

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

**SALINIDADE DA ÁGUA E DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA SOBRE O ARROZ
IRRIGADO**

**Felipe de Campos Carmona
(Tese de Doutorado)**

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

**SALINIDADE DA ÁGUA E DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA SOBRE O ARROZ
IRRIGADO**

FELIPE DE CAMPOS CARMONA
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de Doutor em
Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Fevereiro de 2011

Página de homologação

Aos meus pais, Paulo e Cleci, por priorizarem a educação dos filhos.

À minha esposa, amiga e incentivadora, Juliana e ao nosso filhão, Caetano.

A vocês, DEDICO esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade e pela proteção durante toda a jornada.

À minha família, pelo apoio e incentivo.

Ao Professor Ibanor Anghinoni, exemplo de profissionalismo e dedicação ao que faz, pelos anos de convivência e amizade e por participar ativamente do meu crescimento profissional e acadêmico.

Ao Dr Abdelbagi Ismail, pela orientação e convívio durante o estágio no exterior.

Ao Professor Marino José Tedesco, pelas sugestões ao longo desse trabalho. Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela generosa parcela de contribuição na minha formação. Ao pesquisador do Instituto de Ecologia da UFRGS, Eliseu José Weber, pela atenciosidade, profissionalismo e pela participação fundamental no trabalho de mapeamento da salinidade.

Aos bolsistas de iniciação científica Marcelo Hoerbe Andrighetti, Eduardo Giacomelli Cao, Amanda Posselt Martins e Filipe Selau Carlos e ao funcionário do Departamento de Solos/UFRGS Adão Luis Ramos dos Santos, pelo companheirismo e dedicação nos trabalhos de campo e laboratório. A todos os colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo/UFRGS, pelos bons momentos de convívio e companheirismo durante esses quatro anos, em especial a Osmar Conte, Leandro Bortolon, Marquel Holzschuh, Sergio Costa, Christina Lima, Daniela Barbosa, Fabíola Lopes, Jeane Portela e Tiago Zchornack. Aos funcionários do Departamento de Solos e Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em especial, a Jader Amaro, Paulo Ricardo e Luiz Antonio (Tonho).

Aos produtores Antonio Velho Martins, José Mathias Bins Martins e Leandro Mathias Bins Martins e aos funcionários da Fazenda Cavahada (Mostardas, RS), pelo importante suporte dado na execução dos trabalhos que subsidiaram parte dessa Tese.

Ao Instituto Rio-Grandense do Arroz, em especial a pessoa do Gerente da Divisão de Pesquisa, Athos Dias de Castro Gadea, por não faltar com o apoio

logístico na maior parte dos trabalhos de campo. Aos extensionistas dessa instituição, Hermínio Menezes Gadea, Aldo Olegário Saraiva, Melissa Terra Guimarães, José Gallego Tronchoni, Carlos Felipe Mascarenhas Nassif, Carlos Alberto Machado, Cléo Soares, Vera Maria Pereira Borges, José Celso Basanesi e a todos os produtores e técnicos da iniciativa privada, que se dispuseram a colaborar nos trabalhos de campo.

Ao International Rice Research Institute, por me abrir as portas para um período especial de aprendizado.

A CAPES, pela concessão das bolsas de estudo, tanto no Brasil, quanto nas Filipinas.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, da qual me despeço após 12 anos, por toda a contribuição na minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

SALINIDADE DA ÁGUA E DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA SOBRE O ARROZ IRRIGADO ^{1/}

Autor: Felipe de Campos Carmona

Orientador: Ibanor Anghinoni

RESUMO

As lavouras de arroz cultivadas nas Planícies Costeiras do Rio Grande do Sul podem ser afetadas pela salinidade, devido tanto à gênese dos solos, quanto à deposição de sais pela água da irrigação, especialmente da Laguna dos Patos. A salinidade do solo pode prejudicar a emergência e o desenvolvimento da cultura, o que pode ser agravado pela aplicação de fertilizante potássico. Este trabalho teve como objetivos: a) mapear a ocorrência de solos afetados por sais nas Planícies Costeiras do Rio Grande do Sul; b) determinar a possibilidade de uso da água para o cultivo de arroz irrigado nessas regiões; c) avaliar o efeito do manejo do cloreto de potássio sobre essa cultura em solos com diferentes níveis de salinidade; d) avaliar a dinâmica de cátions básicos na solução desses solos e, e) estabelecer o nível crítico à salinidade na emergência. Para o mapeamento da salinidade, foram coletadas 766 amostras de solo, para análise de indicadores de salinidade. A partir dessas amostras, estimou-se o volume de água possível de ser adicionado aos solos sem causar dano à cultura, em função da salinidade da água da Laguna dos Patos. A análise dos efeitos da salinidade e do manejo do potássio sobre a cultura e dessa sobre a dinâmica de cátions, foi realizada a partir de experimentos de campo em solos com quatro níveis de salinidade. A determinação do nível crítico à salinidade na emergência foi realizada em casa de vegetação, no International Rice Research Institute. Os maiores níveis de salinidade do solo foram verificados na Planície Costeira Externa e porção sul da Planície Costeira Interna, sendo que nesses locais a restrição ao uso da água foi maior. Em solos previamente afetados pela salinidade, a aplicação de doses de potássio para alta produtividade na linha de semeadura prejudica o estabelecimento da cultura e o rendimento de arroz. A utilização de água não salina contribui para a diminuição da salinidade desses solos. O nível crítico do arroz para a salinidade na emergência é elevado em relação aos períodos vegetativo e reprodutivo, sendo superior a 20 dS m⁻¹.

