

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

**ALTERAÇÕES DA SOLUÇÃO DO SOLO E RESPOSTA DO
ARROZ IRRIGADO AO MANEJO DA IRRIGAÇÃO E DA
ADUBAÇÃO NITROGENADA**

José Bernardo Moraes Borin
(Dissertação de Mestrado)

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

**ALTERAÇÕES DA SOLUÇÃO DO SOLO E RESPOSTA DO ARROZ
IRRIGADO AO MANEJO DA IRRIGAÇÃO E DA ADUBAÇÃO
NITROGENADA**

JOSÉ BERNARDO MORAES BORIN

Engenheiro Agrônomo (PUCRS)

Dissertação apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Março de 2014

CIP - Catalogação na Publicação

Moraes Borin, José Bernardo
ALTERAÇÕES DA SOLUÇÃO DO SOLO E RESPOSTA DO ARROZ
IRRIGADO AO MANEJO DA IRRIGAÇÃO E DA ADUBAÇÃO
NITROGENADA / José Bernardo Moraes Borin. -- 2014.
93 f.

Orientador: Ibanor Anghinoni.
Coorientador: Felipe de Campos Carmona.

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

1. Oryza sativa. 2. parcelamento de nitrogênio.
3. irrigação intermitente. I. Anghinoni, Ibanor,
orient. II. de Campos Carmona, Felipe, coorient.
III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

JOSÉ BERNARDO MORAES BORIN
Engenheiro Agrônomo (PUCRS)

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de
MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

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

Aprovada em: ___/___/___
Pela Banca Examinadora

Homogado em: ___/___/___
por

IBANOR ANGHINONI
Orientador-Departamento de Solos /UFRGS

ALBERTO V. INDA JUNIOR
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo

FELIPE DE CAMPOS CARMONA
Co-Orientador - Instituto Rio Grandense do
Arroz

CARLOS ALBERTO BISSANI
Departamento de Solos/UFRGS

CHRISTIAN BREDEMEIER
Departamento de Plantas de Lavoura /
UFRGS

TIAGO ZSCHORNACK
Instituto Rio Grandense do Arroz

PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade de Agronomia

*Dedico este trabalho,
fruto de mais uma etapa de
minha vida, aos meus pais:*

Marilaine e Alfredo

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Agronomia da UFRGS pela estrutura e ensino de qualidade fornecidos.

Ao PPG Ciência do Solo da UFRGS pela oportunidade da realização deste curso, com professores e infraestrutura adequados para o crescimento do conhecimento.

À CAPES e ao Cnpq pelo incentivo com a concessão da bolsa de mestrado.

Ao IRGA pela estrutura física e de pessoal para realização e condução do experimento.

Ao Professor Ibanor Anghinoni pela orientação, transmissão de conhecimento e apoio ilimitado.

Ao Pesquisador Felipe Carmona pela co-orientação, transmissão de conhecimento e fornecimento de toda estrutura adequada para a realização do trabalho.

Aos Pesquisadores Gustavo Hernandez e Sintia Trojan pelo apoio, orientação, incentivo e transmissão do conhecimento, desde a Graduação.

Ao Adão pela amizade e ensinamentos tanto laboratoriais quanto da vida.

Aos amigos Fernando e Thiagão pelo companheirismo, parceria, trabalho em equipe e troca de conhecimentos, dentro e fora da faculdade.

À Amanda pelo acolhimento e amizade desde a minha chegada. Além da co-orientação altruística e dos ensinamentos ao longo desta fase.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Química e Fertilidade do Solo: Sérgio, Joice, Tiago, João pela troca de conhecimentos, boa convivência e amizade.

Aos demais colegas e amigos do PPG Ciência do Solo pela convivência saudável, proporcionando um ambiente propício de estudo, amizade e troca de informações.

Aos bolsistas de iniciação científica Isadora, Joaquim, Luiz Antônio, Gabriela, Rodrigo, Diego, Álvaro, Fabrício, Manuela, João, Dânia, Julia, L. Gustavo, pela dedicação, prontidão e amizade.

Ao meu irmão José pela amizade e companhia distante de casa.

À Martha, minha namorada, pelo amor e compartilhamento de mais uma experiência vivida.

Aos meus pais Marilaine e Alfredo pelo amor e incentivo incondicional para o meu desenvolvimento e crescimento pessoal e intelectual.

ALTERAÇÕES DA SOLUÇÃO DO SOLO E RESPOSTA DO ARROZ IRRIGADO AO MANEJO DA IRRIGAÇÃO E DA ADUBAÇÃO NITROGENADA¹

Autor: José Bernardo Moraes Borin
Orientador: Prof. Ibanor Anghinoni
Co-orientador: Felipe de Campos Carmona

RESUMO

Extensas áreas de produção de arroz irrigado podem ser afetadas pela escassez de água durante o ciclo da cultura, dependendo das precipitações pluviais e do gerenciamento dos mananciais hídricos pelo produtor. A irrigação intermitente é uma alternativa para a otimização do uso da água pela lavoura. Entretanto, esse manejo altera a dinâmica e disponibilidade de nutrientes na solução do solo, podendo afetar também a cultura. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eletroquímica e a dinâmica de nutrientes na solução do solo, assim como a resposta do arroz ao parcelamento da adubação nitrogenada, em diferentes sistemas de irrigação. O experimento foi conduzido no campo, no ano agrícola de 2012/13, em um Gleissolo, na Estação Experimental do Arroz (EEA) do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), em Cachoeirinha/RS. Os tratamentos testados foram: irrigação contínua e irrigação intermitente com uma e duas supressões no estágio vegetativo. Nas subparcelas, o manejo de aplicação de N constou de 0 kg ha⁻¹ e 150 kg ha⁻¹ em duas e três vezes. A eletroquímica é afetada pelos sistemas de irrigação e influenciam a dinâmica e disponibilidade dos nutrientes na solução do solo. Na irrigação contínua a disponibilidade dos nutrientes é maior em relação às irrigações intermitentes. Embora a biomassa e o acúmulo do nitrogênio sejam afetados, a produtividade não diferenciou entre os sistemas de irrigação e o manejo de adubação nitrogenada. A intermitência pode ser utilizada como uma ferramenta para melhorar a eficiência de utilização do nitrogênio pela cultura do arroz irrigado.

Palavras-chaves: *Oryza sativa*, parcelamento de nitrogênio, irrigação intermitente

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (80 p.) Março, 2014. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq e IRGA.

SOIL SOLUTION CHANGES AND RICE CROP RESPONSE AS AFFECTED BY IRRIGATION AND NITROGEN MANAGEMENT ²

Author: José Bernardo Moraes Borin
Adviser: Prof. Ibanor Anghinoni
Co-adviser: Felipe de Campos Carmona

ABSTRACT

Large areas of irrigated rice production can be affected by water scarcity during the crop cycle, depending on rainfall and management of water sources by farmer. Intermittent irrigation is an alternative to the optimization of water use by the crop. However, this management modifies the nutrient dynamics and availability in the soil solution and may also affect the crop. The objective of this study was to evaluate the electrochemical and nutrient dynamics in the soil solution, as well as the response of rice to the split of nitrogen fertilization under different irrigation systems. The experiment was conducted under field conditions in the 2012/13 agricultural season, on an Albaqualf soil in the Rice Experiment Station of Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), in Cachoeirinha/RS. The treatments tested were: continuous flooding and intermittent irrigation with one and two dry cycles in the vegetative stage. Subplots consisted of nitrogen application of 0 kg ha⁻¹ and 150 kg ha⁻¹ in two and three splits. The soil solution electrochemistry is affected by irrigation systems and influence the nutrients dynamics and availability. In continuous flooding, nutrients availability is greater compared to intermittent irrigation. Although biomass and nitrogen accumulation are affected, grain yield did not differ between the irrigation systems and nitrogen fertilization management. The intermittent irrigation can be used as a tool to improve the nitrogen use efficiency by irrigated rice.

Keywords: *Oryza sativa*, nitrogen splits, intermittent irrigation

² M.Sc. Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (80 p.) March, 2014. Research work supported by CNPq and IRGA.

SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO	4
2.1 Aspectos sócio econômicos, edafoclimáticos e de manejo do arroz irrigado	4
2.2 Irrigação intermitente como alternativa de manejo da água no cultivo de arroz irrigado	7
2.3 Dinâmica eletroquímica e disponibilidade de nutrientes na solução do solo manejado com irrigação contínua e intermitente	9
2.4 Dinâmica do nitrogênio em solos manejados por irrigação contínua e intermitente	12
2.4.1 Resposta do arroz ao manejo do nitrogênio	15
3. MATERIAL E MÉTODOS GERAL	19
3.1 Local e caracterização da área experimental	19
3.2 Tratamentos e delineamento experimental.....	20
3.3 Procedimento experimental	22
3.4 Umidade do solo.....	22
4. ESTUDO 1 - ATRIBUTOS QUÍMICOS DA SOLUÇÃO DO SOLO AFETADOS PELO MANEJO DA IRRIGAÇÃO	24
4.1 Introdução.....	24
4.2 Material e métodos	26
4.3 Resultados e Discussão	27
4.3.1 Eletroquímica da solução do solo	27
4.3.2 Amônio na solução do solo.....	35
4.3.3 Potássio na solução do solo	39
4.3.4 Cálcio e magnésio na solução do solo	41
4.3.5 Fósforo na solução do solo.....	43
4.4 Conclusões.....	46
5. ESTUDO 2 - RESPOSTA DO ARROZ IRRIGADO AO MANEJO DA IRRIGAÇÃO E FRACIONAMENTO DE NITROGÊNIO	47
5.1 Introdução.....	47
5.2 Material e métodos	49
5.3 Resultados e Discussão	51
5.4 Conclusões.....	65

6. CONCLUSÕES GERAIS.....	67
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

RELAÇÃO DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1. Sequência termodinâmica dos principais aceptores de elétrons em solos e os respectivos potenciais redox e potenciais redox corrigidos a pH ₇	11
Tabela 2. Rendimento de grãos de arroz irrigado em diferentes sistemas de irrigação e parcelamentos de nitrogênio, em Gleissolo Háplico de Cachoeirinha RS, na safra 2012/13.....	54
Tabela 3. Índice de colheita de arroz irrigado em diferentes sistemas de irrigação e parcelamentos de nitrogênio, em Gleissolo Háplico de Cachoeirinha RS, na safra 2012/13.....	55
Tabela 4. Acúmulo de nitrogênio no tecido vegetal de arroz na colheita em diferentes sistemas de irrigação e parcelamentos de nitrogênio, em Gleissolo Háplico de Cachoeirinha RS, na safra 2012/13.....	55
Tabela 5. Relação de rendimento de grãos de arroz irrigado em função do acúmulo de N nos grãos e nas folhas de Cachoeirinha RS, na safra 2012/13.....	59
Tabela 6. RAN, EAUN e EAFUN de arroz irrigado, em diferentes sistemas de irrigação e parcelamentos de nitrogênio, em Gleissolo Háplico de Cachoeirinha, na safra 2012/13.....	62

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Manejo da irrigação e da adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado, nos diferentes tratamentos utilizados. (Figura Modificada de Embrapa, 2011).....	20
Figura 2. Parcelas de manejo de irrigação subdivididas em manejos de aplicação de nitrogênio em faixas.....	21
Figura 3. Umidade volumétrica do solo ao longo do período de avaliação nos sistemas de irrigação contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3). As barras verticais indicam a precipitação pluviométrica ocorrida no período.....	23
Figura 4. Potencial redox (Eh) da solução do solo ao longo do período de avaliação, nos sistemas de irrigação: contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2); e, supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3). As barras verticais representam a DMS pelo teste T ($p < 0,10$). (- - -) efeito tamponante do Eh pelo ferro em solução. ...	28
Figura 5. pH na solução do solo ao longo do período de avaliação, nos sistemas de irrigação contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3). As barras verticais representam a DMS pelo teste T ($p < 0,10$).....	31
Figura 6. Condutividade elétrica (CE) na solução do solo em função do estágio de desenvolvimento do arroz (A) e do sistema de irrigação (B). T1: Irrigação contínua; T2: supressão entre V6-V8; T3: supressão entre V6-V8 e V8-V10. Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo Teste t ($p > 0,10$).....	34
Figura 7. Condutividade elétrica em função da soma das concentrações de íons ($N-NH_4^+$, P^- , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) de cada sistema de irrigação, ao longo do ciclo do arroz.....	35
Figura 8. Teor de amônio na solução do solo ao longo do período de avaliação, nos sistemas de irrigação: contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-	

V10. As barras verticais representam a DMS pelo teste T ($p < 0,10$).	36
Figura 9. Teores de potássio na solução do solo em diferentes estádios de desenvolvimento do arroz. Estádios seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo Teste t ($p > 0,10$).....	39
Figura 10. Teores de cálcio (A) e magnésio (B) na solução do solo ao longo do período de avaliação, nos sistemas de irrigação:* contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10. As barras verticais representam a DMS pelo teste T ($p < 0,10$).	42
Figura 11. Teor de fósforo na solução do solo ao longo do período de avaliação, nos sistemas de irrigação: contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3). As barras verticais representam a DMS pelo teste T ($p < 0,10$).	44
Figura 12. Matéria seca da parte aérea (colmos+folhas) de arroz irrigado na colheita (R8); nos sistemas de irrigação contínua (T1), supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3); dentro de cada manejo de adubação nitrogenada, em parcelas sem N (0N), parcelamento de 150 kg ha ⁻¹ de N em duas vezes (2x) e três vezes (3x). Letras minúsculas comparam o manejo de irrigação dentro de cada parcelamento do N. Teste t, ausência de letras = diferença não significativa ($p > 0,10$).	52
Figura 13. Acúmulo de N na parte aérea (colmos+folhas) da planta de arroz, com parcelamento de N em cobertura em duas vezes (A) e três vezes (B), nos sistemas de irrigação contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3). As barras verticais representam a DMS ($p < 0,10$).	57
Figura 14. Rendimento de grãos de arroz em função do acúmulo de N no grão (A) e na folha (B), na colheita em Cachoeirinha RS, na safra 2012/13.....	60
Figura 15. Distribuição do N acumulado no arroz irrigado, nos sistemas de irrigação: contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3); e manejo de adubação nitrogenada, em parcelas sem N (0N), parcelamento de 150 kg ha ⁻¹ de N em duas vezes (2x) e três vezes (3x) em Cachoeirinha RS, na safra 2012/13.....	61

1. INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa L.*) é a base alimentar de mais da metade da população mundial, com consumo médio de 60 kg pessoa⁻¹ ano⁻¹, desempenhando papel estratégico na solução de questões de segurança alimentar. No contexto global, o Brasil é o décimo maior produtor de arroz do mundo, com cerca de 11,2 milhões de toneladas anuais. Grande parte dessa produção advém das lavouras do Rio Grande do Sul (RS), Estado que responde por quase de 70 % da produção nacional.

A liderança do RS na produção brasileira de arroz se deve a uma série de fatores conjugados, especialmente a existência de vastas áreas de várzea, que facilitam a irrigação e a abundância de mananciais hídricos. Nesse contexto, a otimização do uso da água pela lavoura de arroz constitui-se em questão prioritária do setor orizícola gaúcho, que busca alternativas técnicas, econômicas e ambientalmente sustentáveis de manejo. Na produção de arroz no Estado, o sistema de irrigação utilizado é o de inundação, com manutenção de lâmina de água contínua por um período médio de 80 a 100 dias, dependendo do ciclo da cultivar. A quantidade de água utilizada nesse sistema varia de 8 a 10 mil m³ ha⁻¹ e a eficiência de uso da água (EUA), entre 0,8 a 1,1 kg de arroz produzido por m³ de água utilizada. Essas quantidades dependem do tipo de solo e de atributos, das condições físicas e da declividade da superfície do solo, do manejo da cultura e do período vegetativo da cultivar, além das condições meteorológicas. Dependendo do regime de precipitação pluvial e do gerenciamento dos mananciais hídricos pelo produtor, extensas áreas, principalmente nas regiões arrozeiras gaúchas denominadas Fronteira Oeste e Campanha (SOSBAI, 2012), são afetadas pela escassez de água durante o ciclo da cultura, o que normalmente ocorre no período reprodutivo,

justamente o mais sensível ao déficit hídrico. Além disso, nas proximidades de regiões urbanas, há frequente conflito de interesse no uso dos recursos hídricos, especialmente nas bacias hidrográficas dos rios Gravataí e Sinos, o que gera desgaste da imagem dos orizicultores frente à opinião pública, especialmente em épocas de estiagem.

Recentemente, trabalhos têm sido desenvolvidos, especialmente na Ásia, para avaliar sistemas que possam aumentar a EUA. Nesse contexto, maior ênfase tem sido dada ao sistema de irrigação intermitente, alternando ciclos com solo inundado e solo com drenagem severa, além do cultivo em condição de solo saturado. No Rio Grande do Sul, esforços em pesquisas relativas à irrigação intermitente vêm sendo realizados recentemente, sendo os resultados promissores quanto à redução no uso da água com manutenção da produtividade.

Entretanto, a mudança do estado de oxidação do solo, como resultado da supressão da irrigação, pode alterar a disponibilidade de nutrientes na solução do solo, assim como a sua absorção pelas plantas, em especial o nitrogênio. Faz-se necessário, portanto, verificar a dinâmica de nutrientes em solo submetido a ciclos intermitentes, comparativamente ao método de irrigação contínua no arroz.

O objetivo deste trabalho foi avaliar propriedades eletroquímicas e a dinâmica de nutrientes na solução do solo, assim como a resposta do arroz ao parcelamento da adubação nitrogenada, em diferentes sistemas de irrigação.

2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

2.1 Aspectos sócio econômicos, edafoclimáticos e de manejo do arroz irrigado

O arroz (*Oryza sativa*) é a base alimentar de mais da metade da população mundial (FAO, 2013), com consumo médio de $60 \text{ kg pessoa}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, desempenhando papel estratégico na solução de questões de segurança alimentar (SOSBAI, 2012). Dentre os cereais, é o segundo mais cultivado no mundo e utilizado tanto para consumo humano como para ração animal (FAO, 2013).

O Brasil foi o décimo maior produtor de arroz do mundo em 2010, com produção de aproximadamente 11,2 milhões de toneladas, o que representa 1,6 % da produção mundial (FAO, 2013). Estima-se que para a safra 2013/14 sejam produzidos entre 11,92 e 12,03 milhões de toneladas no país, pouco superior à safra anterior. Entretanto, este aumento de produção ocorreu sem expansão da área plantada, ao redor de 2,4 milhões hectares (CONAB, 2013).

Na safra 2012/13, foram cultivados no Rio Grande do Sul (RS) 1,08 milhão de hectares de arroz irrigado, com produção de 8,07 milhões de toneladas (IRGA, 2013b). Isso representou mais de 67,5 % da produção brasileira (CONAB, 2013) e mais de 50% da produção dos países do Mercosul na safra 2010/11 (Menezes et al., 2012), apresentando boas expectativas para o futuro, já que o consumo deverá crescer a uma taxa anual de 1,0% até 2020/21 (MAPA, 2013).

O aumento de produção e a maior participação do arroz gaúcho no mercado internacional se devem tanto a incrementos de área cultivada como de produtividade, notadamente a partir da safra 2003/04 (Menezes et al.,

2012). A produtividade passou de 5,6 Mg ha⁻¹ (safra 2000/01) para 6,1 Mg ha⁻¹ (safra 2003/04) e alcançou, na última safra (2012/13), a média de 7,5 Mg ha⁻¹ (IRGA, 2013a). Esse aumento de produtividade deveu-se a projetos de transferência de tecnologia, como o Projeto CFC e o “Projeto 10”, que preconizaram a difusão, aos produtores de arroz irrigado do RS, de diversas práticas agronômicas recomendadas no manejo integrado da cultura (SOSBAI, 2012), e, o surgimento de novas cultivares de alto potencial produtivo, concomitantemente.

As condições ideais requeridas, para que o cultivo do arroz seja economicamente viável, são principalmente altas temperaturas no período do seu desenvolvimento, fontes de água para irrigação em tempo hábil, terreno plano e uma camada subsuperficial impermeável que iniba a percolação da água (FAO, 2013; SOSBAI, 2012). No RS, os solos encontrados nas planícies de rios e lagoas (solos de várzea), onde é feito o cultivo do arroz irrigado, representam cerca de 20% da sua área total (Pinto et al., 2004). A maioria dessas áreas está na Metade Sul do RS, que é dividida em seis regiões: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Sul, Planície Costeira Interna e Externa à Laguna dos Patos (SOSBAI, 2012). A classe de solos mais representativa no RS é a dos Planossolos (incluindo Gleissolos associados), com 56% da área (Gomes et al., 2004). Entretanto, apenas um terço dessa área é efetivamente cultivada com arroz irrigado, devido principalmente, à disponibilidade de água limitada para seu cultivo (Pinto et al., 2004).

Para que as propriedades rurais cumpram sua função social na plenitude, elas devem produzir a maior quantidade de alimentos por unidade de área, com o menor impacto ambiental. A otimização do uso da água pela lavoura de arroz constitui-se em questão prioritária do setor orizícola, que busca alternativas de manejo técnica, econômica e ambientalmente sustentáveis (SOSBAI, 2012). Na produção de arroz no RS, o sistema de irrigação utilizado é o de inundação, com manutenção de lâmina de água contínua por um período médio de 80 a 100 dias, dependendo do ciclo da cultivar. A quantidade de água utilizada neste sistema varia entre 8 a 10 mil m³ ha⁻¹ e a eficiência de uso da água (EUA) é de 0,8 a 1,1 kg de arroz produzido por m³ de água utilizada (Marcolin et al., 2009). Essas quantidades dependem de atributos e do tipo de solo (SOSBAI, 2012), das condições físicas e da

declividade da superfície do solo, do manejo da cultura e do período vegetativo da cultivar, além das condições meteorológicas (Gomes et al., 2004). Em condições extremas, o requerimento de água pode superar $15.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (SOSBAI, 2012).

O custo total de produção da lavoura de arroz irrigado no RS é de aproximadamente R\$ 4.700,00 por hectare, sendo que a irrigação representa 9,83% (IRGA, 2013c) do montante. Atualmente, a água é o recurso natural que mais limita o aumento da área cultivada. Dependendo do regime de precipitação pluvial e do gerenciamento dos mananciais, extensas áreas, principalmente nas regiões arrozeiras gaúchas denominadas Fronteira Oeste e Campanha, são afetadas pela escassez de água durante o ciclo da cultura, o que normalmente ocorre no período reprodutivo, justamente o mais sensível ao déficit hídrico (Yoshida, 1981). Além disso, nas proximidades das regiões urbanas, há frequente conflito de interesse no uso dos recursos hídricos, especialmente nas bacias hidrográficas dos rios Gravataí e Sinos, o que gera desgaste da imagem dos orizicultores frente à opinião pública, especialmente em épocas de estiagem.

Recentemente, trabalhos têm sido desenvolvidos, especialmente na Ásia, para avaliar sistemas que possam aumentar a EUA, tais como: cultivo em solo saturado, irrigação intermitente, cultivo em condição de aerobiose, cultivo sobre camalhões e cultivo utilizando vários tipos de mulching para reduzir perdas por evaporação (Bouman e Tuong, 2001; Tuong e Bouman, 2003; Tuong et al., 2005). Porém, maior ênfase tem sido dada ao sistema de irrigação intermitente, alternando ciclos com solo inundado e solo com drenagem severa, além do cultivo em condição de solo saturado. No Rio Grande do Sul, esforços em pesquisas relativas à irrigação intermitente vêm sendo realizados recentemente, sendo que os resultados indicam produtividades semelhantes em relação à irrigação contínua e redução de até 32% no consumo de água (Martini et al., 2009), além de redução na transferência de nutrientes da lavoura para o ambiente pelo menor extravasamento da água da lavoura por ocasião das precipitações (Ávila et al., 2009). Entretanto, a mudança do estado de oxiredução do solo, como resultado da supressão da irrigação, pode alterar a disponibilidade de nutrientes na solução do solo, assim como a sua absorção pelas plantas de arroz, em especial o nitrogênio.

