457-546.

ANTEN, N. P. R. et al. Nitrogen distribution and leaf area indices in relation to photosynthetic nitrogen use efficiency in savanna grasses. **Plant Ecology**, v. 138, n. 1, p. 63-75, 1998.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **AGROFIT: Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários**. Brasília: 2010. Disponível em: <http://extranet.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons>. Acesso em: 18 fev. 2012.

CAPITÂNIO, J. et al. Eficiência agrônômica de herbicidas aplicados em pós-emergência, no controle de capim-capivara (*Hymenachne amplexicaulis*) sobre taipas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 3.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 25., 2003. Balneário Camboriú, SC. **Anais...** Itajaí: Epagri, 2003. p. 706-708.

CARBONARI, C. A. et al. Controle de *Brachiaria subquadripata* e *Brachiaria mutica* através de diferentes herbicidas aplicados em pós-emergência. **Planta Daninha**, v. 21, p. 79-84, 2003. Número Especial

CHARLESTON, K. **Hymenachne (*Hymenachne amplexicaulis*) management. Control methods and case studies**. 2006. Disponível em: <<http://resourceeconomics.cqu.edu.au/FCWViewer/getFile.do?id=7443>>. Acesso em: 18 mar. 2010.

CSURHES S. M. et al. **Hymenachne (*Hymenachne amplexicaulis*) in Queensland**. Pest Status Review Series. Land Protection Dept. of Nat. Resour. Queensland, Australia, 43 p. 1999. Disponível em: <www.nrm.qld.gov.au/pests/psas/pdfs/Hymenachne.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2010.

DIAS-FILHO, M. B. Opções forrageiras para áreas sujeitas a inundação ou alagamento temporário. In: PEDREIRA, C. G. S. et al. (Ed.). **SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGEM**, 22., 2005, Piracicaba. **Teoria e prática da produção animal em pastagens**. Piracicaba: FEALQ, 2005. p. 71-93.

DIAZ, R. et al. **Exotics in the Wetlands: West Indian marsh grass**. 2003. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/IN/IN49100.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2010.

- FRANS, R.; CROWLEY, H. Experimental design and techniques for measuring and analyzing plant responses to weed control practices. In: SOUTHERN WEED SCIENCE SOCIETY. **Research Methods in Weed Science**. 3.ed. Champaign: 1986. p. 29-45.
- HETHERINGTON, P. et al. The absorption, translocation and distribution of the herbicide glyphosate in maize expressing the CP-4 transgene. **J. Exper. Bot.**, v. 50, n. 339, p. 1567-1576, 1998.
- ISMAIL, B. S.; AHMAD, A. R. Attenuation of the herbicidal activities of glufosinate-ammonium and imazapyr in two soils. **Agric. Ecosyst. Environ.**, v. 47, n. 4, p. 279-285, 1994.
- JIMÉNEZ E. G.; ESCOBAR, A. Flood adaptations and productivity of Savanna grasses. In: INTERNATIONAL GRASSLANDS CONGRESS, 13., 1977, Leipzig, German Democratic Republic. **Anais...** Leipzig: 1977. p. 3-5.
- JORDAN, D. L. et al. Comparison of graminicides applied at equivalent costs in soybean (*Glycine max*). **Weed Technol.**, v. 11, n. 4, p. 804-809, 1997.
- KIBBLER, H.; BAHNISCH, L. M. Physiological adaptations of *Hymenachne amplexicaulis* to flooding. **Austr. J. Agric. Res.**, v. 39, n. 5, p. 429-435, 1999.
- KINNEAR, S. et al. **Ecological, economic and social considerations of spray control for Hymenachne**. Technical Summary, 11 p. 2008. Disponível em: <<http://lwa.gov.au/node/2589>>. Acesso em: 12 fev. 2010.
- MARTINS, D. et al. Ocorrência de plantas aquáticas nos reservatórios da Light - RJ. **Planta Daninha**, v. 21, p. 105-108, 2003. Número Especial.
- MEDINA, E.; MOTTA, N. Metabolism and distribution of grasses in tropical flooded savannas in Venezuela. **J. Trop. Ecol.**, v. 6, n. 1, p. 77-89, 1990.
- MENEZES, V. G.; RAMIREZ, H. B. Controle de capim-arroz (*Echinochloa crusgalli*) e capim-capivara (*Hymenachne amplexicaulis*) com o herbicida Clincher em arroz no sistema de cultivo pré-germinado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ARROZ IRRIGADO, 3., REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 25., 2003, Balneário Camboriú, SC. **Anais...** Itajaí: EPAGRI, 2003. p. 507-509.
- SATICHIVI, N. et al. Absorption and translocation of glyphosate isopropylamine and trimethylsulfonium salts in *Abutilon theophrasti* and *Setaria faberi*. **Weed Sci.**, v. 48, n. 6, p. 675-679, 2000.
- SEEFELDT, S. S. et al. Loglogistic analysis of herbicide dose-response relationship. **Weed Technol.**, v. 9, n. 2, p. 218-227, 1995.
- REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 28., 2010: Bento Gonçalves, RS. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil/Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado**. Porto Alegre: SOSBAI, 2010. 188 p.
- STURZA, V. S. et al. Qualidade forrageira do capim-capivara em áreas de várzea, na região central do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ci. Rural**, v. 41, n. 5, p. 883-887, 2011.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. São Paulo: Artmed, 2002. 719 p.
- WENDLER, C. A. et al. Effect of glufosinate (phosphinothricin) and inhibitors of photorespiration on photosynthesis and ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase activity. **J. Plant Physiol.**, v. 139, n. 2, p. 666-671, 1992.