^{1/} Tese de Doutorado 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 (116 p.) – fevereiro, 2011. Trabalho realizado com apoio financeiro da CAPES e do Instituto Rio Grandense do Arroz.

WATER AND SOIL SALINITY AND ITS INFLUENCE ON IRRIGATED RICE ^{1/}

Author: Felipe de Campos Carmona

Adviser: Ibanor Anghinoni

ABSTRACT

Rice grown in the Coastal Plains of Rio Grande do Sul, Brazil, can be affected by salinity due to both, genesis of the soils and deposition of salts by irrigation water, especially from the Laguna dos Patos. Soil salinity can affect emergence and development of rice, which can be enhanced by application of potassium fertilizer. This study aimed to: a) map the occurrence of salt affected soils in such Coastal Plains, b) determine the possibility of the use of Laguna dos Patos' water for rice irrigation in these regions, c) evaluate the effect of potassium chloride management on this crop in salt affected soils, d) evaluate the dynamics of basic cations in the soil solution of these soils, and e) establish the critical level of salinity on rice seed emergence. For the salinity mapping, 766 soil samples were taken for analysis of salinity indicators. From these samples, the volume of water of the Laguna dos Patos that can be added to the soil without causing damage to the crop was estimated. The analysis of the effects of salinity and potassium management on rice and on the dynamics of cations, was done from field experiments on soils with four salinity levels. The determination of the critical level of salinity on emergence was made in a greenhouse experiment at the International Rice Research Institute. The highest levels of soil salinity were found in the Outer Coastal Plain and in the southern portion of Inner Coastal Plain, having in these sites, higher restriction on water use. In soils previously affected by salinity, row application of potassium rates for high productivity negatively affects crop establishment and rice yield. The use of non saline water contributes for reducing the salinity of these soils. The critical level of salinity for rice during emergence is high in relation to vegetative and reproductive periods, being superior than 20 dS m⁻¹.

^{1/} Doctoral thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brazil (116 p.) – February, 2011. Research supported by CAPES and Instituto Rio Grandense do Arroz.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. CAPÍTULO I - ESTADO DO CONHECIMENTO ATUAL	3
2.1. Origem da salinidade no solo.....	3
2.2. Origem da salinidade na Laguna dos Patos.....	6
2.3. Salinidade da água e do solo, emergência, estabelecimento, absorção de nutrientes e desenvolvimento das plantas de arroz irrigado.....	9
2.4. Atributos de salinidade e rendimento de arroz irrigado.....	14
2.5. Práticas de manejo para mitigar o efeito salino.....	17
3. CAPÍTULO II - SOLOS AFETADOS POR SAIS NAS PLANÍCIES COSTEIRAS DO RIO GRANDE DO SUL	20
3.1. Introdução.....	20
3.2. Material e Métodos.....	22
3.3. Resultados e Discussão.....	25
3.4. Conclusões.....	32
4. CAPÍTULO III – VIABILIDADE DE USO DA ÁGUA COM DIFERENTES NÍVEIS DE SALINIDADE PARA O ARROZ IRRIGADO, EM SOLOS DAS PLANÍCIES COSTEIRAS DO RIO GRANDE DO SUL	33
4.1. Introdução.....	33
4.2. Material e Métodos.....	35
4.3. Resultados e Discussão.....	38
4.4. Conclusões.....	46
5. CAPÍTULO IV - ATRIBUTOS DE ARROZ IRRIGADO AFETADOS PELA SALINIDADE DO SOLO E PELO MANEJO DO FERTILIZANTE POTÁSSICO	47
5.1. Introdução.....	47
5.2. Material e Métodos.....	49
5.3. Resultados e Discussão.....	53
5.3.1. Atributos de planta afetados pelo manejo do fertilizante potássico.....	53
5.3.2. Relação entre rendimento de grãos e demais atributos de planta nos diferentes níveis de salinidade.....	57
5.4. Conclusões.....	61
6. CAPÍTULO V – ABSORÇÃO PELO ARROZ IRRIGADO E DINÂMICA DE CÁTIONS NA SOLUÇÃO DE SOLOS COM DIFERENTES NÍVEIS DE SALINIDADE	62
6.1. Introdução.....	62
6.2. Material e Métodos.....	64
6.3. Resultados e Discussão.....	68
6.3.1 Estande e massa seca de plantas no florescimento pleno.....	68