2.2 Irrigação intermitente como alternativa de manejo da água no cultivo de arroz irrigado

O principal sistema de manejo de irrigação utilizado no Rio Grande do Sul é o de irrigação contínua. Em algumas regiões, a decisão da área a ser semeada depende da água dos reservatórios e das expectativas de precipitações pluviométricas para o período de cultivo. Em média, a contribuição das chuvas corresponde a 50% da água utilizada pelo arroz (Scivittaro et al., 2011). O cultivo do arroz deve permanecer com lâmina de água por um período que não afete a produtividade e qualidade de grãos (Gomes et al., 2004). Esse período varia conforme o manejo da irrigação e o genótipo utilizado. A água utilizada para a irrigação por alagamento das áreas e formação da lâmina de água, além de influenciar nos aspectos físicos das plantas de arroz (enraizamento, perfilhamento e altura da planta), exerce efeito termorregulador, interfere na população de espécies de plantas daninhas e na incidência de determinadas pragas e doenças (SOSBAI, 2012), além de disponibilizar maior quantidade de nutrientes na solução do solo (Ponnamperuma, 1972).

O método de irrigação alternativo preconizado é a irrigação intermitente, que consiste na alternância de ciclos de irrigação e supressão da água na lavoura. Neste caso, mesmo com a interrupção da irrigação, a água remanescente nos quadros não é drenada, seguindo o seu ciclo hidrológico, infiltrando no solo ou evapotranspirando. Essa supressão deve permanecer por um período de tempo, pois é demandada maior quantidade de água para saturar o solo ao retornar com a irrigação. Na China, alguns orizicultores, que possuem um bom controle da irrigação de suas lavouras, as drenam no estágio vegetativo, para controlar o perfilhamento excessivo, ajudando a regular a área foliar nos níveis desejados, melhorando a atividade radicular (Buresh et al., 2008). Nesse caso, a intermitência é realizada até a diferenciação do primórdio floral (DPF), período em que a necessidade de água pelo arroz é menor (Gomes et al., 2004).

No Rio Grande do Sul, o sistema de irrigação intermitente é utilizado ocasionalmente em anos de déficit hídrico, como os afetados pelo fenômeno “La Niña”, especialmente para preservação dos recursos hídricos e para a

manutenção da área em cultivo na propriedade. Alternativamente, esse método é usado quando se pretende aumentar a área de cultivo com a mesma quantidade de água disponível nos reservatórios. Diversos estudos (Toescher et al., 1997; Belder et al., 2004; Scivittaro et al., 2011; Marcolin et al., 2011; Monterle, 2011) demonstraram que a irrigação intermitente não interfere significativamente no rendimento de grãos, em comparação ao sistema de irrigação contínua. Entretanto, de acordo com Petry et al. (2011), dependendo do grau de severidade do estresse hídrico, pode haver redução de produtividade, especialmente em função de características de solo. Por isso, a decisão de supressão da água no cultivo deve levar em consideração diversos aspectos, dentre eles a altura de lâmina de água, a capacidade de sua retenção pelo solo e as condições meteorológicas (Gomes et al., 2004).

Nesse contexto, a eficiência de uso da água (EUA) é uma medida importante de avaliação, a qual relaciona a produtividade de grãos com a quantidade de água aplicada pela irrigação. Normalmente, quando o manejo da água é conduzido corretamente, a EUA no sistema de irrigação intermitente é maior, se comparado à irrigação contínua (Scivittaro et al., 2011; Marcolin et al., 2011). A intermitência também apresenta outras vantagens ambientais, uma vez que reduz a emissão de gases com potencial de aquecimento global, em relação ao método tradicional de irrigação vigente no Estado (Zschornack et al., 2011). Contudo, o efeito de mitigação da emissão de metano ocorre apenas em anos em que as condições meteorológicas permitam a reoxidação do solo (Monterle, 2011).

Outra vantagem atribuída à irrigação intermitente em relação à contínua é a menor perda por escoamento superficial, cerca de 40 %, além da redução em 80 % do transporte de massa de ingredientes ativos de agrotóxicos, como Imazethapyr, Imazapic e Fipronil (Mezzomo, 2009), pelo menor extravasamento da água da lavoura em comparação à irrigação contínua, por ocasião de precipitações pluviométricas. Além disso, nos ciclos de intermitência que reservam maior quantidade de água da chuva, ocorre menor perda de nutrientes, como o fósforo, o nitrogênio (potenciais poluidores ambientais) e o potássio (Avila et al., 2009).

Entretanto, para adotar o sistema de irrigação intermitente, há necessidade de redimensionar o sistema de irrigação, uma vez que a vazão de

água deve ser grande o suficiente para reestabelecer a lâmina o mais rápido possível (Marcolin et al., 2011). A intermitência também influencia nos processos de transformação e perdas de nitrogênio (Buresh et al., 2008), aumentando a importância e a necessidade de avaliar as respostas da cultura ao manejo da irrigação e do nitrogênio.

2.3 Dinâmica eletroquímica e disponibilidade de nutrientes na solução do solo manejado com irrigação contínua e intermitente

Ao ser estabelecida a lâmina de água, ocorrem diversas alterações no solo pela modificação de suas características físicas, químicas, biológicas e eletroquímicas (Sousa et al., 2010). Após a submersão do solo, o oxigênio molecular é reduzido rapidamente, devido à sua utilização pelos microrganismos aeróbios em seus processos biológicos (Camargo et al., 1999). As mudanças das condições de oxiredução modificam a concentração e a mobilidade de elementos, influenciando a flora (Sousa et al., 2009) e a fauna do meio.

Após o estabelecimento da lâmina de água, forma-se uma camada oxidada de poucos milímetros na superfície do solo, devido à baixa difusão do oxigênio na água, sendo esta 10.000 vezes inferior em relação ao ar (Ponnamperuma, 1972). Além dessa, há uma camada oxidada na rizosfera do arroz pela formação de tecidos condutores de ar, denominados aerênquimas, os quais levam o oxigênio das folhas às raízes, apresentando também como função, a proteção ao efeito da toxidez de elementos reduzidos (Camargo et al., 1999). O oxigênio é o maior receptor de elétrons (agente oxidante) da natureza e, na sua ausência, os microrganismos anaeróbios obrigatórios ou facultativos utilizam os compostos oxidados inorgânicos (respiração anaeróbia) e orgânicos (fermentação). Os receptores inorgânicos de elétrons seguem uma sequência termodinâmica de redução, iniciando pelo N-NO_3^- , seguido por Mn^{4+} , Fe^{3+} e SO_4^- (Camargo et al., 1999). Na respiração anaeróbia, as formas oxidadas ganham elétrons e consomem H^+ , passando a formas reduzidas e H_2O (Tabela 1).

Assim, após um período em hipoxia, ocorrem mudanças na dinâmica eletroquímica da solução do solo, verificadas pelo pH, potencial redox (Eh) e condutividade elétrica (CE), medidas do fator intensidade de acidez, intensidade de redução e presença de íons na solução, respectivamente. Ao longo do tempo de alagamento, ocorre o aumento do pH e a diminuição do Eh (Griebeler et al., 2010), além de maiores valores de CE (Sousa et al., 2010).

O pH é uma variável máster que influencia nas espécies dos elementos e nas cargas do solo, interferindo na presença e disponibilidade de nutrientes e elementos tóxicos na solução. O poder tampão do pH que os solos apresentam quando inundados se deve à presença de elementos reduzidos (Camargo et al., 1999), cujas reações de oxiredução envolvem o consumo ou liberação de H^+ ou OH^- (Ponnamperuma, 1977), com consequente alteração no pH da solução. Este, em solo submerso, tende ao equilíbrio entre 6,5 e 7,5, aumentando em solos ácidos e diminuindo em solos alcalinos (Camargo et al., 1999).

Já a diminuição do Eh indica a diminuição da disponibilidade de elementos oxidados, os quais recebem elétrons e são reduzidos. Quanto mais baixo o Eh, maior será a quantidade de substâncias reduzidas no solo (Camargo et al., 1999). O potencial redox também é tamponante e apresenta um valor determinado para o elemento que está sendo reduzido. O Eh estabiliza até que o elemento reduza em sua maior parte (Tabela 1), reduzindo a seguir o próximo elemento aceptor de elétrons da sequência termodinâmica. O tamponamento depende da quantidade e da solubilidade do elemento que está sendo reduzido, mantendo um equilíbrio entre a solução e a fase trocável do solo (Souza et al., 2009).

Tabela 1. Sequência termodinâmica dos principais aceptores de elétrons em solos e os respectivos potenciais redox e potenciais redox corrigidos a pH₇.

Reações	Potencial redox (mV) ¹	Eh ₇ (mV) ²
Consumo do O ₂ $\frac{1}{2} O_2 + 2e + 2H^+ = H_2O$	600 a 400	
Consumo do NO ₃ ⁻ $NO_3^- + 2H^+ + 2e = \frac{1}{2} NO_2 + H_2O$	500 a 200	220
Formação do Mn ²⁺ $MnO_2 + 4H^+ + 2e = Mn^{2+} + 2H_2O$	400 a 200	200
Formação do Fe ²⁺ $FeOOH + 3H^+ + e = Fe^{2+} + 2H_2O$	300 a 100	120
Formação de HS ⁻ $SO_4^{2-} + 9H^+ + 6e = HS^- + 4H_2O$	0 a -150	-150

¹Adaptado de Sousa et al. (2010).

²Adaptado de Ponnamparuma (1972).

Alguns elementos estão em formas mais solúveis quando reduzidos, como o manganês e o ferro. Com o aumento da concentração desses elementos na solução, aumenta a concentração de outros cátions, como cálcio e magnésio (Sousa et al., 2010; Griebeler et al., 2010), pois eles são deslocados do complexo sortivo por ação de massa (Meurer et al., 2010b). Como a CE está relacionada à presença de íons na solução do solo, conseqüentemente, em decorrência desse processo, ocorre o aumento da mesma. Além disso, na condição de inundação, com a redução, o aumento do pH e a solubilização dos compostos de ferro, o fósforo que estava quimiossorvido tem sua concentração aumentada na solução, tornando-se mais disponível para o arroz (Ponnamparuma, 1977; Silva et al., 2008). Essa disponibilidade aumenta até que o pH se torne alcalino, quando há formação de precipitados de fosfatos ferrosos, reduzindo sua disponibilidade às plantas novamente (Sousa et al., 2010).

A irrigação intermitente, que alterna ciclos de oxidação e redução, afeta a dinâmica eletroquímica e a disponibilidade dos nutrientes do solo. Os ciclos de redução são caracterizados pelo decréscimo do Eh e aumento do pH e da concentração de Fe²⁺, ao contrário do que ocorre no ciclo de oxidação (Thompson et al., 2006). Com o aumento do pH, a carga líquida negativa do solo aumenta (Guilherme et al., 2000), o que modifica a especiação e disponibilidade dos íons (Meurer e Anghinoni, 2010). Nesse sentido, os ciclos

de supressão da irrigação afetam a cristalinidade dos óxidos (Thompson et al., 2006; Sousa et al., 2004), diminuindo a disponibilidade do P para as culturas pela modificação da capacidade máxima de adsorção de P dos solos (Guilherme et al., 2000). Como consequência positiva, diminui a concentração de Fe^{2+} na solução do solo (Scivittaro e Gomes, 2007), sendo esse elemento menos absorvido pela planta (Jaeger et al., 2013b), mitigando sua toxidez ao arroz irrigado. Com a precipitação do Fe^{2+} na reoxidação do solo, esse manejo tende a causar a diminuição da concentração de cálcio e magnésio na solução pela adsorção dos cátions, não alterando, porém, a concentração desses nutrientes no tecido das plantas (Buss et al., 2011). Assim como o Ca^{2+} e Mg^{2+} , o K^+ e o NH_4^+ também são afetados por esse processo, pelo fato de serem cátions e ainda de menor valência. Além disso, os ciclos de supressão da irrigação interferem na dinâmica do N, ao modificarem o ambiente, favorecendo o maior ou menor desenvolvimento das bactérias envolvidas no ciclo do N no solo. Por exemplo, ao realizar a reoxidação do solo, o Eh aumenta o suficiente para ocorrer a nitrificação. Com o reestabelecimento da lâmina de água, o Eh diminui, favorecendo a desnitrificação (Reddy e Patrick, 1974).

2.4 Dinâmica do nitrogênio em solos manejados por irrigação contínua e intermitente

O nitrogênio está presente em abundância no meio ambiente, correspondendo a 78% da atmosfera, como N_2 (Cantarella, 2007) e indisponível nessa forma para a maioria dos organismos vivos, devido a sua tripla ligação covalente, com alta energia. É componente de toda matéria viva, representando aproximadamente 18% do peso das proteínas (Dechen e Nachtigall, 2007), sendo, depois do carbono, o elemento de maior concentração nas plantas (Reddy e DeLaune, 2008). Nestas, o nitrogênio constitui-se como elemento essencial, que é absorvido da solução do solo em maiores quantidades pelas plantas cultivadas (Cantarella, 2007). Elas o absorvem na forma inorgânica amoniacal (NH_4^+) e nítrica (NO_3^-), liberadas pela mineralização do N-orgânico (Cantarella e Montezano, 2010), ou fornecido via fertilizante. Dependendo da relação C/N do material, pode ocorrer o processo

inverso: a imobilização (Cantarella, 2007). Segundo Cantarella e Montezano (2010), em 2008, o Brasil utilizou 2,5 milhões de toneladas de N que, quando aplicado em excesso ou mal manejado, pode poluir as águas superficiais, o lençol freático e contribuir para o aumento de gases de efeito estufa.

O nitrogênio é o principal nutriente limitante da produção das lavouras (Grant, 2010), inclusive do arroz irrigado (Buresh et al., 2008), e pode estar presente no solo na forma de diversas espécies químicas. Devido ao seu ciclo complexo e sua vulnerabilidade a transformações, o N pode ser perdido para o ambiente de diferentes formas. Os principais processos de transformação do N são: mineralização, imobilização, nitrificação, desnitrificação e volatilização, sendo, nos solos alagados, a desnitrificação e volatilização os mais importantes (Buresh et al., 2008). Nesse ambiente, as perdas de N apresentam diferentes proporções, em comparação aos solos oxidados. Assim, dependendo do tipo de solo, condições meteorológicas e manejo do fertilizante, os impactos econômicos e ambientais podem variar (Cantarella e Montezano, 2010). As perdas são influenciadas também pelo manejo da irrigação do arroz, sendo minimizadas com a irrigação contínua (Scivittaro e Machado, 2004). Em contrapartida, Avila et al. (2009) encontraram maiores perdas de N na água extravasada da irrigação contínua, em comparação à intermitente. Em outros sistemas, a lixiviação é uma perda de N importante do solo; entretanto, no cultivo do arroz irrigado, em que o solo permanece alagado, o processo torna-se pouco importante (Buresh et al., 2008), devido aos solos alagados formarem uma camada sub-superficial impermeável e apresentarem baixa condutividade hidráulica e baixa concentração de nitrato.

No arroz irrigado, após a submersão do solo e o consumo do O_2 remanescente, o composto que apresenta maior afinidade para receber elétrons é o nitrato, sendo, portanto, o primeiro a ser reduzido. Este, por desnitrificação, é reduzido a óxido nitroso (N_2O) e nitrogênio elementar (N_2), sendo ambos emitidos para a atmosfera (Vahl e Souza, 2004). O amônio acumula na decomposição anaeróbia devido à ausência de oxigênio, o qual é necessário para a nitrificação (Buresh et al., 2008; Cantarella, 2007). No entanto, o NH_4^+ pode se difundir até a camada oxidada (superfície do solo ou na rizosfera), onde é nitrificado, formando NO_3^- que é difundido até a camada reduzida, onde é perdido por desnitrificação. Solos alagados, em comparação a

solos bem drenados, apresentam ambiente favorável às perdas de N por nitrificação-desnitrificação e volatilização de amônia (Buresh et al., 2008), intensificando as perdas devido à proximidade dos ambientes aeróbios e anaeróbios. Ainda, segundo os mesmos autores, a desnitrificação representa apenas 10% do total das perdas de N e a volatilização é responsável por 90% delas. A nitrificação-desnitrificação é uma perda pequena, porém contínua, por ocorrer durante todo o período de alagamento, podendo se tornar mais importante do que a perda de NO_3^- inicial com o alagamento do solo (Sousa et al., 2009), sendo a taxa de nitrificação o limitante dessa perda (Buresh et al., 2008). Ao realizar a supressão da irrigação, com a reoxidação do solo, ocorre perda adicional de N pelos processos de nitrificação-desnitrificação (Eriksen, 1985).

Já o íon amônio encontrado no solo é perdido por volatilização de amônia a partir de pH 7,0, apresentando a constante de dissociação (pK_a) de 9,2 (Buresh et al., 2008); assim, em torno ou acima desse valor de pH, as perdas se tornam relevantes (Cantarella e Montezano, 2010). Na aplicação da ureia, por ocasião de sua hidrólise, há o consumo de prótons (H^+) com consequente aumento do pH. Assim, mesmo em solos ácidos, ocorrem perdas por volatilização (Cantarella, 2007). Entretanto, essas perdas, mesmo em anos de baixa precipitação, a substituição pelos demais fertilizantes nitrogenados não compensa, devido ao seu custo ser superior (Fontoura, 2010), já que a ureia apresenta o menor custo por unidade de N e alta concentração do nutriente (Knoblauch et al., 2012).

A aplicação a lanço de ureia sobre a lâmina de água pode levar a perdas significativas de N por volatilização de amônia (Cantarella, 2007), sendo este o processo de maior perda do fertilizante nitrogenado no cultivo de arroz irrigado (Buresh et al., 2008). Devido a essas perdas, é realizado o parcelamento da aplicação do nitrogênio e o alagamento imediato após a primeira aplicação. A SOSBAI (2012) recomenda aplicar, para variedades de ciclo médio, 10 a 20 kg N ha^{-1} na semeadura, 50 % em V3/V4 (início do perfilhamento) e o restante antes de R0 (no "Green ring"). A primeira aplicação deve ser feita antes da entrada da água, pois as perdas por volatilização são diminuídas com a aplicação e posterior alagamento com manutenção da lâmina (Buresh et al., 2008; Knoblauch, 2012). A segunda aplicação, também em cobertura, é feita

com a lâmina de água estabelecida. Knoblauch (2012) estudou diversos manejos para aplicação do N em um Gleissolo, concluindo que a aplicação da ureia na lâmina de água é o manejo que apresenta a maior perda de amônia por volatilização, correspondendo a 38% da quantidade de N aplicada. De acordo com Buresh et al. (2008), as perdas por volatilização são intensificadas com o aumento da temperatura e do pH, dois fatores que ocorrem na irrigação contínua.

Com a aplicação do fertilizante nitrogenado em cobertura, 58% do N é encontrado na forma de NH_4^+ . Já com a realização do manejo de irrigação intermitente, após duas supressões da água, foi verificada a incorporação do N pela maior concentração do NH_4^+ na subsuperfície (Eriksen et al., 1985). Além disso, esses ciclos de umedecimento e secagem beneficiam o desenvolvimento de duas comunidades de bactérias (aeróbias e anaeróbias), afetando a decomposição e a mineralização do N, ocorrendo maior liberação dos nutrientes contidos nos resíduos culturais (Pocojeski, 2011). Entretanto, o número de intermitências deve ser moderado, pois quanto maior a quantidade de supressões de água realizadas, maior a quantidade de N perdido (Reddy e Patrick, 1974).

2.4.1 Resposta do arroz ao manejo do nitrogênio

Em um sistema produtivo, o resultado agrônômico procurado é a maior produtividade com sustentabilidade econômica e ambiental. Segundo a SOSBAI (2012), no Rio Grande do Sul as cultivares de ciclo médio são as que apresentam maior potencial produtivo, desde que sejam adotadas integralmente as práticas de manejo recomendadas pela pesquisa. O rendimento de grãos é o resultado da interação dos fatores de produção, como a densidade de semeadura, a adubação nitrogenada, a temperatura, a radiação solar e outras práticas de manejo, as quais, isoladamente, não garantem altas produtividades (Freitas, 2007).

Os fatores tecnológicos dos sistemas de produção podem ser divididos em “fatores de construção da produtividade” e “fatores de proteção da produtividade” (Coelho et al., 2003). Os fatores de “construção da

produtividade” no arroz irrigado são: época de semeadura, a cultivar, estado nutricional das plantas, fertilidade do solo, manejo da água de irrigação e práticas de adequação do solo (Menezes et al., 2012). Já os “fatores de proteção da produtividade”, de acordo com Coelho et al. (2003), são aqueles que possibilitam a colheita da produção que tem sido construída. Para o arroz irrigado, Menezes et al. (2012) fazem referência à proteção como sendo o manejo de plantas daninhas, de pragas e de doenças da cultura.

A produção de grãos de arroz é uma função da produção de biomassa, principalmente durante a fase de maturação, e é controlada por dois fatores: a) habilidade potencial da população de plantas de arroz em fotossintetizar, denominada “fonte”; e b) a capacidade dos grãos para armazenarem o fotoassimilado, denominado “dreno” (Gomes et al., 2004). A produção de biomassa pelas plantas agrícolas anuais varia com o genótipo utilizado, as condições ambientais e as práticas de manejo da cultura. A biomassa produzida correlaciona-se com a porcentagem de espiguetas férteis, o que influencia o rendimento de grãos de arroz (Duy et al., 2004). Apesar de a biomassa ser um importante indicativo de atividade fotossintética, Cabangon et al. (2004) não verificaram relação entre matéria seca e rendimento de grãos de arroz, em um experimento com diferentes manejos de irrigação e de aplicação do adubo nitrogenado, em dois locais e duas safras subsequentes.

Uma maneira de avaliar o bom uso dos fertilizantes é pela eficiência de uso dos nutrientes neles contidos. Como abordado anteriormente, o nitrogênio pode ser perdido de diversas formas. Essas perdas podem resultar em contaminação do meio ambiente, além de custos econômicos ao produtor, devido à participação do adubo no custo total de produção. Assim, práticas que visam maior eficiência de uso desse nutriente vêm se tornando muito relevantes nos últimos anos (Cantarella e Montezano, 2010). Os solos alagados se distinguem pela baixa eficiência do uso do nitrogênio, devido às altas perdas do N (Buresh et al., 2008), por sua complexidade e múltiplas rotas de reações no solo. E, quando altas produtividades são almejadas, os riscos de excesso de nitrogênio no sistema são maiores (Cantarella e Montezano, 2010). Existem diversas formas de dimensionar as boas práticas de manejo para verificar o aproveitamento do fertilizante, dentre elas, destacam-se a eficiência de uso de nitrogênio (EUN) e a recuperação aparente de nitrogênio (RAN).

A RAN mede a porcentagem de N absorvida em relação à quantidade aplicada. Esta pode ser muito variável e, de acordo com Cantarella (2007), depende do tipo de solo, da cultura, da dose do fertilizante, do manejo, da incidência de pragas e doenças e das condições ambientais. Segundo Buresh et al. (2008), apresentando resultados de 179 lavouras de seis países asiáticos, em meados de 1990, a recuperação era, em média, de apenas 30% do N aplicado. Atualmente, com o alto custo do fertilizante e a participação no custo de produção, foi diminuído o uso excessivo de adubos nitrogenados e a RAN para o arroz aumentou para valores em torno de 44 % (Dobermann, 2005). O principal destino do N-fertilizante não absorvido pela planta é o solo, não sendo considerado como perda em um primeiro momento (Cantarella e Montezano, 2010). Porém, sua disponibilização é limitada, pois é incorporado à microbiota e posteriormente à matéria orgânica do solo (MOS), tornando-se pouco disponível (Cantarella, 2007).

Em solos alagados, mesmo com grandes quantidades de fertilizantes aplicados, mais de 50% do N assimilado pela lavoura é originado da liberação de compostos orgânicos nitrogenados (Mikkelsen, 1987). Na ausência de oxigênio, a decomposição da matéria orgânica é incompleta, resultando em taxas de mineralização mais baixas (Cantarella, 2007). Entretanto, mesmo com a baixa imobilização e mineralização de N em solos alagados, obtém-se um resultado líquido de N mineralizado maior nesses solos em comparação com solos oxidados (Tusneem e Patrick, 1971), dependendo das condições meteorológicas e região. Para Ponnampuruma (1972), esse fato deve-se à mineralização de N orgânico, ao atingir valores de Eh em torno de 150 mV.

A resposta do arroz irrigado ao adubo nitrogenado e a EUN dependem de vários fatores, principalmente do manejo da cultura (Menezes et al., 2012). A EUN é utilizada por diversos autores para avaliar a habilidade das plantas em absorver o nutriente com máximo rendimento, comparando diversas espécies, genótipos e manejos da cultura. A eficiência de uso de nitrogênio, medida por unidade de produto agrícola por unidade de fertilizante aplicado, é inversamente proporcional às doses usadas (Cantarella e Montezano, 2010). O emprego de baixas doses de N geralmente permite altos índices de eficiência, porém pode resultar na utilização indesejável do estoque de N e da MOS, o que pode comprometer a fertilidade do solo a médio prazo (Dobermann, 2007).

Para Baligar et al. (2001), maiores valores de EUN podem reduzir os custos de adubação, diminuir a taxa de perda do nutriente e aumentar o rendimento da cultura.

A demanda de N do arroz irrigado é maior nos estádios de desenvolvimento em que a planta define os componentes de rendimento (Menezes et al., 2012). Nesse sentido, as práticas de manejo são as melhores alternativas para aumentar a EUN (Baligar et al., 2001). Uma das práticas recomendadas pela SOSBAI (2012) é o parcelamento da adubação nitrogenada e a inundação da área após a primeira aplicação da ureia em cobertura. O parcelamento da ureia é recomendado devido às perdas de N, comentadas anteriormente, assim garantindo o seu suprimento nos períodos de maior demanda, no início do perfilhamento e na diferenciação do primórdio floral (DPF), quando se potencializa o número de panículas m^{-2} e o número de grãos panícula⁻¹, respectivamente. Com a inundação logo após a aplicação da ureia, o N é incorporado ao solo, mantendo-se na forma de NH_4^+ com a anaerobiose. Com a realização de ciclos de alagamento e supressão da água, o N pode ser aplicado em solo seco com posterior alagamento, de forma a minimizar as perdas por volatilização. No entanto, com a reoxidação do solo, ocorre o processo de nitrificação e, com novo alagamento, o NO_3^- é perdido por desnitrificação. Faz-se necessário, portanto, verificar a eficiência de uso do N no solo submetido a manejos de parcelamento do N e a ciclos de supressão, comparativamente ao sistema de irrigação contínua.

Portanto, a dinâmica eletroquímica e dos nutrientes da solução do solo serão afetados pela irrigação intermitente, com ciclos de alagamento e supressão de água, entretanto não alterará a resposta produtiva da planta de arroz irrigado. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as características eletroquímicas e a dinâmica de nutrientes na solução do solo, em diferentes sistemas de irrigação. Além disso, avaliar a resposta do arroz, pelo rendimento de grãos, a matéria seca, o acúmulo de N no tecido e a eficiência de uso deste nutriente, submetido ao parcelamento da adubação nitrogenada em diferentes sistemas de irrigação.

3. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

3.1 Local e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no campo, no ano agrícola de 2012/13, na Estação Experimental do Arroz (EEA) do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA). A EEA fica localizada no município de Cachoeirinha/RS, situado na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul, a 29°55'30" de latitude sul e 50°58'21" de longitude oeste, com altitude de 7 m.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Cfa subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes. A temperatura mínima média do ar é de 10,0°C no mês mais frio (junho) e a máxima é de 29,4°C no mês mais quente (janeiro), tendo uma precipitação pluvial média anual de 1434 mm (Climate-Data, 2014).

O solo da área experimental é classificado como Gleissolo Háplico Ta distrófico típico (Embrapa, 2006). Amostras de solo foram coletadas em junho de 2012 para caracterização e apresentaram as seguintes características químicas (Tedesco et al., 1995): 4,2 de pH em água; 6,9 cmolc dm⁻³ de acidez potencial (H+Al); 14 g kg⁻¹ de matéria orgânica; 57 mg dm⁻³ de fósforo (Mehlich 1); 55 mg dm⁻³ de potássio (Mehlich 1); 1,6 cmolc dm⁻³ de cálcio; 0,7 cmolc dm⁻³ de magnésio; 0,5 cmolc dm⁻³ de alumínio; CTC_{pH7,0} de 9,4 cmolc dm⁻³; e saturação por bases de 26,7 %. Em relação às características físicas, o solo é classificado como de textura franca, possuindo em média 360, 470 e 179 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente; densidade de 1,49 g cm⁻³; e macro e microporosidade de 0,12 e 0,30 m³ m⁻³, respectivamente, segundo metodologia proposta pela Embrapa (1997). A área do experimento se encontrava em

pousio por três anos previamente ao cultivo do arroz. A vegetação era composta por espécies espontâneas, majoritariamente azevém (*Lolium multiflorum* L.).

3.2 Tratamentos e delineamento experimental

O experimento constou de três sistemas de irrigação combinados com três modos de aplicação de ureia em cobertura (Figura 1). Os tratamentos de irrigação testados foram: T1 - irrigação contínua (IC) desde o estágio de desenvolvimento V4 (Counce et. al., 2000) até R6; T2 - irrigação intermitente, com entrada d'água em V4 e manutenção da lâmina até V6 e supressão total da irrigação até o estágio V8, retornando a partir desse estágio com a irrigação contínua até R6; T3 - irrigação intermitente, com entrada da água em V4 e manutenção da lâmina até V6 e supressão total da irrigação até o estágio V8, com restabelecimento de lâmina de água, e nova supressão até o estágio V10, quando retornava a irrigação contínua até R6.

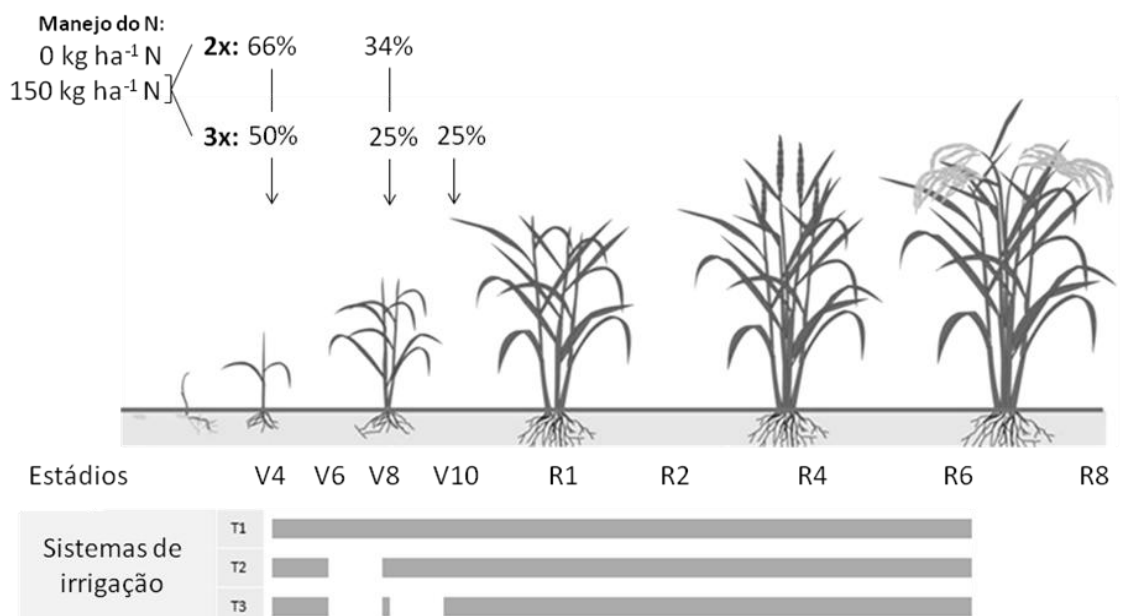


Figura 1. Manejo da irrigação e da adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado, nos diferentes tratamentos utilizados. (Figura Modificada de Embrapa, 2011).

Em cada manejo de irrigação, a parcela foi subdividida em três subparcelas (Figura 2), para aplicação diferenciada de nitrogênio, sendo: 0 kg ha⁻¹ de N; 150 kg ha⁻¹ de N em duas aplicações (66% em V4 e 34% em V8) e 150 kg ha⁻¹ de N em três aplicações (50% em V4, 25% em V8 e 25% em V10) aplicados via ureia, à lanço. As aplicações de ureia, que coincidiam com os ciclos de supressão da água, foram realizadas em solo seco previamente ao retorno da irrigação.

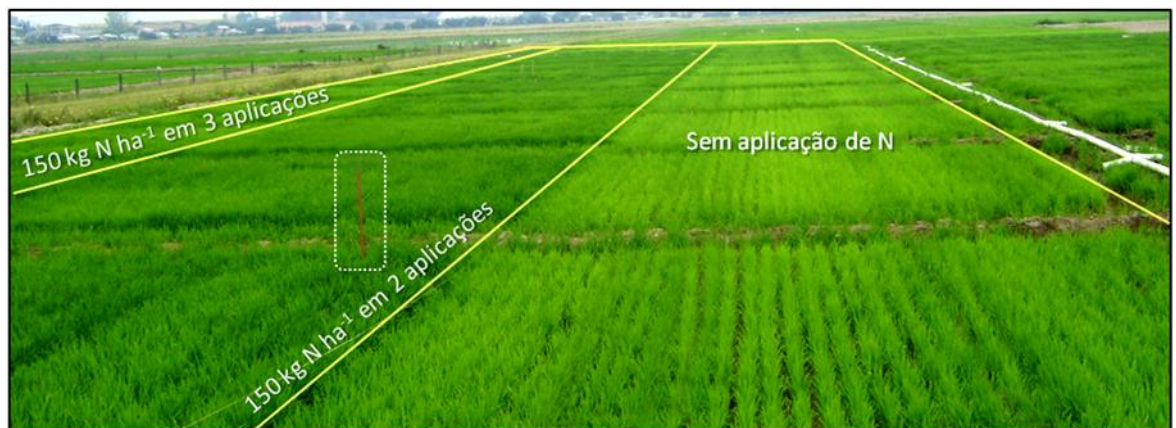


Figura 2. Parcelas de manejo de irrigação subdivididas em manejos de aplicação de nitrogênio em faixas.

No período em que as parcelas estavam com irrigação contínua, a lâmina d'água era estabilizada com altura média de 5 cm. A supressão final d'água ocorreu em R6 (15 dias após pleno florescimento) para todos os tratamentos. A porosidade total e a capacidade de campo foram determinadas segundo a metodologia descrita pela Embrapa (1997). A umidade do solo foi monitorada nos momentos de supressão da irrigação por medidor eletrônico de umidade do solo (Hidrofarm®).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com parcelas subdivididas em faixas, com três repetições. Os métodos de irrigação foram locados nas parcelas principais e as formas de aplicação do N nas subparcelas. Cada unidade experimental ocupou uma área de 7,5 x 22,5 m (169 m²), sendo que todas foram entaipadas (altura média de 40 cm) e com entrada de água individual.

3.3 Procedimento experimental

A semeadura do arroz foi realizada no dia 16 de outubro de 2012, na densidade de sementes equivalente a 100 kg ha⁻¹. As sementes, com poder germinativo de 90%, foram tratadas com inseticida fipronil (4g i.a. 10 kg⁻¹ de semente) para controle preventivo da bicheira-da-raiz (*Oryzophagus oryzae*) e com fungicidas thiram e carboxina (2,5 mL kg⁻¹ de semente). Utilizou-se semeadora-adubadora de parcelas com espaçamento de 0,17 m entre linhas. A cultivar utilizada foi a IRGA 424 (ciclo médio, com 132 dias entre a emergência e a maturação fisiológica), pelo sistema de cultivo mínimo (preparo antecipado e semeadura direta). O controle de plantas daninhas foi realizado em pós-emergência, conforme as Recomendações Técnicas da SOSBAI (2012). A adubação de base, com fósforo e potássio, foi realizada considerando expectativa de resposta Muito Alta à adubação (SOSBAI, 2012), sendo que, por ocasião da semeadura, foi aplicado o equivalente a 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O. Em todos os tratamentos, o início da entrada da água foi no estágio V4, logo após a aplicação do herbicida e da primeira adubação nitrogenada de cobertura (SOSBAI, 2012).

3.4 Umidade do solo

O período de irrigação com estabelecimento de lâmina contínua de água compreendeu a 99, 85 e 69 dias nos tratamentos com irrigação contínua (T1), uma supressão (T2) e duas supressões (T3), respectivamente. O T1 permaneceu com lâmina de água desde o V4 (início da irrigação) até o R6 (supressão final). Devido à ocorrência frequente de precipitações no ano agrícola 2012/13 (Figura 3), o solo permaneceu úmido nos períodos onde foram realizados os ciclos de intermitência, principalmente no segundo ciclo. Assim, na primeira supressão, o T2 e o T3 alcançaram umidades médias de 24,5 e 23,8 %, respectivamente. Já na segunda supressão do T3, a umidade do solo não baixou até a capacidade de campo (30%).

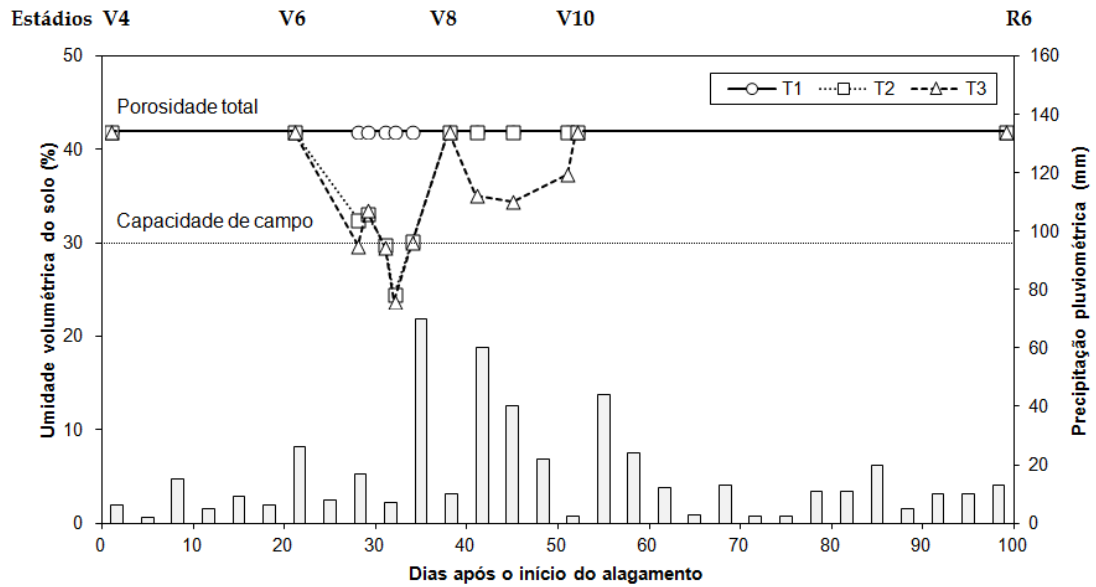


Figura 3. Umidade volumétrica do solo ao longo do período de avaliação nos sistemas de irrigação contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3). As barras verticais indicam a precipitação pluviométrica ocorrida no período.

4. ESTUDO 1 - ATRIBUTOS QUÍMICOS DA SOLUÇÃO DO SOLO AFETADOS PELO MANEJO DA IRRIGAÇÃO

4.1 Introdução

O Rio Grande do Sul é responsável por mais de 67,5 % da produção brasileira de arroz (CONAB, 2013). Embora o arroz seja produzido em vários lugares do mundo, as exigências físicas de um solo apto para seu desenvolvimento são limitantes para algumas regiões (FAO, 2013). No RS, os solos encontrados nas planícies de rios e lagoas (solos de várzea), onde é feito o cultivo do arroz irrigado, representam cerca de 20% da sua área total. Entretanto, apenas um terço de toda a área é efetivamente cultivada com arroz irrigado, devido principalmente à disponibilidade limitada de água para as lavouras (Pinto et al., 2004).

Na produção de arroz no RS, o sistema de irrigação utilizado é o de inundação, com manutenção de lâmina de água contínua por um período médio de 80 a 100 dias, dependendo do ciclo da cultivar. Conforme o regime de precipitação pluvial e o gerenciamento dos mananciais hídricos, extensas áreas, principalmente nas regiões arrozeiras gaúchas denominadas Fronteira Oeste e Campanha, são afetadas pela escassez de água durante o ciclo da cultura, o que normalmente ocorre no período reprodutivo, justamente o mais sensível ao déficit hídrico (Yoshida, 1981). Além disso, nas regiões urbanas há frequente conflito de interesse no uso dos recursos hídricos, especialmente nas bacias hidrográficas dos rios Gravataí e Sinos, o que gera desgaste da imagem da orizicultura frente à opinião pública, principalmente em épocas de estiagem. Um método utilizado ocasionalmente em anos de déficit hídrico, como os afetados pelo fenômeno “La Niña”, é a irrigação intermitente. Este consiste na

alternância de ciclos de irrigação e supressão da água na lavoura, preservando os recursos hídricos, com manutenção da área de semeadura na propriedade.

No cultivo do arroz irrigado, ao ser estabelecida a lâmina de água passam a ocorrer diversas alterações no solo, pela modificação de suas características físicas, químicas, biológicas e eletroquímicas (Sousa et al., 2010). Após a submersão do solo, o oxigênio molecular é reduzido rapidamente, devido à sua utilização pelos microrganismos aeróbios em seus processos biológicos (Camargo et al., 1999). Na ausência do O_2 , os microrganismos anaeróbios obrigatórios ou facultativos utilizam os compostos oxidados inorgânicos (respiração anaeróbia) e orgânicos (fermentação) como receptores de elétrons. Na respiração anaeróbia, as formas oxidadas ganham elétrons e consomem H^+ , liberando formas reduzidas do elemento e H_2O . Assim, após alguns dias em hipoxia ocorrem mudanças em características na eletroquímica da solução do solo, como o aumento do pH e a diminuição do Eh (Griebeler et al., 2010). O pH interfere na presença e disponibilidade de nutrientes e elementos tóxicos na solução. Já a diminuição do Eh indica a diminuição da disponibilidade de elementos oxidados, que seguem a sequência termodinâmica de redução: O_2 , NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} , SO_4^- (Camargo et al., 1999). Com a depleção do O_2 e do nitrato, o manganês e o ferro são solubilizados, mobilizando outros cátions, como cálcio e magnésio para a solução do solo (Sousa et al., 2010; Griebeler et al., 2010), aumentando a CE da mesma. Além disso, na condição de inundação, com a redução, o aumento do pH e a solubilização do ferro, o fósforo que estava quimissorvido tem sua concentração aumentada na solução, tornando-se mais disponível para o arroz (Ponnamperuma, 1977; Silva et al., 2008).

A irrigação intermitente afeta a dinâmica, eletroquímica e a disponibilidade dos nutrientes do solo. Os ciclos de redução são caracterizados pelo decréscimo do Eh e aumento do pH e Fe^{2+} , apresentando o processo inverso no ciclo de oxidação (Thompson et al., 2006). Com o aumento do pH, a carga líquida negativa do solo aumenta (Guilherme et al., 2000), afetando a especiação e a disponibilidade dos íons (Meurer e Anghinoni, 2010), apresentando variações conforme o estado do solo. Esses ciclos afetam a cristalinidade dos óxidos (Thompson et al., 2006; Sousa et al., 2004), alterando a biodisponibilidade do P (Guilherme et al., 2000). Uma consequência positiva

desse manejo de água é a diminuição na concentração de Fe^{2+} na solução (Scivittaro e Gomes, 2007), o qual é menos absorvido pelas plantas (Jaeger et al., 2013b), mitigando sua toxidez ao arroz irrigado. Com a precipitação do Fe^{2+} na reoxidação do solo, esse manejo tende a causar a diminuição da concentração de cálcio e magnésio na solução, pela readsorção dos cátions aos sítios de troca do solo (Buss et al., 2011). Assim como o Ca^{2+} e Mg^{2+} , o K^+ e o NH_4^+ também são afetados por esse manejo, pelo fato de serem cátions de menor valência. Além disso, os ciclos intermitentes interferem na dinâmica do N, modificando o ambiente ao favorecer o maior ou menor desenvolvimento das bactérias envolvidas no ciclo do N no solo (Reddy e Patrick, 1974). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as características eletroquímicas e a dinâmica de nutrientes na solução do solo, em diferentes sistemas de irrigação.

4.2 Material e métodos

A descrição e a caracterização deste experimento foram apresentadas no item 3. Para a extração da solução do solo foram instalados coletores nas subparcelas onde foi aplicado o N em duas vezes. Para isto, coletores individuais foram inseridos no solo antes do alagamento na profundidade de 10 cm. Eles consistiram de tubos de polietileno com 0,7 cm de diâmetro perfurado com duas fileiras de pequenos orifícios de aproximadamente 1 mm de diâmetro [adaptado de Sousa et al. (2002)]. Esses tubos foram revestidos com tela de *nylon* (malha de 400 mesh) ao longo de toda porção perfurada e amarrados com linha de *nylon* na forma de um espiral. Aos coletores foi afixada uma fina mangueira, que se estendeu por aproximadamente 80 cm acima da superfície do solo, em uma estaca de madeira. A abertura da extremidade superior da mangueira foi fechada com auxílio de palitos de madeira, para impedir a difusão do oxigênio. As coletas de solução foram realizadas com seringas plásticas aos 21, 35, 52 e 61 dias após o início do alagamento (DAA), nos estádios de desenvolvimento V6, V8, V10 e R2, respectivamente.

O potencial redox (Eh) foi avaliado mediante leitura direta por meio de eletrodo específico de platina Ag/AgCl, imediatamente após a coleta da

solução. O valor obtido foi corrigido ao potencial-padrão do eletrodo de referência (calomelano), de acordo com a fórmula descrita por Sousa et al. (2009):

$$E_h = E_{h_{\text{medido}}} + 250 \text{ mV} \quad (1)$$

Após a coleta, a solução foi transferida para recipientes e levada ao laboratório. Logo após estabilização da temperatura, realizou-se avaliação mediante leitura direta, do pH e da condutividade elétrica (CE), por meio de eletrodos específicos. As amostras foram acidificadas e armazenadas para a posterior análise dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} por absorção atômica, K^+ por fotometria de chama, NH_4^+ em destilador de arraste de vapor semi-micro Kjeldahl (Tedesco et al., 1995); e H_2PO_4^- por colorimetria (Murphy e Riley, 1962).