6.3.2. Dinâmica de íons na solução do solo e absorção pelas plantas..	69
6.4. Conclusões.....	83
7. CAPÍTULO VI – VARIAÇÃO GENÉTICA NA TOLERÂNCIA À SALINIDADE DURANTE A EMERGÊNCIA.....	84
7.1. Introdução.....	84
7.2. Material e Métodos.....	86
7.3. Resultados e Discussão.....	89
7.4. Conclusões.....	100
8. CONCLUSÕES GERAIS.....	101
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO I	
Tabela 2.4.1.	Classificação dos solos afetados por sais (adaptado de Richards, 1954)..... 15
CAPÍTULO II	
Tabela 3.1.	Estatística descritiva das variáveis relacionadas à salinidade na camada arável de 766 amostras de solo das planícies costeiras do Rio Grande do Sul..... 26
CAPÍTULO III	
Tabela 4.1.	Estatística descritiva referente ao volume de água de irrigação possível de ser adicionado ao solo, em função de diferentes níveis de salinidade da água, em solos das planícies costeiras do Rio Grande do Sul..... 41
CAPÍTULO IV	
Tabela 5.1.	Atributos químicos e teor de argila na camada de 0 – 20 cm dos solos, nos diferentes locais..... 52
Tabela 5.2.	Resumo da análise de variância referente ao estande, a massa da parte aérea em V4 (MPAV4), a massa da parte aérea aos 21 dias após o alagamento (MPA21), a massa da parte aérea aos 42 dias após o alagamento (MPA42), massa da parte aérea da parte aérea no florescimento pleno (MPAFP), a estatura, a leitura de clorofilômetro (Índice SPAD), a massa de perfilhos (MP), a massa de 1.000 grãos (1.000 gr), ao comprimento de panículas (CP) e ao rendimento de grãos (RG), em solos com diferentes percentagens de sódio trocável (PST)..... 54
CAPÍTULO V	
Tabela 6.1.	Atributos químicos iniciais em diferentes locais e camadas dos solos utilizados no experimento..... 65
Tabela 6.2.	Precipitação pluviométrica total dos meses de novembro e dezembro de 2008 e janeiro e fevereiro de 2009 na Fazenda Cavahada e no Município de Mostardas ⁽¹⁾ e média mensal de pluviosidade dos Municípios de Mostardas ⁽²⁾ e Tramandaí ⁽³⁾ 67
Tabela 6.3.	Estande, massa seca e rendimento do arroz irrigado, cultivado em solos com diferentes níveis de salinidade..... 69
Tabela 6.4.	Concentração iônica na solução do solo, absorção de cátions no florescimento pleno e diferença entre a concentração na solução e absorção iônica do arroz irrigado, cultivado em solos com diferentes níveis de salinidade..... 73
CAPÍTULO VI	
Tabela 7.1.	Equações e coeficientes de regressão das curvas sigmoidais de resposta de variedades de arroz expostos a níveis de salinidade por diferentes intervalos de embebição. 91
Tabela 7.2.	Análise de variância referente à absorção de água pelas

sementes de diferentes variedades de arroz expostas à
salinidade por diferentes intervalos de embebição..... 94

RELAÇÃO DE FIGURAS

		Página
CAPÍTULO I		
Figura 2.1.	Sistemas de paleocanais identificados em registros sísmicos ao longo da planície costeira do Rio Grande do Sul (Adaptado de Weschenfelder et al., 2008).	5
Figura 2.2.	Localização geográfica da Lagoa dos Patos, com destaque para a região estuariana (Adaptado de Freitas et al., 2008).	7
CAPÍTULO II		
Figura 3.1.	Localização da área de estudo no Estado do Rio Grande do Sul. Região escurecida representa a abrangência das amostragens de solo nas Planícies Costeiras Interna, Externa e Litoral Norte do Rio Grande do Sul.....	23
Figura 3.2.	Distribuição espacial das amostragens nas planícies costeiras à Laguna dos Patos e Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Coletas realizadas em 2008 e 2009.....	24
Figura 3.3.	Histogramas de frequência das diferentes classes de teor de sódio no solo, percentagem de saturação por sódio na troca e condutividade elétrica do extrato de saturação, em solos cultivados com arroz irrigado nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Entressafras de 2008 e 2009.....	26
Figura 3.4.	Ocorrência de solos afetados por diferentes teores de sódio nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Entressafras de 2008 e 2009.....	28
Figura 3.5.	Ocorrência de solos afetados por diferentes níveis de saturação por sódio na troca, nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Entressafras de 2008 e 2009.....	29
Figura 3.6.	Ocorrência de solos afetados por diferentes níveis de condutividade elétrica do extrato saturado nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Entressafras de 2008 e 2009..	30
CAPÍTULO III		
Figura 4.1.	Localização dos pontos de amostragem de água, nas proximidades dos municípios de Arambaré, São Lourenço do Sul, Pelotas, Rio Grande e Tavares. Coletas realizadas em 2009.....	36
Figura 4.2.	Teor de sódio, em função da condutividade elétrica da água da Laguna dos Patos. *: $p < 0,0001$. Coletas realizadas em 2009..	39
Figura 4.3.	Histogramas de frequência das diferentes classes de volume de água possível de ser adicionada aos solos das planícies costeiras do Rio Grande do Sul, em função da condutividade elétrica da água de irrigação de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ (a), $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ (b), $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ (c) e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (d). Coletas realizadas em 2009.....	42
Figura 4.4.	Volume de água de irrigação com CE de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ (a), $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ (b), $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ (c) e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (d) possível de ser utilizada nas Planícies Costeiras do Rio Grande do Sul, até que a PST do solo atinja 15%.....	45