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativa ($p < 0,10$), as médias foram comparadas pelo teste t de Student ($p < 0,10$). Os modelos estatísticos a seguir foram utilizados para a ANOVA, para as variáveis eletroquímicas e concentração de nutrientes da solução do solo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + E_j + \text{Erro a (ij)} + I_k + \text{Erro b (ik)} + E_j I_k + \text{Erro c (ijk)} \quad (2)$$

Onde: μ = média geral do experimento; B = blocos ($i = 1, 2, 3$); E = estágio de desenvolvimento ($j = 1, 2, 3, 4$); I = irrigação ($k = 1, 2, 3$); e Erro = erro experimental.

Os resultados foram ilustrados em gráficos de linhas quando apresentaram interação entre o manejo de irrigação e a época de coleta, e em gráficos de barras, o efeito principal com as médias quando não houve interação.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Eletroquímica da solução do solo

Na primeira coleta de solução do solo (21 DAA) (Figura 4), o manejo da irrigação não resultou em diferenças no potencial redox (E_h). Isso era

esperado, pois até aquele momento, todos os tratamentos haviam permanecido com a lâmina de água.

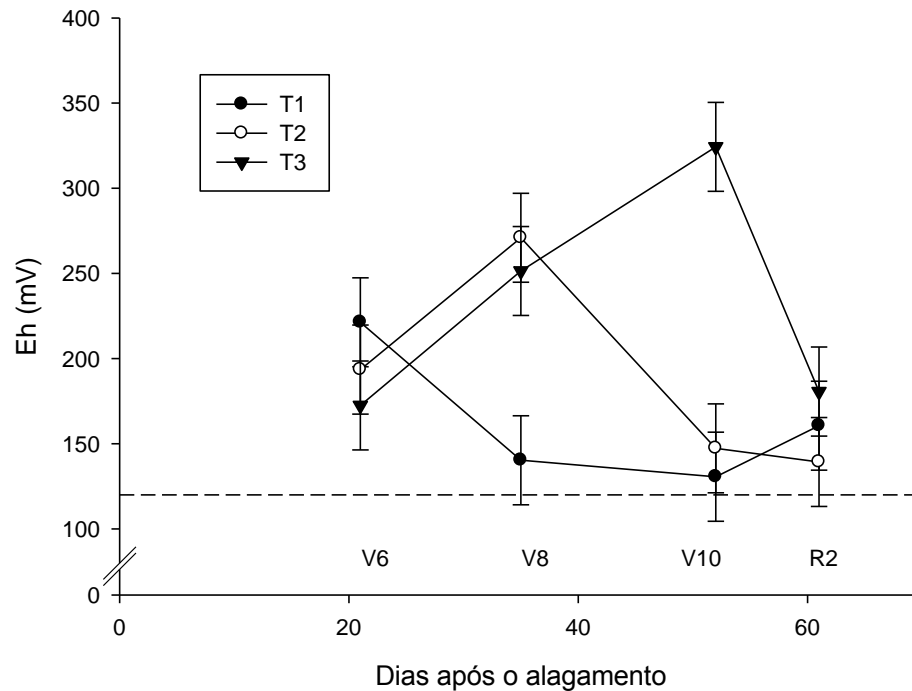


Figura 4. Potencial redox (Eh) da solução do solo ao longo do período de avaliação, nos sistemas de irrigação: contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2); e, supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3). As barras verticais representam a DMS pelo teste T ($p < 0,10$). (- - -) efeito tamponante do Eh pelo ferro em solução.

No estágio V8 (35 DAA), o Eh foi maior ($p < 0,10$) entre os tratamentos que foram submetidos à supressão (T2 e T3), em relação à irrigação contínua (T1). Como o Eh mede a disponibilidade de elétrons envolvidos no sistema redox (Camargo et al., 1999), ou seja, a intensidade de redução da solução do solo (Sousa et al., 2009), o aumento observado no T2 e T3 resulta da reoxidação do solo. Em V10 (52 DAA), os tratamentos T1 e T2 diferenciaram-se do T3, comprovando a reoxidação do solo, embora a umidade do solo no T3 não tenha alcançado a umidade da CC na segunda intermitência (V8-V10).

O T1 apresentou Eh de 221 mV no estágio V6, diminuindo e estabilizando a partir de V8 entre 131 e 161 mV. Os menores valores de Eh neste tratamento indicam que o estado de redução do solo foi maior ($p < 0,10$), em comparação aos demais tratamentos. Com os ciclos de supressão, nos tratamentos T2 e T3, houve reoxidação do solo, diferenciando-se ($p < 0,10$) do

T1. Na segunda supressão, no estágio V10, o Eh no T3 aumentou em relação ao estágio anterior e diferenciou-se dos demais tratamentos, caracterizando os ciclos aeróbios e anaeróbios do solo. O estado de redução é caracterizado pelo decréscimo do Eh e aumento do pH e do teor de Fe^{2+} da solução do solo, e no ciclo de oxidação, ocorre o inverso (Thompson et al., 2006).

O Eh é tamponado em torno de 120 mV, quando o elemento que está sendo reduzido em maior quantidade é o ferro (Vahl e Souza, 2004; Sousa et al., 2009). Como os elementos reduzidos estão em equilíbrio com o potencial redox, quando os mesmos são extraídos ou precipitam, é realizada a reposição dos íons da fase sólida à solução do solo, devido ao tamponamento (Sousa et al., 2009). A quantidade de ferro de baixa cristalinidade presente no solo foi avaliada por Gonçalves et al. (2011), com teor de ferro extraído com oxalato de amônio de $0,28 \text{ g kg}^{-1}$, com ajuste do pH para 6,0 (Fe_{ox6}). Com este teor de Fe_{ox6} , a ocorrência de toxidez por ferro na lavoura é classificada como de “Alto risco” (SOSBAI, 2012), já que a saturação da $\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$ por Fe^{2+} (PSFe^{2+}) é de 57 %. No entanto, Silva e Ranno (2005) observaram em solo sob irrigação contínua, aumento no teor de ferro até os 22 DAA e posterior diminuição devido ao aumento do pH, o qual diminui a solubilidade dos compostos de ferro. Mesmo assim, Jaeger et al. (2013a) verificaram resposta no rendimento de grãos do arroz irrigado ao realizar a supressão da irrigação, em relação à contínua. Isto, provavelmente seja devido à oscilação do Fe^{2+} , que aumenta nos ciclos de redução e diminui nos ciclos de oxidação do solo (Thompson et al., 2006). Além disso, Jaeger et al. (2013b) constataram maior acúmulo de ferro no tecido vegetal, de uma variedade de arroz suscetível à toxidez por ferro, com irrigação contínua em comparação ao manejo com um ciclo de intermitência (V6-V8).

Ao ser reinundado, as mudanças eletroquímicas do solo foram mais acentuadas, tanto no decréscimo do Eh quanto o aumento do pH (Figuras 4 e 5). Conforme Ponnampereuma (1972), a quantidade e a velocidade em que os óxidos são reduzidos dependem, entre outros fatores, da proporção de óxidos cristalizados e amorfos. Além das bactérias redutoras de Fe^{3+} do solo apresentarem preferência pelas formas de ferro mal cristalizadas (Munch e Ottow, 1980), o carbono orgânico dissolvido favorece inicialmente a formação

de complexos orgânicos com Fe e interação com óxidos de ferro mal cristalizados (Thompson et al., 2006).

O pH-H₂O inicial do solo da área experimental era de 4,2 na camada de 0 a 20 cm, representando valor de interpretação “Muito baixo” (SBCS/NRS, 2004). Entretanto, devido ao alagamento, observou-se aumento na primeira coleta (21 dias de alagamento), com valores em torno de 6,0, sem diferença entre os tratamentos (Figura 5). Esse aumento era esperado devido ao consumo dos prótons H⁺ na redução dos elementos anteriormente oxidados (Ponnamperuma, 1977). Em contrapartida, a dissociação do CO₂ na água tende a diminuí-lo, pela formação de H₂CO₃ (Sousa et al., 2009). Na primeira supressão, quando o solo foi reoxidado, observou-se que o pH do T2 e do T3 decresceu a valores em torno de 5,5, diferenciando-se da irrigação contínua (Figura 5). A supressão da irrigação causa a reoxidação do solo, conforme demonstrado pelos dados de Eh (Figura 4), havendo a liberação de prótons, com conseqüente diminuição do pH. Para SOSBAI (2012), a calagem somente se justifica se o pH-H₂O do solo for menor que 5,5 e a saturação por bases menor que 65%. No sistema de intermitência, mesmo que a supressão de água coincida com o início da DPF, as condições de acidez foram adequadas ao crescimento das plantas.

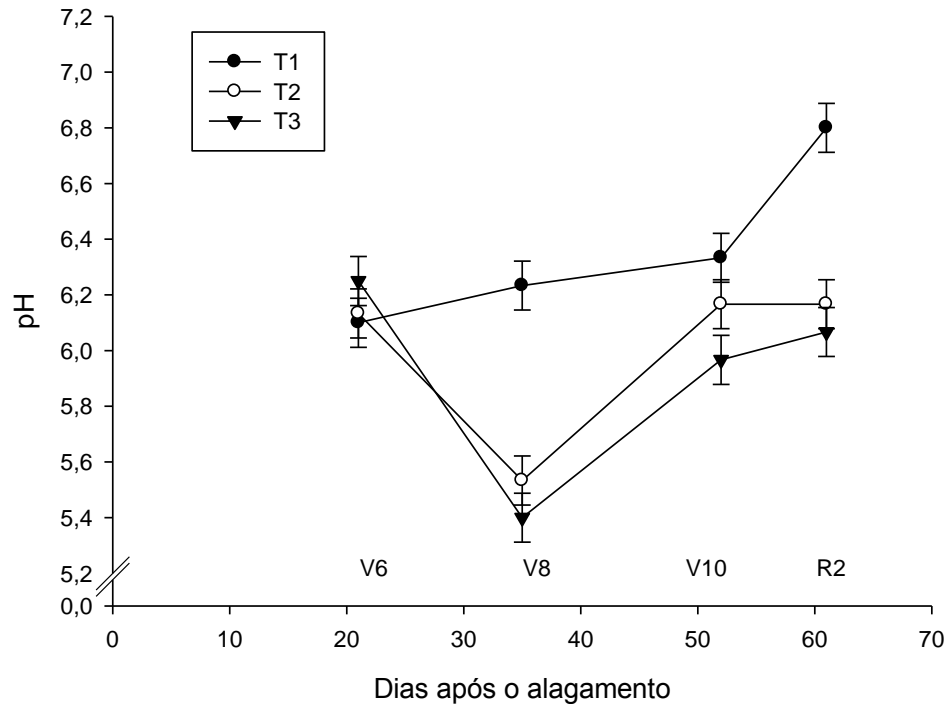


Figura 5. pH na solução do solo ao longo do período de avaliação, nos sistemas de irrigação contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3). As barras verticais representam a DMS pelo teste T ($p < 0,10$).

No T3, ao se realizar a reinundação do solo após V10, o pH aumentou para em torno de 6,0. No entanto, diferenciou-se do T1 e T2 que já estavam com o solo alagado a 52 e 17 dias, respectivamente. Esse comportamento pode ser devido à dinâmica da decomposição e liberação de N dos resíduos da pastagem hiberna. Previamente ao alagamento, o solo estava oxidado e a forma de N predominante, provavelmente, era o nitrato, pois os microorganismos rapidamente oxidam o N amoniacal, se houver energia (Cantarella, 2007) e condições adequadas de pH pela liberação de H^+ no processo. Por isto, a presença do nitrato retarda o aumento do pH (Ponnamperuma, 1972). No momento em que se retomou a irrigação, após a supressão, os resíduos provavelmente se encontravam em estágio mais avançado de decomposição. Assim, a nitrificação pode ter sido menor na reoxidação do solo, intensificando as mudanças de pH nos sistemas de supressão após a inundação.

Com 61 dias de alagamento, no T1, o valor de pH chegou a 6,8 (Figura 5). Este foi o maior valor de pH ao longo do período avaliado e diferiu dos

tratamentos submetidos à supressão. Em solos ácidos, onde os óxidos de Fe são os principais oxidantes, apresentando maior efeito que a dissociação do CO_2 e ocasionando o aumento do pH até próximo a 7,0 (Sousa et al., 2009), esta reação também é denominada “autocalagem” (Scivittaro e Machado, 2004). Entretanto, Borin et al. (2013) encontraram, em casa de vegetação, valores de pH mais baixos, em torno de 5,5, e sem diferença ($p < 0,05$) entre os diferentes sistemas de irrigação, para o mesmo solo, nesse estágio. Para Silva e Ranno (2005), em um determinado valor, o aumento do pH pode diminuir a disponibilidade de ferro, pela menor solubilidade do elemento. Segundo Sousa et al. (2010), o pH ideal para o arroz é 6,6, onde são favorecidas as reações de liberação de N e P; as concentrações de Cu, Fe, Mn e Zn são adequadas e os elementos potencialmente tóxicos estão abaixo dos teores de fitotoxicidade. No período de maior exigência da planta, a irrigação contínua foi o tratamento que apresentou pH mais próximo do “ideal”.

Para Ponnampereuma (1972), o aumento do pH influencia a liberação de P em solos ácidos pela hidrólise de fosfatos de ferro e de alumínio e liberação do fósforo sorvido às argilas silicatadas e óxidos, por complexos de esfera interna. O solo do presente estudo é composto por óxidos de Fe e Mn (Gonçalves et al., 2011), caulinita, quartzo, óxidos de Ti, e argilominerais 2:1 (Fraga et al., 2009). Segundo Meurer et al. (2010b), os óxidos e a MOS são partículas que apresentam cargas dependentes de pH e apresentam o ponto de carga zero (PCZ) entre 6,5-9,5 e 3,0, respectivamente. Com o aumento do pH, os óxidos diminuem a carga líquida positiva da superfície da partícula e a MOS aumenta a carga líquida negativa, contribuindo para o aumento da capacidade de troca de cátions (CTC). A MOS contribui com a CTC do solo devido à sua natureza e ao pH do solo ser superior ao PCZ (Silva et al., 2010). No entanto, a solução do solo tende a um equilíbrio químico com a fase sólida, regido pelas constantes de dissociação e diluição, além da atividade dos íons na solução (Raij, 2011). O pH, ao influenciar as cargas do solo e as espécies dos elementos, altera as reações de equilíbrio e seu aumento influencia a dinâmica e a disponibilidade dos nutrientes de formas diferentes entre os sistemas de irrigação, conforme será abordado posteriormente na discussão desse trabalho.

Em relação à condutividade elétrica (CE) da solução do solo, como não houve interação entre os fatores, foram apresentados os efeitos principais da influência dos períodos de coleta (Figura 6A) e dos sistemas de irrigação (Figura 6B) sobre esse atributo. Independentemente do sistema de irrigação, houve decréscimo dos valores ao longo do período de estudo. A CE apresentou, no estágio de desenvolvimento V6, valor médio de $0,763 \text{ mS cm}^{-1}$, diminuindo 14 dias após, já na segunda coleta. Nas primeiras semanas de alagamento do solo, além das plantas ainda estarem em fase inicial de desenvolvimento (baixa taxa de absorção), devido à redução dos compostos inorgânicos aceptores de elétrons ocorre a mobilização dos íons para a solução do solo, com consequente aumento da CE (DeDatta, 1981). Após a depleção do oxigênio e do NO_3^- pelos microorganismos, o Fe^{3+} e Mn^{4+} são reduzidos e solubilizados a Fe^{2+} e Mn^{2+} , respectivamente (Camargo et al., 1999). Aliado à inibição da nitrificação, ocorre também o acúmulo de NH_4^+ (Buresh et al., 2008). Com isso, a solução apresenta um acréscimo na concentração dos íons, desequilibrando o meio e deslocando os outros cátions, por ação de massa, das cargas negativas da fase sólida do solo para a solução (Meurer e Anghinoni, 2010). Esta apresentou a mesma dinâmica da descrita por Camargo et al. (1999), a qual aumenta e estabiliza. O decréscimo neste trabalho também pode ser atribuído ao desenvolvimento da planta de arroz ao longo do período. Borin et al. (2013) atribuíram o decréscimo da CE à contribuição dos óxidos de ferro, que com o aumento do pH diminuem a carga líquida positiva e ao aumento da carga líquida negativa pela influência do pH na MOS, apresentando maior CTC e retendo mais cátions.

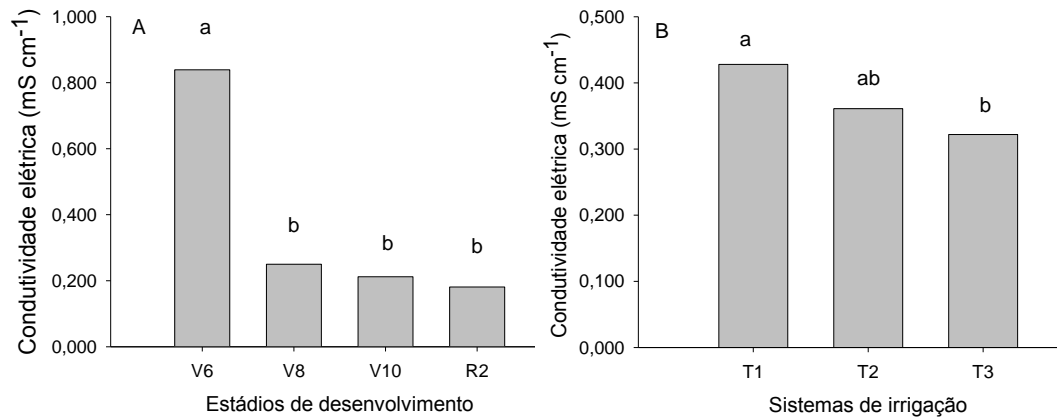


Figura 6. Condutividade elétrica (CE) na solução do solo em função do estágio de desenvolvimento do arroz (A) e do sistema de irrigação (B). T1: Irrigação contínua; T2: supressão entre V6-V8; T3: supressão entre V6-V8 e V8-V10. Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo Teste t ($p > 0,10$).

Independentemente do estágio de desenvolvimento do arroz, a CE no T1, que permaneceu 61 dias consecutivos sob inundação, não diferiu do T2 (supressão da irrigação por 14 dias) (Figura 6B). No entanto, no T3 (14 + 17 dias sem entrada de água), a CE foi menor em relação ao T1, indicando menor disponibilidade de nutrientes para as plantas na solução do solo. Quanto maior o déficit hídrico, os nutrientes estarão menos disponíveis. A concentração dos íons na solução do solo está em equilíbrio com a concentração trocável, na fase sólida, cujos teores são consideravelmente maiores (Sousa et al., 2009). Além da menor quantidade de água para as plantas nos tratamentos submetidos à supressão da irrigação, a reoxidação do solo causa a precipitação do ferro e, ao diminuir o pH, modifica a especiação dos elementos da solução do solo e, conseqüentemente, a sua disponibilidade (Meurer e Anghinoni, 2010).

A partir da concentração de íons na solução do solo, foi possível estabelecer uma regressão entre a soma dos mesmos com a CE (Figura 7). Para cada mg L⁻¹ de nutrientes extraído da solução, a CE decresceu na ordem de 0,005 mS cm⁻¹. Os nutrientes, assim como a CE, apresentaram a mesma tendência de diminuição ao longo do período de desenvolvimento do arroz. Silva et al. (2003), em experimento realizado em um planossolo, constataram que a absorção de nutrientes pelas plantas de arroz diminui a concentração de

todos os elementos avaliados na solução do solo (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} e P^-).

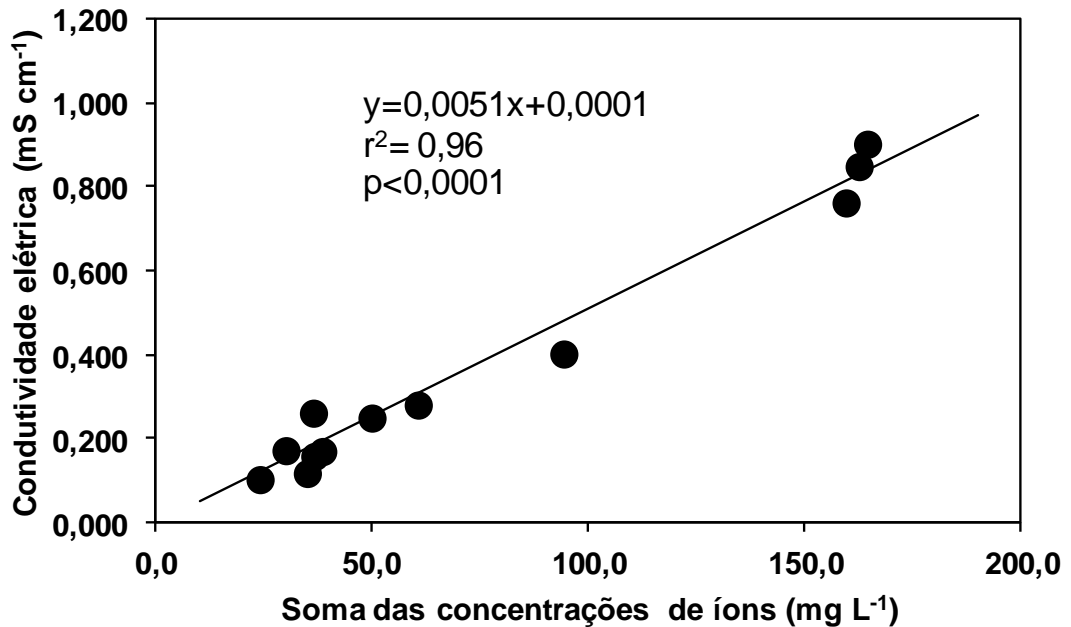


Figura 7. Condutividade elétrica em função da soma das concentrações de íons ($N-NH_4^+$, P^- , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) de cada sistema de irrigação, ao longo do ciclo do arroz.

4.3.2 Amônio na solução do solo

Na primeira coleta de solução do solo, aos 21 DAA, os teores de NH_4^+ na solução do solo foram maiores dentre todas as épocas avaliadas (cerca de 35 mg L^{-1}), não diferindo entre os tratamentos de irrigação (Figura 8). A maior concentração do NH_4^+ na solução, no início do alagamento, era esperada devido ao seu acúmulo pelas condições desfavoráveis à nitrificação pela anaerobiose do meio (Cantarella, 2007; Buresh et al., 2008). Além disso, a taxa de absorção de N pelas plantas ainda era baixa nesse período inicial de desenvolvimento.

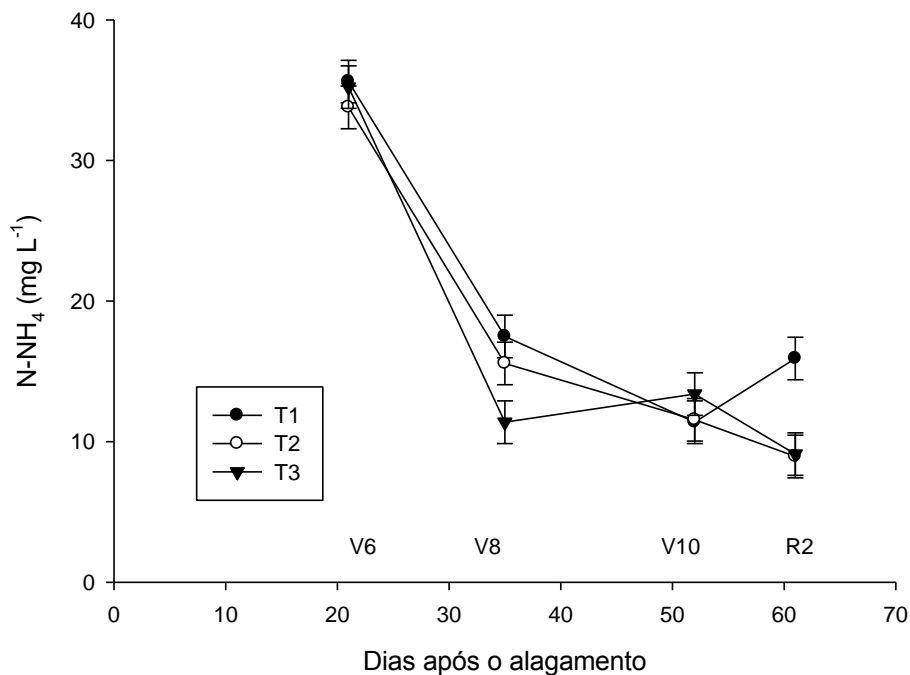


Figura 8. Teor de amônio na solução do solo ao longo do período de avaliação, nos sistemas de irrigação: contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10. As barras verticais representam a DMS pelo teste T ($p < 0,10$).

No estágio de desenvolvimento V8, aos 35 dias do início do alagamento, verificou-se diminuição dos teores de NH_4^+ em todos os tratamentos (Figura 8). Além do crescente desenvolvimento da planta, o que aumenta a absorção de nutrientes, o material orgânico (majoritariamente azevém), que fora recentemente incorporado, proporcionou aumento de C orgânico dissolvido, o qual estimula a desnitrificação (Paul e Beauchamp, 1989). No solo alagado, a proximidade entre a camada superficial e a rizosfera (ambas oxidadas) e a região anaeróbia (Sousa, et al., 2010) facilita as perdas pelo processo de nitrificação-desnitrificação (Liu et al., 2010). Entretanto, as perdas que ocorrem na rizosfera do arroz em solo alagado são altas apenas se a absorção de NO_3^- pelas raízes for insuficiente, ou seja, se houver NO_3^- disponível para os microrganismos desnitrificadores (Eriksen et al., 1985).

Nesse mesmo estágio de desenvolvimento do arroz, após a retomada da irrigação, o T3 apresentou menor concentração de amônio na solução, em comparação ao T1 e ao T2 (Figura 8). Nesse sentido, a reoxidação do solo promoveria a nitrificação e, com novo alagamento, o N seria perdido por

desnitrificação. Esperava-se, entretanto que não houvesse diferença entre os tratamentos T2 e T3, o que não foi observado.

A supressão da irrigação cria ambiente aeróbio, propício à nitrificação. A retomada da inundação após um período drenado favorece a percolação do NO_3^- e, logo após, o processo de desnitrificação (Eriksen et al., 1985). Embora as perdas por volatilização sejam diminuídas com a aplicação da ureia em solo seco e imediata inundação e manutenção da lâmina de água (Buresh et al., 2008; Knoblauch, 2012), as perdas de N por desnitrificação aumentam nos sistemas de irrigação intermitente, em relação à irrigação contínua (Eriksen et al., 1985). Isso também foi verificado por Liu et al. (2010), que observaram picos de emissão de N_2O após o re-estabelecimento da lâmina de água em solo anteriormente drenado. Deve-se considerar, entretanto, que em condições de estresse hídrico, a nitrificação pode ser afetada, devido ao comprometimento de bactérias que apresentam intolerância a baixos teores de umidade, como as *Nitrosomonas*. Some-se a isso a maior tolerância ao estresse hídrico de bactérias amonificantes (*Clostridium* e *Penicillium*), que podem acumular ainda maior quantidade de NH_4^+ (Voroney, 2007).

O aumento do NH_4^+ não foi observado na profundidade de 10 cm, nos sistemas de irrigação intermitente, nos estádios subsequentes (Figura 8). Isso pode ser explicado pelo fato da difusão do NH_4^+ ser lenta, levando 16 dias para chegar a 10 cm de profundidade (Eriksen et al., 1985). A diminuição do NH_4^+ em profundidade pode ser também explicada, além da influência das plantas, pela adsorção ao solo ou perdas por volatilização (Hongprayoon et al., 1991). Esperava-se que com a adubação nitrogenada a lanço e posterior inundação, houvesse a dissolução e hidrólise da ureia com a incorporação do NH_4^+ em profundidade. Segundo Cantarella (2007), a incorporação do N permite reduzir as perdas por desnitrificação, volatilização de NH_3 e por arraste de N pelas águas de inundação. Adicionalmente, de 43 a 56 % das raízes do arroz irrigado encontram-se na camada superficial de 0 a 5 cm (Abichequer, 2004; Lopes et al., 1994). No início do desenvolvimento, o arroz aprofunda suas raízes para garantir o suprimento de água, ultrapassando os 20 cm de profundidade. Após o início da irrigação há aumento acentuado das raízes na camada superficial, principalmente de 0 a 5 cm (Lopes et al., 1994).

A irrigação contínua resultou em aumento no teor de NH_4^+ na solução do solo em R2 (Figura 8), diferenciando-se dos demais tratamentos. Tal fato pode ser atribuído à difusão retardada do NH_4^+ (por não haver incorporação N pelo alagamento do solo), à influência do pH e/ou à fermentação. Isto corrobora com Pcojeski (2011), que verificou aumento na concentração de NH_4^+ na solução do solo quando permaneceu alagado em relação ao solo úmido. Neste período, com o aumento do pH na irrigação contínua (Figura 5), aos 61 dias de alagamento (R2), esperavam-se menores teores de NH_4^+ devido as perdas por volatilização ou absorção do nutriente pelas raízes pela sua distribuição superficial. Eriksen et al. (1985) verificaram que os maiores valores de pH coincidiram com as maiores concentrações de NH_4^+ na solução do solo e as maiores perdas de NH_3 por volatilização, sendo que a aplicação de ureia em cobertura auxiliou no aumento do pH. Esse aumento de pH proporciona maior disponibilidade de N devido ao incremento da atividade de bactérias mineralizadoras de compostos orgânicos (Fageria et al., 2009). Além disso, a fermentação é intensificada com o aumento do período de alagamento do solo, aumentando a atividade microbiana, alcançando valores máximos duas a quatro semanas após o alagamento (Sousa et al., 2009). As bactérias fermentativas contribuem com o balanço positivo de NH_4^+ na solução do solo alagado pela redução dissimilatória do nitrato a amônio (RDNA). Na anaerobiose, nem todo o NO_3^- é perdido por desnitrificação, pois parte desse nitrato é reduzido a NH_4^+ pela RDNA (Paul e Beauchamp, 1989). A RDNA é realizada por alguns grupos de bactérias metanogênicas estritamente anaeróbias (Keith e Herbert, 1983). Portanto, a RDNA é baixa devido à maioria do NO_3^- formado na nitrificação no ambiente oxidado ser rapidamente desnitrificado no ambiente adjacente (Reddy e Delaune, 2008), embora o NO_3^- tenha alto coeficiente de difusão (Barber, 1985). Adicionalmente, o pH do solo alagado encontra-se na faixa de pH ideal para a fermentação metanogênica, entre valores de 6,3 a 7,8 (Santos, 2010), sendo que a irrigação contínua apresentou valores nesta faixa por um período maior (Figura 5). Esses valores de pH foram alcançados a partir da DPF, aos 52 dias de alagamento no T1, e somente aos 61 dias foi verificado o aumento do NH_4^+ , provavelmente devido ao sistema radicular oxidado, que interfere no balanço final das reações. Na irrigação contínua, o maior teor de amônio na solução, comparativamente aos

demais tratamentos, é um indicativo de que as perdas foram menores (Figura 8).

4.3.3 Potássio na solução do solo

A concentração de K na solução não apresentou interação entre os fatores, nem diferença significativa ($p < 0,10$) entre os sistemas de irrigação, sendo que o teor do nutriente foi, em média, de 12 mg L^{-1} ao longo de todo o período de desenvolvimento do arroz. A concentração média na solução do solo foi de $40,1 \text{ mg L}^{-1}$ no estágio V6, diminuindo ao longo do tempo a valores considerados baixos, independentemente do sistema de irrigação (Figura 9). Embora o K não seja elemento parte das estruturas orgânicas das plantas (Marschner, 1995), é um dos nutrientes mais demandados pelo arroz (SOSBAI, 2012).

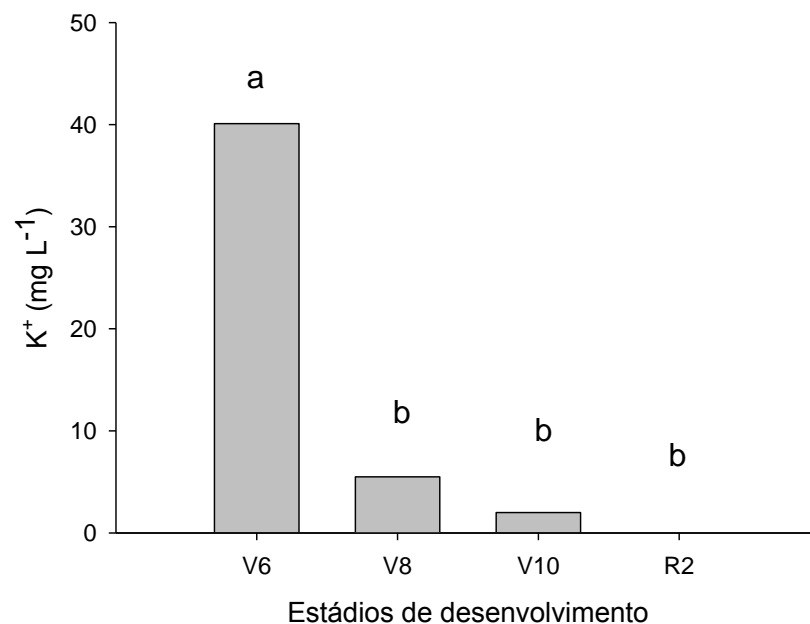


Figura 9. Teores de potássio na solução do solo em diferentes estádios de desenvolvimento do arroz. Estádios seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo Teste t ($p > 0,10$).

A classe de interpretação do teor de K no solo deste estudo foi “Média” e a adubação realizada foi de 90 kg ha⁻¹ de K₂O, para expectativa de resposta à adubação “Muito Alta” (SOSBAI, 2012). Mesmo assim, no estágio R2, onde a concentração de K foi próxima a zero, de fato a demanda pelo nutriente foi tão expressiva que o suprimento pela solução do solo foi menor do que o nível de detecção do aparelho (0,2 mg L⁻¹) (Figura 9), o que também foi verificado em estudos conduzidos por Silva et al. (2003) e Carmona et al. (2010), em solos semelhantes. Para Sanes et al. (2013), o arroz apresenta alta capacidade de absorção de K⁺ e a concentração mínima para absorção varia conforme o genótipo. Os valores de concentração mínimos encontrados no referido trabalho, para variedades de ciclo médio, variaram entre 0,97 e 1,89 μmol L⁻¹. Nesse estágio de desenvolvimento mais avançado, a demanda de K⁺ pela planta é tão intensa que a cinética de reposição do K⁺ trocável que passa para K⁺ na solução do solo é mais lenta do que a taxa de absorção da planta.

Visando assegurar o adequado suprimento de K⁺ e a obtenção de altas produtividades do arroz irrigado, Anghinoni et al. (2013) indicam que a saturação por K na CTC_{pH 7,0} deve estar entre 2,0 e 3,5 %. No solo estudado, a saturação na CTC_{pH 7,0} do K era 1,5 %, abaixo dos valores adequados, sendo este corrigido na adubação. Em três Planossolos do RS, Carmona et al. (2010) verificaram o ápice da depleção do K⁺ na solução do solo (entre o R2 e R4), na camada de maior desenvolvimento das raízes, mesmo apresentando solos com interpretação do teor de K Alto e saturação do K na CTC_{pH7} maior que 2,0 %.

Mesmo que o K disponível (K na solução + K trocável) seja esgotado do solo, ainda assim ocorre a contribuição de K não-trocável (Castilhos e Meurer, 2002; Fraga et al., 2009). Segundo esses autores, esse suprimento é possibilitado pela presença de argilominerais 2:1 nos gleissolos, os quais são fontes prováveis de K. Castilhos et al. (2002) e Fraga et al. (2009), trabalhando com o mesmo solo utilizado neste experimento, verificaram que o K não-trocável contribuiu com 12% do K⁺ absorvido pelas plantas de arroz, aumentando essa contribuição com cultivos sucessivos.

De acordo com a recomendação da SOSBAI (2012), altas doses de fertilizante potássico devem ser parceladas. Isto vai no encontro das constatações de Ávila et al. (2009), que utilizando o sistema de irrigação contínua verificaram maiores perdas de K na água extravasada, em

comparação ao sistema intermitente. Isto também pode estar ocorrendo com outros cátions, como o Fe^{2+} e Mn^{2+} , solúveis na solução do solo. Com o parcelamento, diminuiria o risco de perdas e haveria teores maiores de K^+ disponíveis nos estádios mais avançados da cultura. Santos et al. (1999) verificaram o aumento na quantidade de grãos por panícula e no rendimento de grãos na irrigação contínua e parcelamento do K (50% na semeadura e 50% na DPF), em relação à irrigação intermitente e aplicação de 100% do K na semeadura, respectivamente. Neste trabalho, esperava-se diferenças entre os sistemas de irrigação pela maior atividade radicular das plantas com irrigação intermitente, o que não foi observado. Isto pode ter ocorrido em virtude da adubação potássica ter sido realizada na íntegra no momento da semeadura. Além disso, devido às altas produtividades obtidas, o K^+ pode ser considerado como não limitante (ver Estudo 2).

4.3.4 Cálcio e magnésio na solução do solo

O Ca^{2+} e o Mg^{2+} apresentaram a mesma tendência padrão de decréscimo de concentração que o potássio ao longo do ciclo de cultivo do arroz. Aos 21 dias do alagamento, quando as raízes das plantas ainda eram incipientes, as concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} na solução do solo aumentaram pela dissociação das partículas negativas do solo (Figura 10). Com os ciclos de supressão, as concentrações na solução diminuíram em relação ao T1, devido à reoxidação do solo, observado no T2 e no T3 em V8 e no T3 em V10 (Figura 10). Silva et al. (2003) constataram que, quanto maior a disponibilidade de oxigênio no solo, menor é a intensidade de redução e, conseqüentemente, menor é a liberação de ferro para a solução e menor o seu efeito sobre os teores dos outros cátions que são influenciados indiretamente. No estágio de maior demanda da planta (R2), o Ca^{2+} e Mg^{2+} apresentaram teores que não se diferenciaram entre os manejos de irrigação. Mesmo ao realizar a intermitência de água, logo após algumas semanas do retorno do alagamento, esses nutrientes apresentam-se ainda disponíveis às plantas. O Ca^{2+} e Mg^{2+} são retidos com menor energia na fase sólida do solo, suprem facilmente a solução, e são transportados por fluxo de massa, que segue o fluxo transpiratório da

planta (Novais e Mello, 2007). Além disso, a demanda da planta por esses nutrientes é menor do que outros macronutrientes, como o N e o K (SOSBAI, 2012) e, por isso, são mais afetados pela dinâmica do Eh (Figura 3).

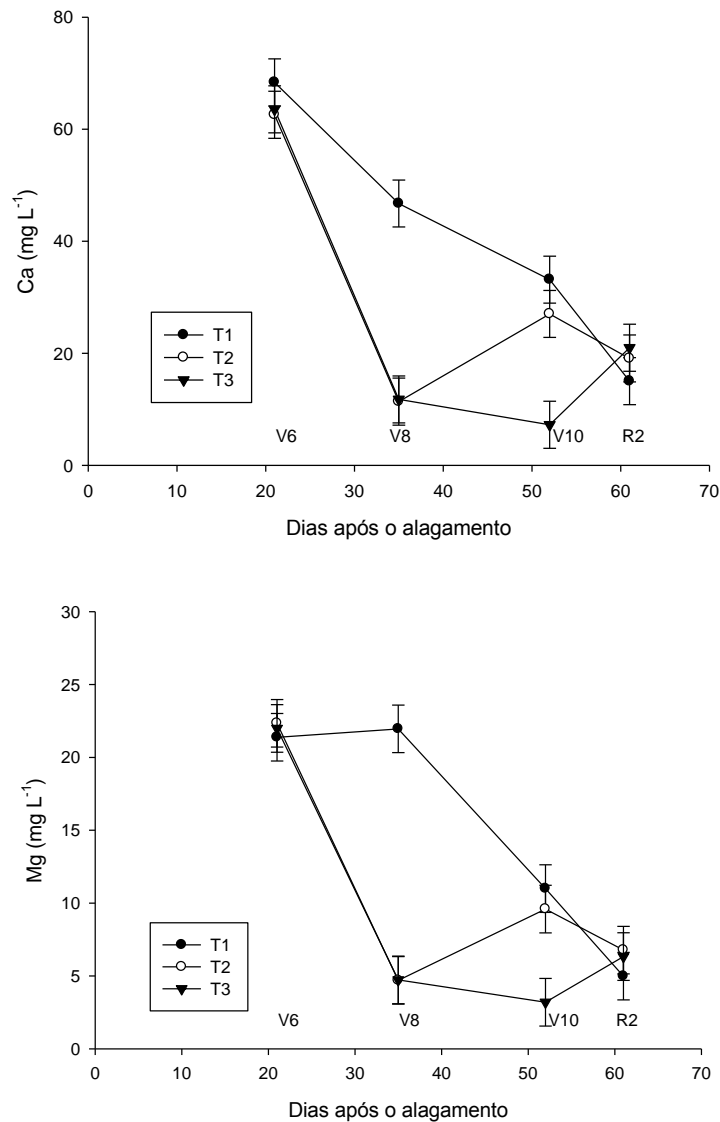


Figura 10. Teores de cálcio (A) e magnésio (B) na solução do solo ao longo do período de avaliação, nos sistemas de irrigação: * contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10. As barras verticais representam a DMS pelo teste T ($p < 0,10$).

4.3.5 Fósforo na solução do solo

Aos 21 dias de alagamento, o P apresentou alta disponibilidade na solução do solo devido à redução e solubilização dos óxidos de ferro e manganês do solo (Sousa et al., 2010). Além disso, foram aplicados 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 na semeadura. No T1, observou-se uma estabilização na disponibilidade do P na solução no estágio reprodutivo, apresentando concentrações maiores que a solução no T2 e no T3 (Figura 11). Gonçalves et al. (2011) observaram em um Planossolo do RS, de mesma origem que o Gleissolo do experimento, uma maior intensidade de liberação de P após o alagamento devido à redução dos óxidos de ferro. No entanto, segundo os mesmos autores, após 45 dias de alagamento, com o aumento do pH houve a formação de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, o qual adsorve o P da solução. Neste trabalho, não foi verificado o efeito da precipitação do ferro após o aumento do pH. Isso é explicado pelos menores teores de ferro de baixa cristalinidade, comparado ao Planossolo (Gonçalves et al., 2011).

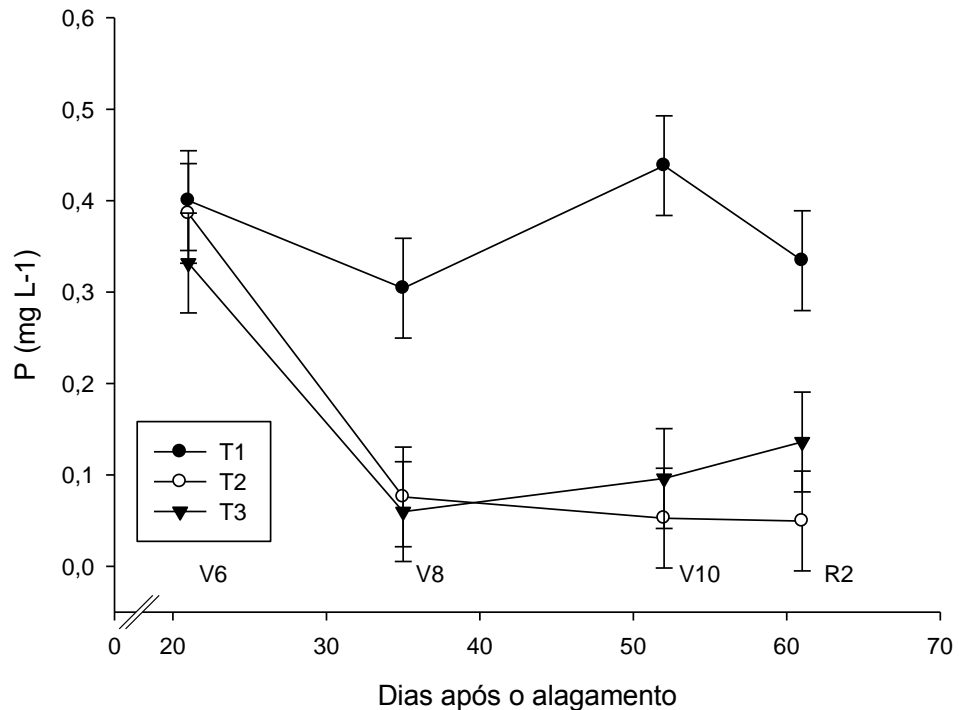


Figura 11. Teor de fósforo na solução do solo ao longo do período de avaliação, nos sistemas de irrigação: contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3). As barras verticais representam a DMS pelo teste T ($p < 0,10$).

Após a primeira supressão de irrigação realizada, no T2 e no T3, o P apresentou menor concentração em relação ao T1 (Figura 11). Este fato era esperado devido à reoxidação do solo, onde o ferro precipita e adsorve o P novamente, podendo tornar o ambiente edáfico severamente deficiente deste nutriente. Ao oxigenar o solo, o P é quimiossorvido e a absorção declina bruscamente (Kirk, 2004). De acordo com Silva et al. (2013), o menor grau de cristalinidade dos óxidos resulta em maior reatividade e maior adsorção de P, requerendo mais tempo para que haja a reoxidação da forma reduzida após a drenagem do solo. Segundo Buresh et al. (2008), a supressão da irrigação incrementa o crescimento radicular. Assim, com dispêndio da parte aérea da planta, a raiz cresce mais, explorando a água armazenada nas camadas mais profundas (Bouman et al., 2007) e, conseqüentemente, os nutrientes. Já para Kirk (2004), na intermitência, as plantas absorvem um terço do P absorvido na irrigação contínua, e essa absorção consiste na solubilização pela excreção

de ânions orgânicos pela planta. O fósforo é um elemento pouco móvel e a absorção é diretamente relacionada com o comprimento radicular (Araújo e Machado, 2006), devido à alta energia de adsorção com a fase sólida do solo e por ser transportado por difusão preferencialmente (Novais e Mello, 2007), dependendo do gradiente de concentração para seu deslocamento.

A estabilização do P na solução do solo, em todos os tratamentos, ocorreu pela reposição do nutriente da fase sólida à solução ter sido suficiente para suprir a absorção das plantas. As supressões da irrigação estabilizaram o teor de P em um patamar inferior: entre 0,05 e 0,14 mg L⁻¹ (Figura 11). Com o alagamento do solo aumentam as concentrações de P na solução, além disso, aumenta o coeficiente de difusão pelo aumento do conteúdo de água e diminuição do poder tampão do elemento no solo (Vahl, 2004). Diversos outros fatores também podem ter contribuído para esta diminuição dos teores: menor aumento do pH pela supressões da água; maior absorção de Fe²⁺ na irrigação contínua; deposição e oxidação de Fe³⁺ na rizosfera; e, aumento de óxidos de ferro amorfos.