CAPÍTULO IV

- Figura 5.1.** Localização dos solos com diferentes níveis de salinidade na Fazenda Cavalhada, em Mostardas, Planície Costeira Externa do Rio Grande do Sul..... 50
- Figura 5.2.** Estande (a), massa da parte aérea em V4 (b), massa seca da parte aérea aos 21 DAA (c), massa seca da parte aérea aos 42 DAA (d), massa seca da parte aérea no florescimento pleno (e) e rendimento de grãos (f) de plantas de arroz irrigado em função do manejo da adubação potássica e do nível de salinidade no solo. Médias seguidas pela mesma letra, entre os níveis de salinidade não diferem entre si, pelo teste DMS, a 5% de probabilidade. Mostardas, RS, safra 2008/2009..... 55
- Figura 5.3.** Relação do estande (a), da massa da parte aérea no estádio V4 (b), da massa da parte aérea aos 21 dias após o alagamento (c), da massa da parte aérea aos 42 dias após o alagamento (d), da massa da parte aérea no florescimento pleno (e), da estatura (f), do índice SPAD (g), da massa de perfilhos (h), da massa de 1,000 grãos (i) e do comprimento de panículas (j) com o rendimento de grãos de arroz do cultivar Irga 417, cultivado em solos com diferentes níveis de salinidade e submetido a diferentes manejos da adubação potássica, **: $p < 0,01$. Mostardas, RS, safra 2008/2009..... 59

CAPÍTULO V

- Figura 6.1.** Evolução dos teores de sódio na solução do solo nas diferentes profundidades e níveis de salinidade: baixa - Casamento (a), média - Cavalhada (b), alta - Banhado (c), muito alta - Sinval (d). *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009..... 71
- Figura 6.2.** Evolução dos teores de sódio na lâmina de água (a) e na água de irrigação (b), nos diferentes locais. *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009..... 72
- Figura 6.3.** Evolução dos teores de potássio na solução do solo nas diferentes profundidades e níveis de salinidade: baixa - Casamento (a), média - Cavalhada (b), alta - Banhado (c), muito alta - Sinval (d). *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009..... 74
- Figura 6.4.** Evolução dos teores de potássio na lâmina de água (a) e na água de irrigação (b), nos diferentes locais. *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009..... 75
- Figura 6.5.** Evolução dos teores de cálcio + magnésio na solução do solo nas diferentes profundidades e níveis de salinidade: baixa - Casamento (a), média - Cavalhada (b), alta - Banhado (c), muito alta - Sinval (d). *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009..... 78
- Figura 6.6.** Evolução dos teores de cálcio + magnésio na lâmina de água (a) e na água de irrigação (b), nos diferentes locais. *, **, ***:

	significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.....	79
Figura 6.7.	Evolução da condutividade elétrica (CE) da solução do solo nas diferentes profundidades e níveis de salinidade: baixa - Casamento (a), média - Cavalhada (b), alta - Banhado (c), muito alta - Sinval (d). *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.....	81
Figura 6.8.	Evolução da condutividade elétrica (CE) da lâmina de água (a) e da água de irrigação (b), nos diferentes locais. *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.....	82
CAPÍTULO VI		
Figura 7.1.	Emergência relativa das variedades de arroz IR72046 (a), BR47 (b), FL478 (c), CSR36 (d), Nona Bokra (e) e IR29 (f), submetidos a níveis de salinidade por dois, cinco, 10 e 14 dias. DAE: dias após a embebição. Los Baños, Filipinas, 2010.	90
Figura 7.2.	Índice de velocidade de emergência média de genótipos de arroz submetidos aos níveis de salinidade de zero (a), 12 dS m ⁻¹ (b), 18 dS m ⁻¹ (c) e 24 dS m ⁻¹ (d). Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste DMS (p < 0,05); ns: não significativo. Barras indicam o erro padrão. Los Baños, Filipinas, 2010.....	93
Figura 7.3.	Efeito da salinidade sobre a absorção de água por diferentes genótipos de arroz a um, três e cinco dias após a embebição. Barras indicam o erro padrão. Los baños, Filipinas, 2010.....	95
Figura 7.4.	Liberção de eletrólitos por diferentes variedades de arroz em função do nível de salinidade e do tempo de embebição. Barras indicam o erro padrão. Los Baños, Filipinas, 2010.....	98

1. INTRODUÇÃO

A área cultivada com arroz (*Oryza sativa*, L.) anualmente no Rio Grande do Sul é de cerca de um milhão de hectares, sendo distribuída em seis regiões produtoras: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Costeira Interna (PCI), Planície Costeira Externa (PCE) e Zona Sul. Praticamente 100 % das áreas são irrigadas por alagamento e os mananciais hídricos mais utilizados são rios, arroios, lagoas, lagunas, açudes e águas subterrâneas. Na região Sul e nas Planícies Costeiras, a fonte mais utilizada para irrigação é a Laguna dos Patos que, por ter ligação com o Oceano Atlântico, sofre a sua influência, principalmente em épocas de baixa precipitação pluvial e elevada demanda, tanto atmosférica quanto das próprias lavouras de arroz do seu entorno. A área ocupada por essa Laguna é de 10.144 km², o que dá uma idéia da magnitude da área potencialmente afetada nas suas adjacências. Os meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro são os mais quentes do ano e coincidem com o ciclo de irrigação dos arrozais.