Grandes quantidades de ferro oxidado, tanto microbiana quanto quimicamente, resultam na formação e acúmulo de Fe(OH)₃ na rizosfera. A deposição de placa férrica nas raízes, em ambiente de hipoxia, pode ser da ordem de 16 µg de FeOOH mm⁻², maior que em ambiente com aeração (Holzschuh et al., 2010). Além de ser uma barreira física ao influxo de ferro reduzido (Tanaka et al., 1966), pode ser também uma barreira química à absorção de nutrientes (Chen et al., 1980), como os cátions (Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺) e como os ânions (H₂PO₄⁻), por exemplo. Por conterem cargas negativas, os íons fosfato presentes na solução do solo podem ficar adsorvidos à placa férrica, diminuindo a disponibilidade desse nutriente às plantas (Kuo, 1986). Nos Tratamentos 2 e 3, as raízes de arroz eram provavelmente mais desenvolvidas. Por consequência, maior foi o volume de rizosfera oxidado e maior a placa férrica formada no entorno das raízes. Por outro lado, o volume de solo explorado também foi maior, com maiores possibilidades de absorção de P.

Os ciclos de supressão da irrigação nos solos interferem na cristalinidade dos óxidos de ferro. Ciclos alternados favorecem o acúmulo de óxidos de ferro menos cristalinos, mas, se a drenagem persistir, a cristalinidade aumenta lentamente (Sousa et al., 2004). Por outro lado, Thompson et al.

(2006) observaram que vários ciclos de supressão da irrigação promovem transformações nos minerais, tornando os óxidos de ferro mais cristalinos. Guilherme et al. (2000), afirmam que ciclos alternados de irrigação diminuem a cristalinidade dos óxidos e aumentam a capacidade máxima de adsorção de P, com exceção dos solos recentemente adubados com P, como no caso do presente estudo. Desta forma, a cristalização dos óxidos não depende de um único fator, devendo-se levar em conta a duração do período entre alagamentos e da supressão, quantidade de supressões, umidade, mineralogia e composição do solo.

Considerando que a demanda da planta pelo P é menor em relação aos outros macronutrientes (SOSBAI, 2012), no período de maior demanda nutricional, não ocorreu a depleção do P na solução nos sistemas de irrigação intermitente, mesmo em menores patamares em relação à irrigação contínua.

4.4 Conclusões

O potencial redox (Eh) acompanha a dinâmica da irrigação, mantendo maiores valores com a irrigação intermitente, influenciando diretamente na dinâmica do Ca^{2+} e Mg^{2+} e na disponibilidade do H_2PO_4^- e NH_4^+ . Entretanto, a partir do reestabelecimento da lâmina de água, o mesmo diminui a valores similares aos da irrigação contínua.

O pH da solução do solo aumenta com o tempo de inundação do solo e diminui com a supressão da irrigação, porém, após a reinundação do solo, o mesmo aumenta rapidamente, estabilizando-se em valores próximos aos do solo continuamente inundado.

A condutividade elétrica diminui ao longo do tempo de inundação pela absorção dos nutrientes pelas plantas até estabilizar com a reposição da fase trocável do solo. Entretanto, é maior no sistema de irrigação contínua em relação ao sistema com supressão da irrigação por duas vezes.

O potássio, por ser um dos nutrientes mais demandados pelo arroz, independentemente do manejo de irrigação, atinge teores não detectáveis na solução do solo.

5. ESTUDO 2 - RESPOSTA DO ARROZ IRRIGADO AO MANEJO DA IRRIGAÇÃO E FRACIONAMENTO DE NITROGÊNIO

5.1 Introdução

O Rio Grande do Sul é responsável por mais de 67,5 % da produção brasileira de arroz (CONAB, 2013). Os solos encontrados nas planícies de rios e lagoas (solos de várzea) desse estado, onde é feito o cultivo do arroz irrigado, representam cerca de 20% da sua área total. Entretanto, apenas um terço de toda a área é efetivamente cultivada com arroz irrigado, devido, principalmente, à disponibilidade limitada de água para as lavouras (Pinto et al., 2004).

O uso racional dos recursos naturais e insumos agrícolas são algumas das ações que são preconizadas na lavoura, pois beneficiam o produtor e garantem sua sustentabilidade (Menezes et al., 2012). Na produção de arroz no RS, o sistema de irrigação utilizado é o de inundação, com manutenção de lâmina de água contínua por um período médio de 80 a 100 dias, dependendo do ciclo da cultivar. Conforme o regime de precipitação pluvial e o gerenciamento dos mananciais hídricos pelo produtor, extensas áreas, principalmente nas regiões arrozeiras gaúchas denominadas Fronteira Oeste e Campanha, são afetadas pela escassez de água durante o ciclo da cultura, o que normalmente ocorre no período reprodutivo, justamente o mais sensível ao déficit hídrico (Yoshida, 1981). Além disso, nas regiões urbanas, há frequente conflito de interesse no uso dos recursos hídricos, especialmente nas bacias hidrográficas dos rios Gravataí e Sinos, o que gera desgaste da imagem dos orizicultores frente à opinião pública, principalmente em épocas de estiagem. Um método utilizado ocasionalmente em anos de déficit hídrico, como os

afetados pelo fenômeno “La Niña”, é a irrigação intermitente. Esta é uma alternativa para diminuir o consumo de água e otimizar o uso de fertilizantes nitrogenados. Consiste na alternância de ciclos de irrigação e supressão da água na lavoura, preservando os recursos hídricos, com manutenção da área de semeadura na propriedade. Nesse sistema, o estabelecimento da lâmina de água deve ocorrer logo após a aplicação do herbicida e da primeira adubação nitrogenada em cobertura (estádio V4), para evitar a reinfestação de plantas daninhas e obter maior aproveitamento do N aplicado, respectivamente (SOSBAI, 2012).

Em solos alagados, o N é perdido, principalmente, por volatilização e desnitrificação, devido às várias formas em que se encontra no solo e sua rápida transformação (Buresh et al., 2008). As dimensões dessas perdas dependem do manejo da irrigação e do fertilizante utilizado. Com a utilização do sistema de irrigação intermitente, após duas supressões de água, Eriksen et al. (1985) verificaram a incorporação do N pela maior concentração do NH_4^+ na subsuperfície. Além disso, esses ciclos de umedecimento e secagem minimizam as perdas por volatilização, pois a ureia é aplicada no solo seco e o amônio não é perdido na transformação para amônia com a aplicação e posterior alagamento com manutenção da lâmina de água (Buresh et al., 2008; Knoblauch, 2012). Este sistema, ainda beneficia o desenvolvimento de duas comunidades de bactérias (aeróbias e anaeróbias), afetando a decomposição e mineralização do N, ocorrendo maior liberação dos nutrientes contidos nos resíduos culturais (Pocojeski, 2011). No entanto, a intermitência deve ser moderada, pois quanto maior a quantidade de supressões de água realizadas, maior a quantidade de N perdido por desnitrificação (Reddy e Patrick, 1974), devido à reoxidação do solo que beneficia a nitrificação e, com o retorno do alagamento o N é desnitrificado.

Diversos estudos (Toescher et al., 1997; Belder et al., 2004; Scivittaro et al., 2011; Marcolin et al., 2011; Monterle, 2011) demonstraram que a irrigação intermitente não interfere no rendimento de grãos, em comparação ao sistema de irrigação contínua. Entretanto, de acordo com Petry et al. (2011), dependendo da severidade do estresse hídrico, pode haver redução de produtividade, especialmente em função das características de solo. Por isso, a decisão de supressão da água no cultivo deve levar em consideração diversos

aspectos, dentre eles a altura de lâmina de água, a capacidade de retenção de água do solo e as condições meteorológicas (Gomes et al., 2004). A eficiência de uso de nitrogênio (EUN) pelas plantas pode ser um indicador dos efeitos do manejo da água sobre a absorção de N pelo arroz. Nesse sentido, a literatura apresenta resultados controversos (Eriksen et al., 1985; Cabangon et al., 2004; Belder et al. 2005), o que evidencia a necessidade de estudos nas condições edafoclimáticas do Rio Grande do Sul. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta do arroz, pelo rendimento de grãos, a matéria seca, o acúmulo de N no tecido e a eficiência de uso deste nutriente, submetido ao parcelamento da adubação nitrogenada em diferentes sistemas de irrigação.

5.2 Material e métodos

A descrição e a caracterização deste experimento foram apresentados no item 3. Para os objetivos do presente estudo, coletou-se, do meio da parcela, uma linha da parte aérea da planta por subparcela (manejo do N) nos estádios de desenvolvimento V6, R2 (emborrachamento) e R8 (colheita). As amostras foram secas em estufa a 60°C até massa constante, para avaliação da matéria seca e do teor de N no tecido. Em V6 e R2, foram moídos colmos+folhas e, na colheita, separaram-se os grãos do restante da planta, para avaliação do conteúdo de N nos diferentes compartimentos, em destilador de arraste de vapor semi-micro Kjeldahl, conforme a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A partir da matéria seca e do teor de N no tecido, foi possível obter a quantidade de nutriente acumulada nas partes da planta.

O rendimento de grãos foi obtido pela extrapolação da produção obtida em duas subamostras por subparcela, com área útil de 5,1 m² cada, corrigindo-se a umidade para 130 g kg⁻¹. O índice de colheita (IC) foi obtido pela razão entre a matéria seca de grãos e a matéria seca da parte aérea das plantas (folhas, colmos e grãos).

A eficiência do uso de nitrogênio foi obtida para cada método de aplicação do N. As fórmulas utilizadas foram a de recuperação aparente de N (RAN), eficiência agrônômica do uso do N (EAUN) e eficiência agrofisiológica

do uso do N (EAFUN), de acordo com metodologia descrita por Fageria et al. (2007):

$$\text{RAN (\%)} = \frac{\text{ANcf-ANsf}}{\text{QNa}} \times 100, \quad (3)$$

em que ANcf é o acúmulo de N na parte aérea e nos grãos, com fertilizante nitrogenado (em kg); ANsf é o acúmulo de N na parte aérea e nos grãos, sem fertilizante nitrogenado (em kg ha⁻¹); e QNa é a quantidade de N aplicado (em kg ha⁻¹).

$$\text{EAUN (kg kg}^{-1}\text{)} = \frac{\text{PGcf-PGsf}}{\text{QNa}}, \quad (4)$$

em que PGcf é a produtividade de grãos com fertilizante nitrogenado (kg ha⁻¹); PGsf é a produtividade de grãos sem fertilizante nitrogenado (kg ha⁻¹); e QNa é a quantidade de N aplicado (em kg ha⁻¹).

$$\text{EAFUN (kg kg}^{-1}\text{)} = \frac{\text{PGcf-PGsf}}{\text{ANcf-ANsf}}, \quad (5)$$

em que PGcf é a produtividade de grãos com fertilizante nitrogenado (kg ha⁻¹); PGsf é a produtividade de grãos sem fertilizante nitrogenado (kg ha⁻¹); ANcf é o acúmulo de N na parte aérea e nos grãos (kg ha⁻¹), com fertilizante nitrogenado; e ANsf é o acúmulo de N na parte aérea e no grãos (kg ha⁻¹), sem fertilizante nitrogenado.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e quando significativa ($p < 0,10$), as médias foram comparadas pelo teste t de Student ($p < 0,10$). Os modelos estatísticos a seguir foram utilizados para a ANOVA:

a) Rendimento de grãos, matéria seca, IC e acúmulo de N no tecido:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + I_j + \text{Erro a (ij)} + N_k + \text{Erro b (ik)} + I_j N_k + \text{Erro c (ijk)} \quad (6)$$

Onde: μ = média geral do experimento; B = blocos ($i = 1, 2, 3$); I = irrigação ($k = 1, 2, 3$); N = parcelamento do N ($j = 1, 2, 3$); e Erro = erro experimental.

b) Acúmulo de N ao longo do período de desenvolvimento da planta:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + E_j + \text{Error a (ij)} + I_k + E_j I_k + \text{Error b (ijk)} + N_l + \text{Error c (il)} + E_j N_l + I_k N_l + E_j I_k N_l + \text{Error d (ijkl)} \quad (7)$$

Onde: μ = média geral do experimento; B = blocos ($i = 1, 2, 3$); E = estágio de desenvolvimento ($j = 1, 2, 3$); I = irrigação ($k = 1, 2, 3$); N = parcelamento do N ($l = 1, 2, 3$); e Erro = erro experimental.

c) RAN, EAUN, EAFUN:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + N_j + \text{Erro a (ij)} + I_k + \text{Erro b (ik)} + N_j I_k + \text{Erro c (ijk)} \quad (8)$$

Onde: μ = média geral do experimento; B = blocos ($i = 1, 2, 3$); N = parcelamento do N ($j = 1, 2$); I = irrigação ($k = 1, 2, 3$); e Erro = erro experimental.

5.3 Resultados e Discussão

A matéria seca da parte aérea (MS) foi afetada pelo manejo da irrigação e parcelamentos de N. A aplicação de maiores doses de N em fases iniciais proporcionou maior produção de biomassa realizando a irrigação intermitente, devido, provavelmente, às menores perdas do nutriente. A MS, como esperado, não diferiu entre os sistemas de irrigação nas parcelas sem adubação nitrogenada (Figura 12). Nos T2 e T3, a MS foi maior quando o N foi parcelado em 2x. Nesse parcelamento, o T2 não diferiu dos demais tratamentos. Entretanto, no T3, a MS foi maior em relação ao T1. Isso ocorreu, provavelmente porque as maiores quantidades de N aplicadas nas fases iniciais, em solo seco, proporcionaram maior desenvolvimento da parte aérea da planta. No entanto, Santos et al. (1999) verificaram que a irrigação intermitente resulta na emissão tardia de perfilhos, o que poderia comprometer a MS da parte aérea e o fechamento do dossel. Aliada às menores perdas de N com a aplicação e posterior alagamento (em V4), o N absorvido na fase inicial é importante para altas produtividades, pois metade do N acumulado no grão é absorvido até o momento que a lavoura atinge 25% da biomassa final (Sheehy, 1998). Os 25 % da biomassa final foram atingidos, em variedade de ciclo médio, aproximadamente aos 60 dias após a emergência (Lopes et al., 1994). Além disso, de acordo com Reddy e Patrick (1974), após as supressões de água, a reoxidação do solo nitrifica o NH_4^+ que foi acumulado em anoxia. Com suprimento combinado de NH_4^+ e NO_3^- , a planta apresenta maior biomassa em relação ao NH_4^+ suprido isoladamente (Holzschuh et al., 2009).

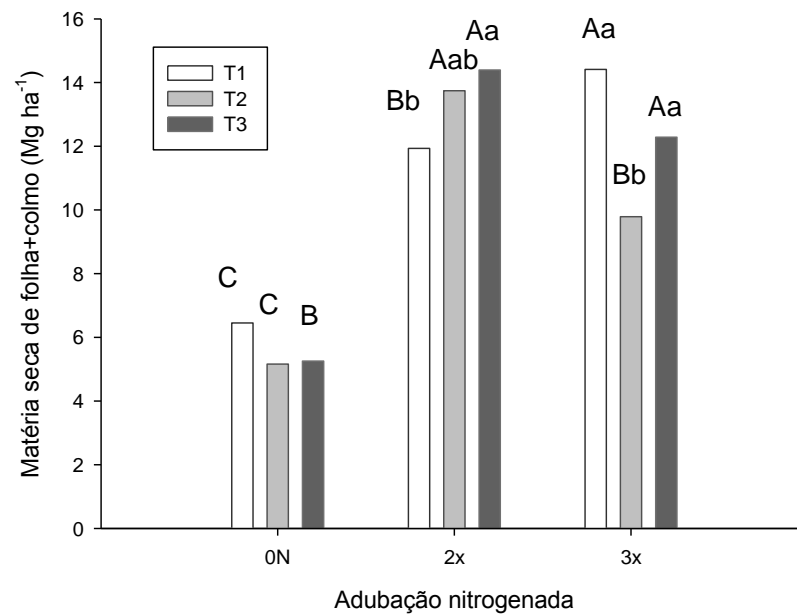


Figura 12. Matéria seca da parte aérea (colmos+folhas) de arroz irrigado na colheita (R8); nos sistemas de irrigação contínua (T1), supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3); dentro de cada manejo de adubação nitrogenada, em parcelas sem N (0N), parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de N em duas vezes (2x) e três vezes (3x). Letras minúsculas comparam o manejo de irrigação dentro de cada parcelamento do N. Teste t, ausência de letras = diferença não significativa ($p > 0,10$).

O parcelamento do N em 3x sob irrigação contínua resultou em produção média 14,4 Mg ha⁻¹ de MS, superior ao parcelamento em 2x e aos manejos de intermitência (Figura 12), mesmo realizando duas aplicações de ureia em cobertura sobre a lâmina de água. Por outro lado, com todas as aplicações em solo seco e posterior alagamento (T3), houve maior produção de MS do que realizando apenas uma intermitência e a terceira aplicação de cobertura sobre a lâmina de água (T2). Eriksen et al. (1985) não observaram diferenças na matéria seca do arroz irrigado entre os manejos de irrigação intermitente e irrigação contínua. Entretanto, para alguns autores, a MS deve diminuir com a intermitência, devido ao estresse hídrico e consequente redução da demanda de nutrientes (Tanguilig, 1987). Além disso, há também o maior crescimento radicular que, em contra partida, pode diminuir o desenvolvimento da parte aérea da planta (Bouman et al., 2007). Já o sistema de irrigação contínua favorece o desenvolvimento superficial das raízes do arroz e o N

nitrificado na camada superficial do solo é absorvido pela planta, evitando sua perda por desnitrificação. Ainda, o maior desenvolvimento da planta sugere a ocorrência de uma maior taxa respiratória devido à maior área foliar, apresentando maior absorção de água e nutrientes (Holzschuh, 2011). Isso corrobora com Abichequer (2004), que verificou correlação positiva entre comprimento de raízes e conteúdo de nutrientes na parte aérea. Na irrigação contínua, o consumo combinado de NH_4^+ e NO_3^- é possibilitado pela camada superficial do solo e a rizosfera (ambas oxidadas). No entanto, as proporções de NO_3^- disponíveis são menores nessas condições em relação à intermitência, onde todo o solo é reoxidado. Adicionalmente, a exigência energética da planta para a assimilação do NO_3^- é maior que a do NH_4^+ , pois o NH_4^+ não necessita ser reduzido para ser incorporado em aminoácidos (Bredemeier e Mundstock, 2000).

Em relação ao rendimento de grãos, não houve interação entre os fatores estudados; verificou-se somente efeito principal da aplicação de N, independentemente do parcelamento em relação ao tratamento testemunha, sem adição desse nutriente (Tabela 2). O rendimento de grãos não foi, então, afetado pelos sistemas de irrigação, intermitente ou contínua. A produtividade é, de fato, pouco afetada com o potencial hídrico do solo variando entre 0 a - 100 mbar, mesmo permanecendo por longo período (30 a 40 dias) sem inundação do solo (DeDatta et al., 1973). A irrigação com intermitência reduziu 22 % do volume de água de irrigação e não foi verificada diferença de produtividade segundo Toescher et al. (1997). Fato semelhante foi observado na Ásia, em que muitas pesquisas não mostraram diferença na produtividade entre os sistemas de irrigação intermitente e contínua. Porém, no intuito de mitigar o consumo de água, a opção mais promissora é de reduzir a altura da lâmina de água entre 5 a 10 cm, reduzindo em 23 % o uso da água e apenas 6 % da produtividade (Bouman e Tuong, 2001). Já para Eriksen et al. (1985), a intermitência diminui o rendimento de grãos. Este rendimento é afetado pelo estresse hídrico, dependendo do período, da duração e da frequência em que o arroz é submetido (Bouman e Tuong, 2001).

Tabela 2. Rendimento de grãos de arroz irrigado em diferentes sistemas de irrigação e parcelamentos de nitrogênio, em Gleissolo Háplico de Cachoeirinha RS, na safra 2012/13

Adubação nitrogenada	Sistemas de irrigação			Média
	T1	T2	T3	
	----- Mg ha ⁻¹ -----			
0N	7,42	6,60	6,57	6,87 b
2x	9,39	10,06	10,23	9,89 a
3x	10,52	10,66	10,25	10,48 a
Média	9,11^{ns}	9,11	9,02	

Nos sistemas de irrigação T1: Irrigação contínua; T2: supressão entre V6-V8; T3: supressão entre V6-V8 e V8-V10. No parcelamento da adubação nitrogenada 0N: parcela sem N; 2x: parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de N em 2 vezes; 3x: parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de N em 3 vezes. Teste t (p>0,10): Letras minúsculas comparam na coluna, o parcelamento do N dentro de cada manejo de irrigação. ns = diferença não significativa.

Em relação ao índice de colheita (IC), como não houve interação entre os fatores, verificou-se a diferença entre os tratamentos pelos efeitos principais da influência do parcelamento do N e dos sistemas de irrigação. A representatividade do rendimento de grãos em relação à biomassa da planta inteira é maior ao submeter o arroz ao sistema de irrigação com uma supressão, comparado à irrigação contínua. Independentemente do parcelamento de N, o T2 apresentou maior valor em relação à irrigação contínua (T1) (Tabela 3). O grão representou 47 % em relação à produção biológica (palha + grãos). Já o T3, não se diferenciou do T1, nem tampouco do T2. Ainda assim, independentemente do sistema de irrigação, a parcela sem adubação nitrogenada apresentou o maior IC, seguido pelo parcelamento em 3x e logo após em 2x (Tabela 3). Fageria et al. (2007), estudando diversas variedades de arroz, verificou que o índice de colheita apresentou valores entre 0,39 a 0,49 e correlacionou-se positivamente com o rendimento de grãos, demonstrando que esse índice esteve associado ao aumento da produtividade. Entretanto, isso difere do que foi encontrado neste estudo, onde não se verificou diferença de produtividade de grãos.

Tabela 3. Índice de colheita de arroz irrigado em diferentes sistemas de irrigação e parcelamentos de nitrogênio, em Gleissolo Háplico de Cachoeirinha RS, na safra 2012/13

Adubação nitrogenada	Sistemas de irrigação			Média
	T1	T2	T3	
0N	0,50	0,53	0,52	0,52 a
2x	0,41	0,39	0,38	0,39 c
3x	0,39	0,49	0,42	0,43 b
Média	0,43 B	0,47 A	0,44 AB	

Nos sistemas de irrigação T1: Irrigação contínua; T2: supressão entre V6-V8; T3: supressão entre V6-V8 e V8-V10. No parcelamento da adubação nitrogenada 0N: parcela sem N; 2x: parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de N em duas vezes; 3x: parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de N em três vezes. Teste t: (p>0,10): Letras minúsculas comparam na coluna, o parcelamento do N dentro de cada manejo de irrigação. Letras maiúsculas comparam, na linha, o manejo de irrigação dentro de cada parcelamento do N.

O acúmulo de N na planta apresentou tendência semelhante à matéria seca do arroz, na colheita. O conteúdo de N na parte aérea (folhas+colmos) e nos grãos foi afetado pelo manejo de irrigação, pelo parcelamento da adubação nitrogenada e o estágio de desenvolvimento da cultura. O N acumulado onde não se aplicou ureia em cobertura foi menor tanto nos grãos quanto na parte aérea e não se diferenciou entre os sistemas de irrigação (Tabela 4).

Tabela 4. Acúmulo de nitrogênio no tecido vegetal de arroz na colheita em diferentes sistemas de irrigação e parcelamentos de nitrogênio, em Gleissolo Háplico de Cachoeirinha RS, na safra 2012/13

Adubação nitrogenada	Sistemas de irrigação		
	T1	T2	T3
	----- N acumulado nas folhas e colmos (kg ha ⁻¹) -----		
0N	28 c	27 c	24 b
2x	58 Bb	86 Aa	82 Aa
3x	92 Aa	54 Cb	74 Ba
	----- N acumulado no grão (kg ha ⁻¹) -----		
0N	60c	60 b	61 b
2x	89 Bb	100 Ba	113 Aa
3x	129 Aa	111 Ba	103 Ba
	----- N total acumulado (kg ha ⁻¹) -----		
0N	87 c	87 c	85 c
2x	148 Bb	186 Aa	195 Aa
3x	222 Aa	165 Bb	178 Bb

Nos sistemas de irrigação T1: Irrigação contínua; T2: supressão entre V6-V8; T3: supressão entre V6-V8 e V8-V10. No parcelamento da adubação nitrogenada 0N: parcela sem N; 2x: parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de N em duas vezes; 3x: parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de N em três vezes. Teste t (p>0,10): Letras minúsculas comparam na coluna, o parcelamento do N dentro de cada manejo de irrigação. Letras maiúsculas comparam, na linha, o manejo de irrigação dentro de cada parcelamento do N.

Ao parcelar em 3x com sistema de irrigação contínua, as folhas e colmos e os grãos acumularam maior quantidade de N, em relação ao parcelamento em 2x e aos sistemas intermitentes (Tabela 4). O maior período em que o T1 permaneceu alagado, aliado ao N parcelado em 3x, propiciou melhores condições de absorção do nutriente. Aumentando o número de parcelamentos da adubação nitrogenada na irrigação contínua, foram aplicadas menores quantidades de N em cada estágio, porém em mais vezes, possibilitando maior absorção desse nutriente. Foram acumulados 92 e 129 kg ha⁻¹ de N, na parte aérea e nos grãos, respectivamente (Tabela 4). Isto corrobora com Patrick et al. (1967) que verificaram que o sistema de irrigação intermitente diminui a absorção de N. A concentração de N na parte aérea da planta do arroz diminuiu 9 dias após cessar a irrigação, devido à diminuição do potencial de água e da matéria seca das raízes e da parte aérea da planta (Tanguilig, 1987). Já de acordo com Cabangon et al. (2004), que pesquisaram sistemas de irrigação e parcelamentos de N em diferentes anos e locais, não há diferença entre a biomassa e o N acumulado entre os sistemas de irrigação contínua e intermitente. Além disso, ao realizar maior parcelamento do nutriente, houve maior acúmulo de N nas folhas e nos grãos, independentemente da irrigação.

Neste estudo, com o parcelamento do N em 2x, os sistemas de irrigação intermitente apresentaram maior acúmulo do N total e na parte aérea em relação ao T1 (Tabela 4). Já nos grãos, o T3 acumulou mais N em relação ao T1 e T2. No entanto, o T3 não apresentou diferença do acúmulo de N entre o parcelamento do nutriente em duas ou três vezes, na parte aérea ou nos grãos, separadamente. Nesse sentido, em condições de estresse, pode ocorrer aumento na concentração de amônio no interior das plantas, devido à diminuição da atividade das enzimas responsáveis pela assimilação desse íon (Cantarella, 2007). Essa concentração de NH₄⁺ pode se tornar tóxica para a planta, podendo ser a mesma diminuída à medida que aumenta a proporção de nitrato fornecida (Holzschuh et al., 2009). Ao realizar a supressão de água, o solo reoxida, possibilitando a nitrificação. Com suprimento combinado de NH₄⁺ e NO₃⁻, a planta apresenta maior teor de N na parte aérea em relação ao NH₄⁺ suprido isoladamente, indicando que a presença do nitrato é determinante para o melhor desenvolvimento do arroz (Holzschuh et al., 2011). Além disso, o aumento da aeração ou drenagem do solo aumenta o teor de N mineralizado

(van Gestel et al., 1993). Pocojeski (2011) verificou que ciclos de umedecimento e secagem resultam em maior massa verde e maior acúmulo de N no tecido de arroz. No entanto, para Tanguilig (1987), o estresse hídrico reduz a absorção de nutrientes pelas plantas devido ao decréscimo da transpiração, prejudicando a absorção e o mecanismo de transporte de nutrientes nas raízes. Possivelmente, sistemas de irrigação intermitentes que apresentam o mesmo acúmulo de N na planta em relação à irrigação contínua, não foram submetidos a um estresse hídrico suficiente a ponto de apresentar resposta negativa.

Analisando-se o acúmulo de N, ao longo do período de desenvolvimento, observa-se que no parcelamento em 3x, o N acumulado na parte aérea, em R2 e R8, é maior na irrigação contínua, seguido do manejo com duas supressões (T3) e por último com uma supressão (T2) (Figura 13B), embora a concentração de N no grão não difira entre um ou dois ciclos de intermitência (Tabela 4). Quando realizada uma supressão, o N acumulado na parte aérea se estabilizou a partir de R2 até a colheita. Já, realizando o sistema de irrigação contínua e o de duas supressões, o N acumulado na parte aérea aumentou na colheita em relação ao R2. O rápido desenvolvimento foliar e altas taxas de crescimento da biomassa, nas fases iniciais, são essenciais para alcançar altos rendimentos de grãos (Belder et al., 2005).

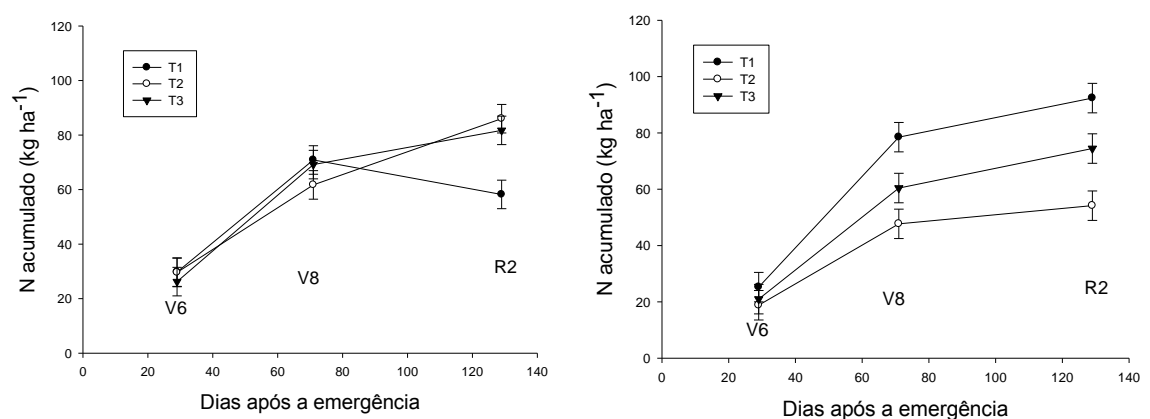


Figura 13. Acúmulo de N na parte aérea (colmos+folhas) da planta de arroz, com parcelamento de N em cobertura em duas vezes (A) e três vezes (B), nos sistemas de irrigação contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3). As barras verticais representam a DMS ($p < 0,10$).

No T2, com parcelamento de N em 3x, houve menor acúmulo de N na parte aérea e no total (parte aérea + grãos) em relação ao T3 e ao parcelamento em 2x (Tabela 5). No entanto, não houve diferença no acúmulo do N nos grãos. No parcelamento em 2x ao longo do período, o N acumulado na parte aérea foi afetado pelo sistema de irrigação (Figura 13A). Quando realizadas as intermitências (T2 e T3), o N da parte aérea aumentou até a colheita. Já, ao se realizar o sistema de irrigação contínua, o acúmulo de N atingiu $70,9 \text{ kg ha}^{-1}$ em R2 e diminuiu na maturação (R8). Na irrigação contínua, verificou-se menor acúmulo do N nas folhas após o R2, onde pode ser observada a translocação do N das folhas para o grão. Pois, no período reprodutivo, os aminoácidos acumulados nas folhas são mobilizados para o desenvolvimento das inflorescências (Bredemeier e Mundstock, 2000). O aumento do acúmulo de N na parte aérea dos sistemas de irrigação intermitente é explicado pelo fato de que além da planta estar remobilizando os aminoácidos, ocorre ainda esse acúmulo de N nas folhas devido à natureza perene da planta de arroz (rebrote após a colheita). Devido a isso, há competição por N entre as panículas e as próximas gerações dos perfilhos que estão se desenvolvendo (Sheehy et al., 2004). Sendo o arroz uma cultura anual, nesse estágio (após R2) o acúmulo é desnecessário, quando as folhas ao invés de apenas servir como “fonte” de N para os grãos, comportam-se também como “dreno”. Embora a panícula torne-se o destino principal do N absorvido logo após o florescimento, quando a taxa de absorção de N pela panícula excede a taxa de absorção das folhas (Sheehy et al., 2004), as folhas competem com os grãos pelo N disponível, ocasionando o “consumo de luxo”. Embora a persistência da coloração verde das folhas na maturação (“*stay green*”) é importante por ser correlacionada às altas produtividades e resistência ao acamamento (Castro et al., 2014).

O rendimento de grãos apresentou resposta quadrática significativa ($p < 0,05$) em relação aos conteúdos de N nos grãos e nas folhas (Tabela 5).

Tabela 5. Relação de rendimento de grãos de arroz irrigado em função do acúmulo de N nos grãos e nas folhas de Cachoeirinha RS, na safra 2012/13.

Tipo de resposta	Valor F	valor p^*
<i>N nos grãos</i>		
Linear	252,06	<0,0001
Quadrática	7,58	0,0113
Cúbica	3,61	0,0699
<i>N na folha</i>		
Linear	63,70	<0,0001
Quadrática	7,96	0,0097
Cúbica	1,27	0,2705

*significativo ($p < 0,05$)

O valor máximo de N acumulado foi de 132 e 79 kg ha⁻¹, nos grãos e nas folhas, respectivamente (Figuras 14A e 14B). Fazendo uso da calibração do método de análise química do solo, utilizou-se o nível crítico para diferenciar duas populações de dados, determinado em 80-90 % da produção relativa, o qual se considera a máxima eficiência econômica (Cantarutti et al., 2007). Utilizando a produção relativa de 90 % (10,5 Mg ha⁻¹) corresponderia a um acúmulo de N de 113 e 79 kg ha⁻¹, nos grãos e nas folhas, respectivamente. Acima dessa quantidade caracteriza-se como consumo de luxo, pois a planta absorveu o N, entretanto não resultou em aumento da produtividade. O excesso de absorção de N dos grãos pôde ser observado no T1 com parcelamento do N em 3x e no T3 com parcelamento do N em 2x. Já, esse excesso nas folhas foi observado nos T2 e T3 com parcelamento do N em 2x e no T1 com parcelamento do N em 3x.

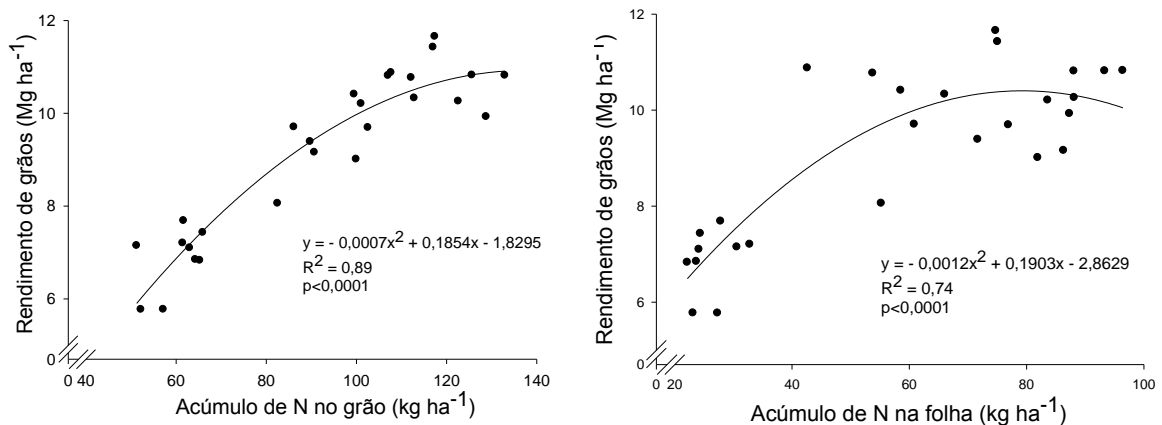


Figura 14. Rendimento de grãos de arroz em função do acúmulo de N no grão (A) e na folha (B), na colheita em Cachoeirinha RS, na safra 2012/13.

Em relação à distribuição da quantidade do N acumulado no arroz, os grãos detiveram em média entre 54 e 67 % do N de toda a planta, das parcelas adubadas com esse nutriente (Figura 15). Essa distribuição corrobora com Quanbao et al. (2007), que verificaram em experimento com doses crescentes de N, maior proporção de N acumulado nos grãos do que na parte vegetativa. Ainda segundo os mesmos autores, o aumento das doses aumentou o N acumulado nos grãos, assim como na folhas e colmos, diminuindo a taxa de translocação do N, resultando em sua absorção excessiva pela planta e diminuição da eficiência de uso do nutriente. A quantidade de N absorvida varia no ciclo de desenvolvimento da planta e depende da disponibilidade de N no solo, mas também de fatores intrínsecos à planta (Bredemeier e Mundstock, 2000). A absorção de nutrientes pelo arroz não aumenta com o aumento da transpiração, sendo este mais dependente da capacidade das raízes em absorver nutrientes do que a sua chegada às raízes pelo fluxo transpirativo (Tanguilig, 1987). A diferença entre a demanda de N e o suprimento pelas raízes, durante o enchimento de grãos, está na translocação desse nutrientes, previamente acumulado do tecido senescente (Sheehy et al., 1998). A maior quantidade absorvida de N pela planta foi após o R2, já que o N na parte aérea, além de aumentar em alguns tratamentos, na colheita apresenta menor concentração que no grão. Segundo Sheehy et al. (2004), a taxa máxima de absorção da parte aérea é aos seis dias antes da iniciação da panícula (próximo a DPF) e a da panícula é aos 16 dias após o florescimento,

coincidindo também com a máxima translocação de N da folha para os grãos. Ainda, segundo os mesmos autores, embora as folhas sejam as principais reservas do N, cerca de 30% do que acumula no grão é adquirido antes da iniciação da panícula e mais 30-40 % do acumulado nos grãos é adquirido entre a IP e o florescimento.

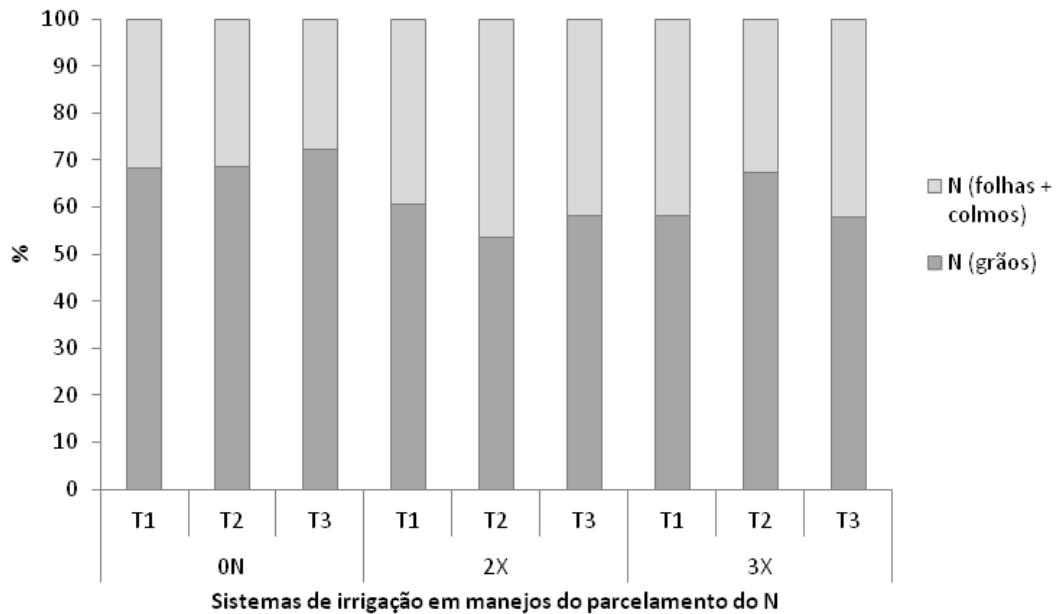


Figura 15. Distribuição do N acumulado no arroz irrigado, nos sistemas de irrigação: contínua (T1); supressão entre os estádios V6-V8 (T2) e supressão entre os estádios V6-V8 e V8-V10 (T3); e manejo de adubação nitrogenada, em parcelas sem N (0N), parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de N em duas vezes (2x) e três vezes (3x) em Cachoeirinha RS, na safra 2012/13.

Ao realizar o parcelamento do N em 2x, as plantas dos sistemas de irrigação intermitente (T2 e T3) acumularam maior quantidade de N por kg de N aplicado, em relação ao T1, verificado pelos valores superiores da recuperação aparente de N (RAN) (Tabela 6). Nesse parcelamento, o T3 não se diferenciou do T2, apresentando pouco efeito de perdas por desnitrificação pela reoxidação do solo devido à incorporação do N e a influência da distribuição pluviométrica na segunda supressão. Mesmo apresentando maiores perdas por desnitrificação no sistema de irrigação intermitente, em comparação à irrigação contínua (Buresh et al., 2008), ao parcelar em 2x a RAN foi maior. Ainda, no

T2, aplicando a ureia em cobertura em 2x, houve maior RAN do que quando aplicado em 3x. No parcelamento em 2x aplicou-se maiores teores no V4 e V8, irrigou-se e manteve-se a lâmina de água após a aplicação por 21 dias entre V4-V6 e até R6 após a segunda aplicação (em V8). Logo, o N foi absorvido em maior quantidade, possivelmente pela difusão do nutriente em profundidade, o que diminuiu as perdas por volatilização, já que a terceira aplicação em cobertura no T3 foi realizada na lâmina d'água. Além disso, a menor RAN é consequência do crescimento limitado da planta nas fases iniciais devido à menor disponibilidade de N (Belder et al., 2005). Com o parcelamento em 2x, o T1 provavelmente perdeu mais nitrogênio por volatilização de amônia, conforme verificado por Knoblauch et. al. (2012), que constataram a maior perda na aplicação de ureia em grânulos sobre a lâmina de água, seguida pela aplicação em solo seco e, a menor perda foi a aplicação em solo seco com posterior alagamento, tratamento similar ao T2, relacionado a este estudo.

Tabela 6. RAN, EAUN e EAFUN de arroz irrigado, em diferentes sistemas de irrigação e parcelamentos de nitrogênio, em Gleissolo Háplico de Cachoeirinha, na safra 2012/13

Adubação nitrogenada	Sistemas de irrigação			Média
	T1	T2	T3	
----- RAN (%) -----				
2x	40 Bb	66 Aa	73 A	60
3x	90 Aa	52 Bb	62 B	68
Média	65	59	68	
----- EAUN (kg kg ⁻¹) -----				
2x	11	20	21	18
3x	18	24	21	21
Média	15 B	22 A	21 A	
----- EAFUN (kg kg ⁻¹) -----				
2x	28	30	29	29
3x	20	46	34	34
Média	24 B	38 A	32 AB	

RAN = Recuperação aparente de nitrogênio (%); EAUN = Eficiência agrônômica do uso de N (kg grãos kg N aplicado⁻¹); EAFUN = Eficiência agrofisiológica do uso do N (kg grãos kg N acumulado⁻¹). Nos sistemas de irrigação T1: Irrigação contínua; T2: supressão entre V6-V8; T3: supressão entre V6-V8 e V8-V10. No parcelamento da adubação nitrogenada 0N: parcela sem N; 2x: parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de N em duas vezes; 3x: parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de N em três vezes. Letras minúsculas comparam na coluna, o parcelamento do N dentro de cada manejo de irrigação. Letras maiúsculas comparam, na linha, o manejo de irrigação dentro de cada parcelamento do N. Teste t, ausência de letras= diferença não significativa (p>0,10).

O contrário ocorreu no sistema de irrigação contínua com parcelamento do N em 3x, que recuperou 90 % do N aplicado, maior que se realizado o parcelamento em 2x e também maior do que os sistemas de irrigação intermitente. Mesmo com maior proporção de perdas pela volatilização (Buresh et al., 2008), a absorção neste tratamento foi maior, provavelmente devido à diminuição das perdas por desnitrificação pela permanência da lâmina de água (Eriksen et al., 1985), à redução dissimilatória do nitrato a amônio (Paul e Beauchamp, 1989) nas zonas oxidadas do solo alagado (superfície do solo e rizosfera) e à maior mineralização de compostos orgânicos (Fageria et al., 2009). Nesse tratamento foram aplicadas menores doses antes do estabelecimento da lâmina (V4) onde a planta ainda apresentava-se pouco desenvolvida. Além disso, com o aumento do parcelamento reduziu-se a dose em cobertura, aplicou-se em maior quantidade de vezes e a última aplicação realizou-se mais próximo à DPF. Estes dados corroboram com Eriksen et al. (1985), que verificaram a diminuição da RAN ao realizar o sistema intermitente de irrigação. Embora diversos trabalhos tenham encontrado valores de RAN entre 20 e 40 % (DeDatta et al., 1988; Schnier, 1994; Bronson et al., 2000; Dobermann et al., 2000; Fageria et al., 2007), o menor valor de RAN deste trabalho foi o mesmo valor da maior RAN desses autores. Os valores relativamente altos do experimento também foram reportados por Cantarella (2007), o qual apresenta dados com trigo no Brasil com uso de ^{15}N que apontam para recuperação de 52 a 85% do N, compatíveis com um período de baixas precipitações. Mas também, os resultados de RAN, quando medidos pelo método da diferença, tendem a ser superestimados se o N do fertilizante estimular a mineralização do N da MOS (efeito “*priming*”) ou o crescimento do sistema radicular (Cantarella, 2007).

Fageria et al. (2003) relataram que a eficiência de recuperação do arroz é baixa devido às diversas formas de perdas de N. Porém, o T1 com parcelamento do N em 3x com maior MS na parte aérea (Figura 12), possivelmente, apresentou menores perdas por volatilização. As perdas são menores realizando maior parcelamento do N em cobertura sobre a lâmina de água, porque a menor perda por volatilização é obtida da aplicação da ureia com a lavoura já desenvolvida. As lavouras que apresentam dosséis mais fechados e são adubadas por ureia diminuem as perdas por volatilização de

NH_3 , pois parte do N perdido para o ar pode ser absorvido pelas folhas (Cantarella, 2007). Além disso, com o sombreamento da lâmina, a qual reduz a atividade fotossintética da biomassa aquática, diminui a velocidade do vento, restringindo as trocas gasosas na interface água-atmosfera (Buresh et al., 2008).

Em relação à eficiência agronômica do uso de N (EAUN) e à eficiência agrofisiológica do uso do N (EAFUN) (Tabela 6), como não houve interação entre os fatores, verificou-se a diferença entre os tratamentos pelo efeito principal da influência dos parcelamentos do N e dos sistemas de irrigação. A EAUN e a EAFUN não apresentaram diferença ($p > 0,10$) entre os parcelamentos do N em duas ou três vezes.

Independentemente do parcelamento de N, a EAUN apresentou em média 22 e 21 kg de grãos por kg de N aplicado, com uma e duas supressões, respectivamente, diferenciando-se da irrigação contínua em que foram produzidos somente 15 kg kg^{-1} . Ou seja, houve um incremento no rendimento de grãos de 3,30 e 3,15 Mg ha^{-1} com uma e duas supressões, respectivamente, superiores ao incremento da irrigação contínua que foi de 2,25 Mg ha^{-1} . Esse resultado é controverso ao verificado por Eriksen et al. (1985), em que a utilização do sistema intermitente de irrigação diminuiu a eficiência do fertilizante nitrogenado. Cabangon et al. (2004), entretanto, verificaram que a EAUN não apresentou diferença entre os sistemas de irrigação e manejos de parcelamento de N em diferentes locais na China, variando de 7 a 21 kg kg^{-1} . A EAUN depende de diversas variáveis, tais como a variedade, a adubação, o sistema de irrigação, a cultura antecessora e a produtividade. Entre diferentes variedades foram verificadas variações da EAUN entre diferentes autores, que compreenderam valores de 16 a 23 kg kg^{-1} (Fageria et al., 2007), e com adubação de 150 kg ha^{-1} de N foi obtida EAUN de 20 kg de grãos por kg de N aplicado (Dobermann et al., 2000).