Dependendo do período de desenvolvimento do arroz, em especial o de plântula e reprodutivo, a salinidade da água de irrigação pode causar danos irreversíveis, ocasionando diminuição do perfilhamento, esterilidade de espiguetas e morte de plantas. Com a diminuição do nível de água da Laguna dos Patos, ocorre entrada de água do mar, o que aumenta a concentração de sais a níveis, muitas vezes, prejudiciais à cultura. Rios e lagoas litorâneas estão sujeitos, da mesma forma, a terem aumentada a sua salinidade, em situações propícias à entrada de água do mar.

A dinâmica da salinidade nos mananciais não está apenas relacionada à demanda atmosférica e das lavouras. A incidência de chuvas e direção, duração e

intensidade dos ventos também influi, sendo que, em condições normais de precipitação pluvial, ou acima da média, a tendência é que o problema seja minimizado, ou não ocorra. Desse modo, a salinização dos mananciais, em níveis prejudiciais, pode ocorrer por curtos períodos, ou não ser coincidente com os períodos críticos do arroz irrigado à salinidade. Como a ligação da Laguna dos Patos ao mar ocorre no extremo Sul do Estado, a entrada de água salgada tende a atingir primeiro as lavouras que fazem uso desse manancial naqueles arredores, podendo avançar ou não para outras regiões ao norte, dependendo do seu nível e das condições climáticas.

Entretanto, não é somente o excesso de sais na água de irrigação que pode causar danos diretos à cultura. A entrada de água salina nas lavouras de arroz pode ocasionar o acúmulo, principalmente, de NaCl no solo. Além disso, na PCE, a própria gênese dos solos, originários de sedimentos costeiros, favorece a presença de altos níveis de sódio. Dependendo do nível de salinidade pré-existente, a emergência do arroz pode ser retardada, ou até mesmo inviabilizada, o que gera a demanda de estabelecimento de um nível crítico à salinidade na emergência. Além disso, nestas áreas, o manejo do solo e da adubação também podem prejudicar o estabelecimento da cultura, pelo efeito combinado da higroscopicidade dos fertilizantes, associado ao excessivo teor de sais no solo.

A maioria das cultivares utilizadas atualmente no Rio Grande do Sul é suscetível à salinidade, tanto no período de plântula, quanto no reprodutivo. Tudo isso leva à necessidade do entendimento da dinâmica da salinidade da água e do solo e do conhecimento do seu efeito no crescimento das plantas e no rendimento de grãos do arroz irrigado por inundação, essencial para a sustentabilidade das lavouras nas áreas abrangidas por esse problema.

Este trabalho teve como objetivos gerais: a) avaliar a ocorrência de solos afetados por sais na região costeira do Rio Grande do Sul; b) estimar a possibilidade de uso de água com diferentes níveis de sais, de acordo com a salinidade do solo; c) verificar os efeitos da salinidade do solo e do manejo do fertilizante potássico sobre atributos de planta de arroz; d) avaliar a dinâmica da salinidade da solução do solo ao longo do ciclo planta e e) estabelecer um nível crítico à salinidade na emergência para diferentes cultivares de arroz.

2. CAPÍTULO I - ESTADO DO CONHECIMENTO ATUAL

2.1. Origem da salinidade no solo

A salinidade do solo, dependendo da concentração de sais e do grau de tolerância da cultura ou variedade, pode interferir negativamente no desenvolvimento das plantas. A presença excessiva de sais no solo, em concentrações que os tornam prejudiciais ao desenvolvimento das plantas, é mais comum em zonas de baixa precipitação pluvial e de recepção de solutos provenientes de áreas mais elevadas nas regiões semi-áridas. Áreas que apresentam maior evapotranspiração em relação à precipitação pluvial e que contenham deficiências naturais de drenagem interna, também estão sujeitas à salinidade.

Em regiões áridas, os sais acumulam na zona radicular por dois processos: movimento ascendente de sais de lençóis freáticos pouco profundos e pelos sais remanescentes no solo pela lixiviação insuficiente. A lixiviação ocorre quando são aplicadas ao solo quantidades de água maiores do que este pode armazenar. Isso faz com que os sais solúveis sejam deslocados da zona radicular a profundidades inacessíveis ao sistema radicular dos cultivos (Grattan, 2002).

No Rio Grande do Sul, os solos, de uma maneira geral, estão pouco sujeitos à salinização, mesmo os que apresentam deficiências de drenagem subterrânea, devido ao volume de água das chuvas suficiente para lixiviar os sais solúveis acumulados, especialmente o NaCl. No caso das lavouras irrigadas das Planícies Costeiras à Laguna dos Patos, da região Sul e Litoral Norte do RS, entretanto, problemas de salinidade do solo ocorrem, inclusive devido à gênese daqueles solos, que são formados por sedimentos costeiros. Os depósitos

sedimentares verificados nas planícies costeiras do Estado relacionam-se aos quatro últimos grandes eventos transgressivos – regressivos do período Quaternário (Villwock & Tomazelli, 1995).

A atual posição geográfica das barreiras costeiras do Rio Grande do Sul é resultado da migração, no sentido do continente, de barreiras pré-existentes. A estratigrafia e datações de carbono 14 da barreira holocênica em Tramandaí demonstram que os depósitos sedimentares de fundo lagunar, sobrepostos por depósitos da fase transgressiva, começaram a ser formados sob condições de intensa salinidade no interior da Laguna dos Patos, em razão da pré-existência de uma barreira, situada a alguns quilômetros mar adentro, a sudeste da atual posição (Medeanic & Dillemburg, 2001). Esta barreira migrou no sentido do continente, sobrepondo-se aos depósitos lagunares, em resposta à migração do nível do mar (Travessas, 2003). Registros estratigráficos realizados por Dillemburg et al. (2005) também demonstram que há migração de uma barreira no sentido do continente. Esse deslocamento ainda está em curso, devido a um processo erosivo da linha de costa, decorrente de um balanço negativo de sedimentos (Dillemburg et al., 2000).

Esses sedimentos, que podem ser mais ou menos permeáveis, favorecem o fluxo de água subterrânea, proporcionando uma zona de reação onde a água doce da Laguna dos Patos e a água salgada do mar se misturam (Charette & Sholkovitz, 2006). A frente de água doce-salgada migra em resposta ao nível sazonal de água da Laguna dos Patos e ao gradiente hidráulico da água subterrânea (Niencheski et al., 2007). Em locais onde o lençol freático é mais próximo da superfície e dependendo da evapotranspiração, pode ocorrer a ascendência de sais até a camada arável do solo, prejudicando o desenvolvimento das culturas sensíveis.

Essa ligação subterrânea se dá por estruturas denominadas paleocanais (Figura 2.1). Elementos arquiteturais da plataforma continental gaúcha indicam a existência desses canais desenvolvidos em consequência de eventos regressivos marinhos do Quaternário. Eventos transgressivos subsequentes fizeram com que esses canais fossem preenchidos (Abreu & Calliari, 2005). Toldo Jr. et al. (2000) estudaram a ocorrência de paleocanais no

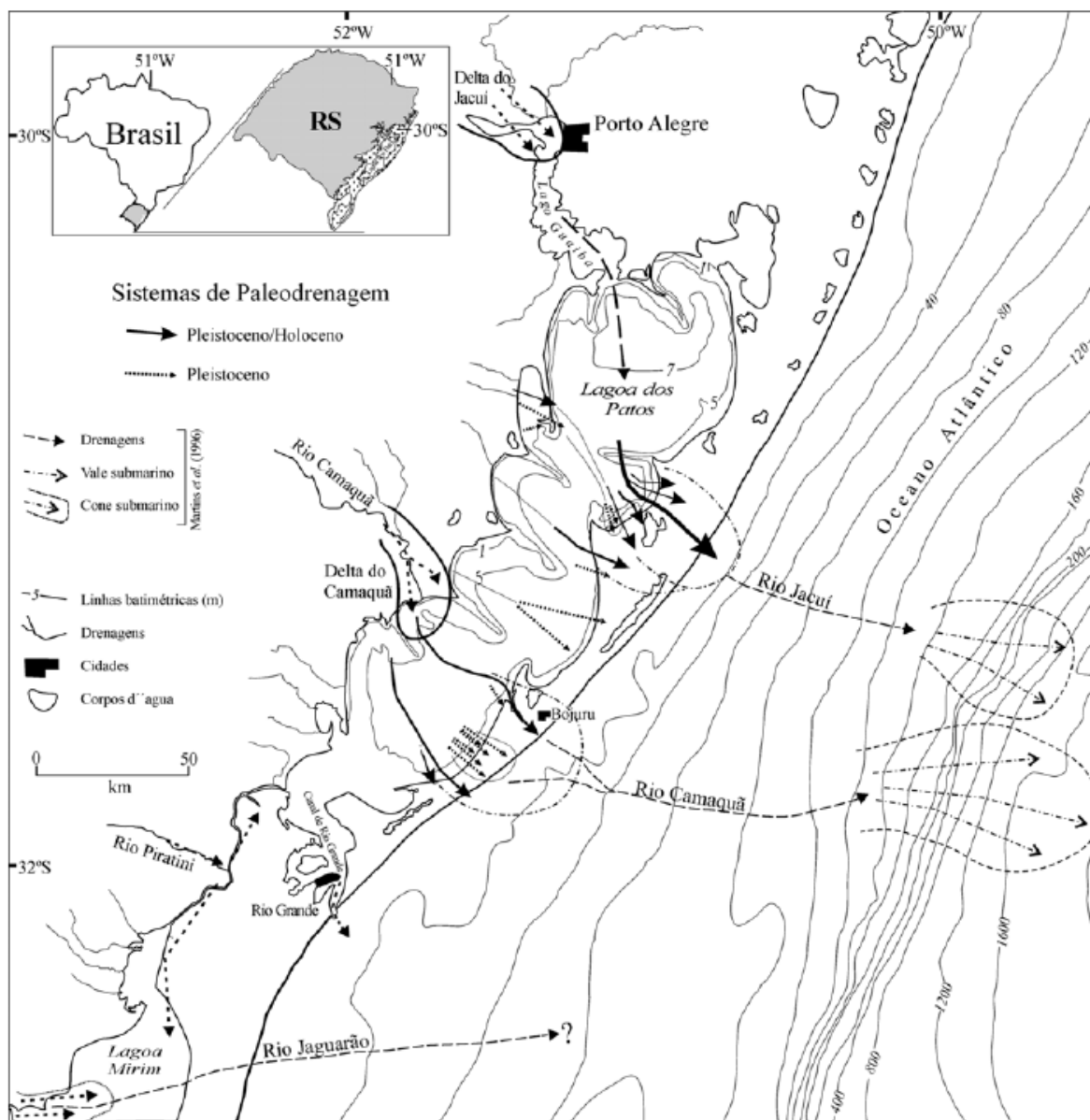


Figura 2.1. Sistemas de paleocanais identificados em registros sísmicos ao longo da planície costeira do Rio Grande do Sul (Adaptado de Weschenfelder et al., 2008).