A EAFUN, independentemente do parcelamento de N, apresentou maior produtividade de grãos por kg de N acumulado no sistema com uma supressão em relação à irrigação contínua. Realizando uma supressão, acumulou-se em média 38 kg de grãos por cada kg de N acumulado na parte aérea e, nos grãos, cerca de 58 % a mais que a irrigação contínua. Cabangon et al. (2004) não observaram diferença na EAFUN entre os sistemas de irrigação contínua e

intermitente, variando entre 39 a 72 kg kg⁻¹. Além disso, com diferentes variedades de arroz, Fageria et al. (2007) obtiveram EAFUN de 56 a 123 kg kg⁻¹. Para Belder et al. (2005), os menores valores de EAFUN, sem deficiência de N, são devido a outros fatores, (por exemplo, outros nutrientes, luminosidade, etc.). Os valores de EAFUN verificados neste experimento refletem maiores diferenças do N acumulado na planta entre as parcelas com e sem N, apresentando maior resposta a este nutriente. Entretanto, esses valores de EAFUN foram inferiores quando comparados aos mínimos (46 kg kg⁻¹) estabelecidos por Witt et al. (1999). Para a cultura do arroz irrigado. Sendo esta, outra comprovação do “consumo de luxo” do arroz nestes sistemas de cultivo.

Os ciclos de intermitência apresentaram maior capacidade de aumentar a produtividade por kg de N aplicado ou absorvido, ou seja, foram mais eficientes em transportar e transformar os fotoassimilados em grãos, independentemente do parcelamento da adubação nitrogenada. Utilizando o sistema de irrigação contínua com parcelamento do N em 3x ou o sistema intermitente com parcelamento do N em 2x, ocorreu um acúmulo excessivo de N nos grãos (Tabela 4 e Figura 14), comprovado pelo fato de que, mesmo com maior RAN devido ao maior acúmulo de N nos grãos e em toda a planta (Tabela 4), não foi revertido em incremento de rendimento de grãos (Tabelas 2 e 6). Para utilizar o sistema de irrigação intermitente, deve-se primeiro fazer uma calibração para a dose a ser recomendada. Como as perdas de N por volatilização nos sistemas de irrigação intermitentes e as perdas por desnitrificação no sistema de irrigação contínua são minimizadas, ocorre o acúmulo de grande quantidade de N no tecido da planta em alguns tratamentos e as eficiências são maximizadas.

5.4 Conclusões

Utilizando o sistema de irrigação contínua, o parcelamento do nitrogênio em três aplicações apresenta maior biomassa e favorece o acúmulo desse nutriente no arroz irrigado. Ao utilizar o sistema de irrigação intermitente, a biomassa e o acúmulo de N na parte aérea são favorecidos pelo parcelamento

em duas aplicações. No entanto, o acúmulo de nitrogênio nos grãos não é influenciado pelo manejo do parcelamento do adubo nitrogenado. Os maiores conteúdos verificados desse nutriente, tanto nas folhas quanto nos grãos, apresentam-se em excesso na planta. Mais da metade do nitrogênio acumulado na planta encontra-se nos grãos e é absorvido após o emborrachamento.

O rendimento de grãos não foi afetado pelo sistema de irrigação e pelos parcelamentos do nitrogênio em que foi submetido.

A representatividade do rendimento de grãos em relação à biomassa da planta inteira é maior ao submeter o arroz ao sistema de irrigação com uma supressão, comparado à irrigação contínua.

O sistema de irrigação com uma supressão é mais eficiente em relação à irrigação contínua. Já, os sistemas de irrigação intermitente, com uma e duas supressões, não se diferenciaram nas eficiências de uso do nitrogênio. Estes compensam com a translocação e absorção do nutriente no estágio reprodutivo, sem diferença entre eles na produção final, independentemente do manejo de parcelamento do adubo.

6. CONCLUSÕES GERAIS

A eletroquímica é afetada pelos sistemas de irrigação e influenciam a dinâmica e disponibilidade dos nutrientes na solução do solo. Na irrigação contínua a disponibilidade dos nutrientes é maior em relação às intermitentes.

Embora a biomassa e o acúmulo do nitrogênio sejam afetados, a produtividade não diferenciou entre os sistemas de irrigação e o manejo de adubação. A intermitência pode ser utilizada como uma ferramenta para melhorar a eficiência de utilização do nitrogênio pela cultura do arroz irrigado.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de irrigação intermitente deve ser utilizado em lavouras de arroz irrigado, como uma ferramenta para aumentar a eficiência de uso do nitrogênio e reservar água para os períodos mais sensíveis da cultura, em anos que possam apresentar deficiência hídrica.

Os produtores que desejarem utilizar este sistema devem atentar à necessidade do superdimensionamento da estação de recalque. Assim como a manutenção da mesma, que na ausência prolongada da água pode ocasionar perdas de produtividade. Este deve apresentar capacidade de reinundar a lavoura com rapidez. Além disso, é importante o monitoramento da presença de plantas daninhas pela possível reinfestação da área.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHEQUER, A. D. **Morfologia e distribuição de raízes de arroz irrigado por inundação e sua relação com a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos**. 2004. 56 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ANGHINONI, I. et al. Adubação potássica em arroz irrigado conforme a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 11, p. 1481-1488, 2013.

ARAÚJO, P. A.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 253-280.

ÁVILA, L.A. et al. Irrigação intermitente reduz a transferência de nutrientes para o ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 7., 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2009. 1 CD-ROM.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrients use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, p. 921-950, 2001.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York: J. Wiley e Sons, 1995. 414 p.

BELDER, P. et al. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 65, n. 3, p. 193-210, 2004.

BELDER, P. et al. Nitrogen economy and water productivity of lowland rice under water-saving irrigation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 93, p. 169-185, 2005.

BORIN, J. B. M. et al. Alterações eletroquímicas de um gleissolo afetado pelo manejo de irrigação do arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **[Anais]**. Florianópolis, 2013.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 365-372, 2000.

BRONSON, K.F. et al. Use of ¹⁵N-labeled soil in measuring nitrogen fertilizer recovery efficiency in transplanted rice. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 64, p. 235-239, 2000.

BOUMAN, B. A. M.; TUONG, T. P. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 49, p. 11-30, 2001.

BOUMAN, B. A. M.; LAMPAYAN, R. M.; TUONG, T. P. **Water management**. Philippines: Water Management International Rice Research Institute, 2007. 54 p.

BURESH, R. J.; REDDY, K. R.; VAN KESSEL, C. Nitrogen transformations in submerged soils. In: SCHEPERS, J. S., RAUN, W. R. (Ed.). **Nitrogen in agricultural systems**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 2008. p. 401-436.

BUSS, G. L. et al. Dinâmica na redução de um Planossolo alagado e teores de nutrientes na parte aérea do arroz em função do manejo da água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 7., 2011, Balneário Camboriú. **Anais...** Itajaí: Epagri, 2011. v. 2, p. 159-162.

CABANGON, R. J. et al. Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China. **Paddy Water Environment**, Tokyo, v. 2, p. 195-206, 2004.

CAMARGO, F. A. O., SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, p. 171-180, 1999.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CANTARELLA, H. ; MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e enxofre. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. p. 1-65. v.2

CANTARUTTI, R. B. et al. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.769-850.

CARMONA, F. C. et al. Cation dynamics in soils with different salinity levels growing irrigated rice. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1851-1863, 2010.

CASTILHOS, R. M. V. ; MEURER, E. J. Suprimento de potássio de solos do Rio Grande do Sul para arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 977-982, 2002.

CASTILHOS, R. M. V. et al. Mineralogia e fontes de potássio em solos no Rio Grande do Sul cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 579-587, 2002.

CASTRO, A. P. et al. **BRS Esmeralda**: cultivar de arroz de terras altas com elevada produtividade e resistência à seca. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2014. (Comunicado técnico, n. 215)

CHEN, C. C.; DIXON, J. B.; TURNER, F. T. Iron coatings on rice roots: mineralogy and quantity influencing factors. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, p. 635–639, 1980.

CLIMATE-DATA. **Clima**: Cachoeirinha. Disponível em: <http://climate-data.org/>. Acesso em: 07 jan. 2014.

COELHO, A. M.; CRUZ, I. C.; FILHO, I. A. P. **Rendimento do milho no Brasil: chegamos ao máximo?** Piracicaba: POTAFOS, 2003. p.1-12. (Encarte de Informações Agronômicas, n. 101)

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_10_16_14_32_01_boletim_portugues_-_setembro_2013.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2013.

COUNCE, P.; KEISLING, T.C.; MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v.40, n.2, p. 436-443, 2000.

De DATTA, S. K. et al. **Water Management in Philippine Irrigation System: Research and Operations**. Los Baños: IRRI, 1973. p.1-18.

De DATTA, S. K. et al. Nitrogen use efficiency and nitrogen-15 balance in broadcast-seeded flooded and transplanted Rice. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 52, p. 849-855, 1988.

De DATTA, S. K. **Principles and practices of rice production**. Nova York: John Wiley, 1981. 618 p.

DECHEN, A. R. ; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOAIS, R.F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470

DOBERMANN, A. Nitrogen use efficiency – state of the art. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt. **Proceedings**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2005. 1 CD-ROM.

DOBERMANN, A. Nitrogen use efficiency – measurement and management. In: INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION WORKSHOP ON FERTILIZER BEST MANAGEMENT PRACTICES, 2007, Brussels. **Proceedings**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2007.

DOBERMANN, A. et al. Reversal of rice yield decline in along term continuous cropping experiment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 633-643, 2000.

DUY, P. Q. et al. Analysis of the dry matter production process related to yield and yield components of rice plants grown under the practice of nitrogen-free basal dressing accompanied with sparse planting density. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 7, n. 2, p. 155-164, 2004.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivo do arroz de terras altas no Estado de Mato Grosso**. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltasMatoGrosso/pragas_metodos_controle.htm>. Acesso em: 01 maio 2011.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise do solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006. 306 p.

ERIKSEN, A. B.; KJELDBY, M.; NILSEN, S. The effect of intermittent flooding on the growth and yield of wetland rice and nitrogen-loss mechanism with surface applied and deep placed urea. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 84, p. 387-401, 1985.

FAGERIA, N. K.; ARAÚJO, A. P.; STONE, L. F. Mudanças químicas na rizosfera. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.) **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 161-182.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B.; CUTRIM, V. A. Produtividade de arroz irrigado e eficiência de uso do nitrogênio influenciadas pela fertilização nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 7, p.1029-1034, 2007.

FAGERIA, N. K.; SLATON, N. A.; SANTOS, A. B. Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability. **Advances in Agronomy**, Los Baños, v. 80, p. 63-152, 2003.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. Ammonia volatilization in no-till system in the south-central region of the state of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1677-1684, 2010.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO Statistical Yearbook 2013**. Rome: World Food and Agriculture, 2013. 307 p.

FRAGA, T. I. et al. Suprimento de potássio e mineralogia de solos de várzea sob cultivos sucessivos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 497-506, 2009.

FREITAS, T. F. S. de. **Densidade de semeadura e adubação nitrogenada em cobertura na época de semeadura tardia de arroz irrigado**. 2004. 72f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOMES, A. S.; PAULETTO, E. A.; FRANZ, A. F. H. Uso e manejo da água em arroz irrigado. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. de. (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. p. 417-455.

GONÇALVES, G. K et al. Relação entre óxidos de ferro e de manganês e a sorção de fósforo em solos no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1633-1639, 2011.

GRANT, C. Effects of nitrogen and phosphorous fertilizers on the environment. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. p. 47-92. v.1.

GRIEBELER, G. et al. Influência da irrigação de lavouras arroteiras sobre a dinâmica de nutrientes na solução do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29., 2010, Guarapari. **Anais...** Guarapari: SBCS, 2010. 1 CD-ROM.

GUILHERME, L. R. G. et al. Adsorção de fósforo em solos de várzea do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 27-34, 2000.

HOLZSCHUH, M. J.; BOHNEM, H.; ANGHINONI, I. Avaliação da porosidade e placa férrica de raízes de arroz cultivado em hipoxia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1763-1769, 2010.

HOLZSCHUH, M. J. et al. Resposta do arroz irrigado ao suprimento de amônio e nitrato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p.1323-1331, 2009.

HOLZSCHUH, M. J. et al. Absorção de nutrientes e crescimento do arroz com suprimento combinado de amônio e nitrato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.1357-1366, 2011.

HONGPRAYOON, C. et al. Urea transformations in flooded soil columns: i. experimental results. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 55, p. 1130-1134, 1991.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Produtividades municipais - safra 2012/13**. Disponível em:

<http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131018151801produtividade_municipios_safra_12_13_final.pdf> . Acesso em: 06 nov. 2013a.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Área e produção de arroz.** Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131024101611producao_rs_e_brasil.pdf>. Acesso em: 07 de nov. 2013b.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Custo de produção do arroz irrigado no Rio Grande do Sul sistema semidireto.** Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131030170141resumo_custo_2012_13.pdf> Acesso em: 07 nov. 2013c.

JAEGER, I. et al. Manejo da água de irrigação e da adubação fosfatada para mitigação da toxidez por ferro em arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013. Florianópolis, SC. **Programa e Resumos.** Florianópolis, SC: Epagri e SBCS, 2013a. v. 2, p. 1-4

JAEGER, I. et al. Absorção de fósforo e ferro por dois genótipos de arroz afetados pelo manejo da água de irrigação em área com histórico de toxidez por ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2013b. v. 2. p. 884-887

KEITH, S. M. ; HERBERT, R.A. Dissimilatory nitrate reduction by a strain of *Desulfovibrio desulfuricans*, **FEMS Microbiology Letters**, Amsterdam, v. 18, p. 55–59, 1983.

KIRK, G. J. D. **The biogeochemistry of submerged soils.** Chichester; Hoboken, Wiley, 2004. 291 p., v. 8.

KNOBLAUCH, R. et al. Volatilização de amônia em solos alagados influenciada pela forma de aplicação de ureia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 813-821, 2012.

KUO, S. Concurrent absorption of phosphorus and zinc, cadmium, or calcium by a hydrous ferric oxide. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 50, p. 1412-1419, 1986.

LIU, S. et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy Rice-winter wheat rotation system in southeast China. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 408, p.906-9013, 2010.

LOPES, S. I. G; VOLKWEISS, S. J.; TEDESCO, M. J. Desenvolvimento do sistema radicular do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 2, p. 273-278, 1994.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Brasil projeções do agronegócio 2010/2011 a 2020/2021.** Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Ministerio/gestao/projecao/PROJEC>

OES%20DO%20AGRONEGOCIO%202010-11%20a%202020-21%20-%202_0.pdf> Acesso em: 07 nov. 2013.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARCOLIN, E.; GENRO JUNIOR, S. A.; MACEDO, V. R. M. Eficiência de uso de água em função de sistemas de manejo da irrigação em arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 7., 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2009. 1 CD-ROM.

MARCOLIN, E. et al. Produtividade e eficiência de uso de água em função de sistemas de manejo da irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 7., 2011, Balneário Camboriú. **Anais...** Itajaí: Epagri, 2011. v. 2. p. 335-338.

MARTINI, L. F. D. et al. Irrigação intermitente permite redução do volume de água aplicado sem afetar a produtividade do arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 7., 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2009. 1 CD-ROM.

MENEZES, V. G. et al. **Projeto 10 – estratégias de manejo para aumento da produtividade e da sustentabilidade da lavoura de arroz irrigado do RS: avanços e novos desafios**. Cachoeirinha: IRGA/Estação Experimental do Arroz, 2012. (Boletim Técnico)

MEURER, E. J. ; ANGHINONI, I. Solução do solo. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 85-106.

MEURER, E. J.; BISSANI, C. A.; CARMONA, F. de C. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010a, p. 149-169.

MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C.A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010b, p. 107-148.

MEZZOMO, R. F. **Irrigação contínua e intermitente em arroz irrigado: uso de água, eficiência agrônômica e dissipação de imazethapyr, imazapic e fipronil**. 2009. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Agronomia, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MIKKELSEN, D. S. Nitrogen budgets in flooded soils used for rice production. **Plant Soil**, The Hague, v. 100, p. 71-97, 1987.

MONTERLE, D. F. **Efluxo de metano em solo sob manejos de irrigação e cultivares de arroz irrigado**. 2011. 146 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-graduação em Agronomia, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

MUNCH, J. C.; OTTOW, J. C. G. Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity. **Soil Science**, Baltimore, v. 129, p. 15-21, 1980.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphorus in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, 1962.

NOVAIS, R. F. ; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 133-204.

PATRICK, W. H. et al. Effect of continuous submergence versus alternate flooding and drying on growth, yield and nitrogen uptake of rice. **Agronomy Journal**, Madison, v. 59, p. 418-419, 1967.

PAUL, J. W. ; BEAUCHAMP, E. G. Effects of carbon constituents in manure on denitrification in soil. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 69, p. 49-61, 1989.

PETRY, C. et al. Irrigação intermitente em arroz irrigado e eficiência do uso da água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 7., 2011, Balneário Camboriú. Racionalizando recursos e ampliando oportunidades: **Anais...** Itajaí: Epagri, 2011. v. 2. p. 481-484.

PINTO, L. F. S.; LAUS NETO, J. A.; PAULETTO, E.A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES, A. M. (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa, 2004. p. 75-96.

POCOJESKI, E. **Disponibilidade do nitrogênio em solos de várzea e parâmetros da planta para avaliação nutricional da cultura do arroz irrigado**. 2011. 85 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Programa de Pós-graduação em Agronomia, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2011.

PONNAMPERUMA, F. N. **Physicochemical properties of submerged soils in relation to fertility**. 5. ed. Los Baños: IRRI, 1977. 32 p.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemical of submerged soils. **Advances in Agronomy**, Los Baños, v. 24, p. 29-96, 1972.

QUANBAO, Y. E. et al. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions. **Frontiers of Agriculture in China**, Yangzhhou, v. 1, p. 30-36, 2007.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

REDDY, R.; DELAUNE, R. D. **Biogeochemistry of wetlands: science and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2008. 774 p.

REDDY, K. R. ; PATRICK JR, W. H. Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential, organic matter decomposition and nitrogen loss in a flooded soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 7, p. 87-94, 1974.

SANES, F. S. M. et al. Morfologia de raízes e cinética de absorção de potássio em genótipos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 688-697, 2013.

SANTOS, A. B. Manejo de água e de fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 4, p. 565-573, 1999.

SANTOS, M. P. **Influência da temperatura na eficiência de tratamentos de efluentes em reatores UASB**. 2010. 34 f. Trabalho de Conclusão (Graduação) – Curso de Engenharia Química, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SBCS/NRS - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS-NRS/EMBRAPA-CNPT, 2004, 400 p.

SCHNIER, H. F. Nitrogen-15 recovery fraction in flooded tropical rice as affected by added nitrogen interaction. **European Journal of Agronomy**, Oxford, v. 3, p. 161-167, 1994.

SCIVITTARO, W. B. et al. 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, 2011. v. 2. p. 315-318.

SCIVITTARO, W. B. et al. **Estado nutricional do arroz: efeito da época de início de irrigação**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. 31 p. (Documentos, n.130).

SCIVITTARO, W. B. ; GOMES, A. da S. **Adubação e Calagem para o Arroz Irrigado no Rio Grande do Sul**. Pelotas: Ministério da agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2007. (Circular Técnica)

SCIVITTARO, W. B. ; MACHADO, M. O. Adubação e calagem para a cultura do arroz irrigado. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. de. (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. p. 259-303.

SHEEHY J. E. et al. Temporal origin of nitrogen in the grain of irrigated rice in the dry season: the outcome of uptake, cycling, senescence and competition studied using ¹⁵N-point placement technique. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, n. 2-3, p. 337-348, 2004.

SHEEHY J. E. et al. Critical nitrogen concentrations: implication for high yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 59, p. 31-41, 1998.

SILVA, J. B. et al. Adsorção do fósforo após a drenagem de dois solos alagados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2013. v. 2. p.1034-1037.

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

SILVA, L. S.; SOUSA, R. O.; BOHNEN, H. Alterações nos teores de nutrientes em dois solos alagados, com e sem plantas de arroz. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, p. 487-490, 2003.

SILVA, L. S. et al. Avaliação de métodos para estimativa da disponibilidade de fósforo para arroz em solos de Várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 207-216, 2008.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CERETTA, C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 73-100.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Itajaí: SOSBAI, 2012. 179 p.

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

SOUSA, R. O.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos alagados (reações de redox). In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 171-195.

SOUSA, R. O.; GOMES, A. S.; VAHL, L. C. Toxidez por ferro em arroz irrigado. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. p. 305-334.

SOUSA, R. O.; VAHL, L. C.; OTERO, X. L. Química dos solos alagados. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009. 685 p.

TANAKA, A.; LOE, R. ; NAVASERO, S. A. Some mechanisms involved in the development of iron toxicity symptoms in the rice plant. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 12, p. 158-164, 1966.

TANGUILIG, V. C. et al. Water stress effects on leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. **Plant and Soil**, The Hague, v. 103, p. 155-168, 1987.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p.

TOESCHER, C. F.; RIGHES, A. A.; CARLESSO, R. Volume de água aplicada e produtividade do arroz sob diferentes métodos de irrigação. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, Uruguaiana, v. 4, n. 1, p. 75-79, 1997.

THOMPSON, A. et al. Iron-oxide crystallinity increases during soil redox oscillations. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 70. p. 1710–1727, 2006.

TUONG, T. P.; BOUMAN, B. A. M. Rice production in water-scarce environments. In: KIJNE, J. W., BARKER, R., MOLDEN, D. (Ed.). **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement**. Wallingford: CABI Publishing, 2003. p. 53–67

TUONG, T. P.; BOUMAN, B. A. M.; MORTIMER, M. More rice, less water-integrated approaches for increasing water productivity in irrigated rice-based systems in Asia. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 8, p. 229- 239, 2005.

TUSNEEM, M. E. ; PATRICK Jr., W. H. **Nitrogen transformations in waterlogged soil**. Louisiana: Agricultural Experiment Station, 1971. p. 1–75.

VAHL, L. C. O fósforo na cultura do arroz irrigado. In: YAMADA, T.; STIPP, S. R.; ABDALLA. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. 726p.

VAHL, L. C. ; SOUZA, R. O. Aspectos físico-químicos de solos alagados. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. de. (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. p. 97-118.

VAN GESTEL, M.; MERCKX, R.; VLASSAK, K. Microbial biomass responses to soil drying and rewetting: The fate of fast and slow growing microorganisms in soils from different climates. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, p. 109–123, 1993.

VORONEY, R. P. The soil habitat. In: PAUL, E. A. **Soil microbiology, ecology, and biochemistry**. 3. ed. Burlington: Elsevier, 2007. p. 25-49.

WITT, C. et al. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 63, n. 2, p. 113-138, 1999.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: The International Rice Research Institute, 1981. 269p.

ZSCHORNACK, T. et al. Implicações do manejo da água nas emissões de metano e de óxido nitroso em solos cultivado com arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 7., 2011, Balneário Camboriú. **Anais...** Itajaí: Epagri, 2011. v. 2. p. 595-598.