subfundo da Laguna dos Patos e identificaram o canal fluvial pleistocênico do rio Camaquã, na margem oeste dessa laguna. O sistema de paleocanais mais jovem indica que o seu preenchimento sedimentar ocorreu durante o último grande evento transgressivo (final do Pleistoceno) e de mar alto (Holoceno), quando os canais costeiros foram progressivamente preenchidos por sedimentos fluviais, estuarinos e marinhos (Weschenfelder et al., 2008). Dentre os paleocanais mais

jovens, está o da Barra Falsa (localidade de Bojuru, São José do Norte), antigo canal de ligação entre a Laguna dos Patos e o mar (Toldo Jr et al., 1991). Martins et al. (1996) vincularam as paleodrenagens aos cursos dos principais rios (Jacuí, Sinos, Taquari e Camaquã), que atualmente drenam as terras altas ao norte e ao centro do Estado. O prolongamento inferido ao leito do rio Jacuí tende para estruturas registradas ao largo da cidade de Mostardas, situada na costa oceânica do sistema laguna barreira, assim como o prolongamento do rio Camaquã coincide com a atual Barra Falsa. De modo geral, os paleocanais são relativamente profundos, podendo ter até 3.700 m de extensão (Abreu & Calliari, 2005).

A irrigação de lavouras de arroz com água salina proveniente de rios litorâneos, lagoas e da própria Laguna dos Patos é outro fator que contribui para a salinidade dos solos da região. O acúmulo de sais no solo, dependendo da concentração, pode prejudicar o estabelecimento da lavoura no ano seguinte, caso o excesso de sódio remanescente não seja removido. Nessas regiões, predominam o Planossolo Hidromórfico típico (Unidade de Mapeamento Vacacaí) e o Planossolo Hidromórfico solódico (Unidade de Mapeamento Pelotas) (Pinto et al., 2004).

2.2. Origem da salinidade na Laguna dos Patos

A Laguna dos Patos situa-se entre 30° e 32° de latitude sul, no Estado do Rio Grande do Sul, e é a maior lagoa costeira do Brasil, possuindo 250 km de comprimento e uma largura média de 40 km. Caracteriza-se por ser um corpo de águas rasas, com profundidade média de 5 m, conectando-se ao oceano Atlântico, no Município de Rio Grande, através de um canal com 22 km de extensão, 2 km de largura e 12 m de profundidade, em média, sendo considerada do tipo estrangulada (Kjervfe, 1986). É responsável pela drenagem hídrica de metade da área do Estado (cerca de 200.000 km²), recebendo aportes de diversos rios, principalmente o Camaquã e o Guaíba, e da Lagoa Mirim. Juntamente com o Rio da Prata, constitui a única fonte de água doce para a região costeira adjacente (Castello & Moller Jr, 1977). O estuário da Lagoa dos Patos (Figura 2.2), em sua

porção meridional, ocupa cerca de 10 % da superfície total da lagoa. O canal que conecta o estuário ao mar atua como um filtro amortecedor, confinando grande parte da influência de maré na porção afunilada do estuário e atenuando fortemente sua amplitude (Fernandes et al., 2004).

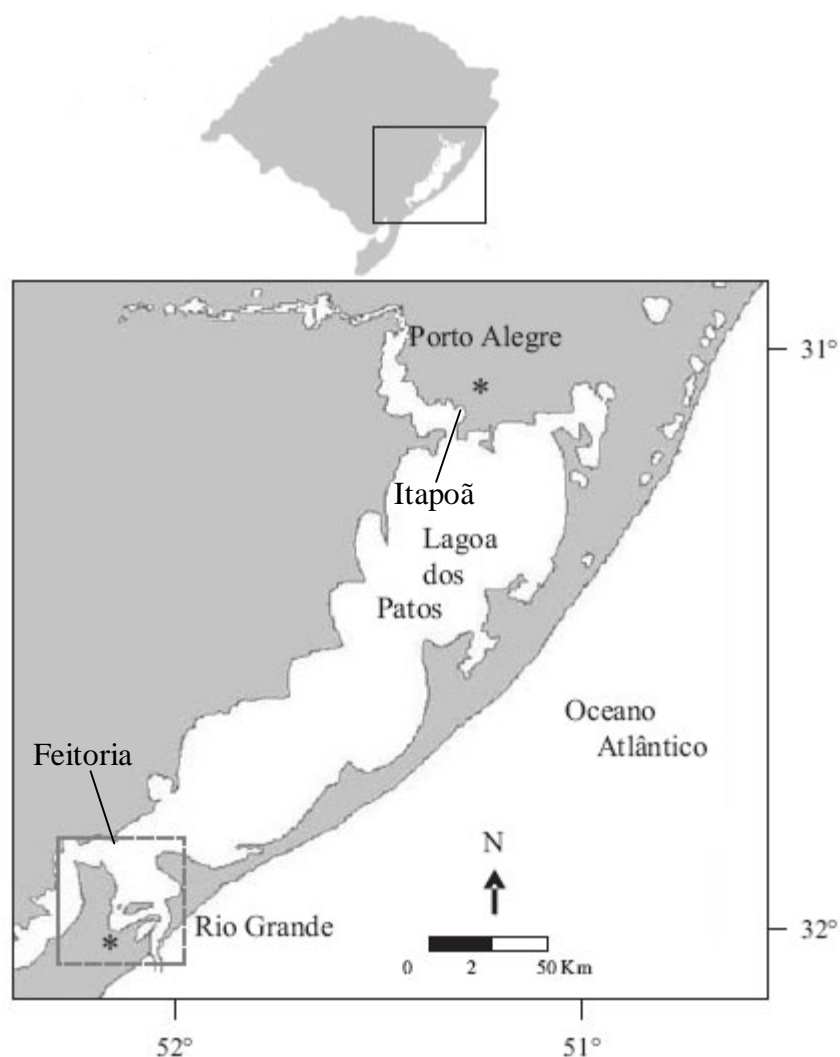


Figura 2.2. Localização geográfica da Lagoa dos Patos, com destaque para a região estuarina (Adaptado de Freitas et al., 2008).

A morfologia da Laguna dos Patos apresenta grande influência na sua resposta aos principais forçantes (Moller Jr. et al., 2001). Nesse sentido, o efeito do vento é importante, devido a grande dimensão da laguna, e também à orientação do seu eixo longitudinal (nordeste-sudoeste), que é alinhado com a

direção predominante dos ventos. No inverno, a passagem de sistemas frontais provoca um aumento na frequência da ocorrência de ventos de quadrante sul (Moller Jr et al., 1996), o que causa empilhamento de água em Itapoã e depressão na Feitoria (Figura 2.2). No oceano adjacente, o transporte de massa (à esquerda da direção do vento) leva a um empilhamento de água na costa. Cria-se, portanto, um gradiente de elevação da superfície. O gradiente de pressão estabelecido nesse caso é responsável por bombear água para o interior da laguna, aumentando a salinidade (Castelão & Moller Jr., 2003). Os fluxos de água do mar, nessas circunstâncias, atingem velocidades entre 1,3 a 2,0 m s⁻¹. O contrário ocorre quando a predominância dos ventos vem do quadrante nordeste. Nesse sentido, a vazão dos principais rios que abastecem a laguna (Guaíba e Camaquã – Figura 2.1) também é de fundamental importância na descarga de água doce no estuário e, por consequência, no oceano (Vaz et al., 2006). Os valores de vazão média são de 8.000 m³ s⁻¹. Em situações extremas, os volumes podem chegar à ordem de 20.000 m³ s⁻¹ (Antiquera & Calliari, 2005), o que diminui consideravelmente a salinidade da água no estuário.

Apesar de não ser tão evidente quanto à descarga superficial, o fluxo de água também pode ocorrer no sub-solo. Esse transporte é um fenômeno freqüente, especialmente quando um aquífero conecta-se com as águas superficiais através de sedimentos permeáveis (Burnett et al., 2003), como é o caso da planície costeira do sul do Brasil. Este transporte pode se dar pelos paleocanais, antes referidos. Windom & Niencheski (2003) sugeriram que uma quantidade significativa dessa água se dirige ao mar por via subterrânea formando estuários, com processos de mistura entre a água doce e marinha em sub-superfície. Já está bem estabelecido que essa mistura subterrânea tende a ser descarregada no mar, principalmente após eventos significativos de chuva, que aumentam o nível da laguna (Machado et al., 2008). Entretanto, a magnitude do fluxo inverso ainda não é conhecida, mas deve ser considerada em épocas de baixa precipitação nas cabeceiras dos principais rios afluentes da Laguna dos Patos, como ocorre em anos de fenômeno climático *La Niña*. Dessa forma, a descarga de água salobra poderia se dar na Laguna dos Patos, constituindo-se essa mais uma fonte de intrusão de sal nesse manancial.

Embora não seja um problema que ocorra em todos os anos, a salinidade da Laguna dos Patos pode ocorrer com uma certa frequência nos meses de janeiro e de fevereiro, devido à menor precipitação hídrica, coincidindo com a fase reprodutiva da cultura (Marcolin et al., 2005). Em monitoramento realizado em diferentes pontos de captação de água da Laguna dos Patos para irrigação do arroz, entre os anos de 2005 e 2007, Fraga et al. (2007) observaram grande amplitude de valores de condutividade elétrica, tanto na Planície Costeira Interna, quanto na Externa, com mínimas abaixo de $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ e máximas acima de $6,0 \text{ dS m}^{-1}$, valor este muito acima do tolerável para a cultura do arroz irrigado, que é de $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ (SOSBAI, 2010).

2.3. Salinidade da água e do solo, emergência, estabelecimento, absorção de nutrientes e desenvolvimento das plantas de arroz irrigado

A salinidade afeta as plantas de espécies sensíveis de diferentes formas, ocasionando estresses osmóticos, iônicos ou desordens nutricionais (Läuchli & Epstein, 1990). A presença elevada de sais na solução do solo pode restringir ou mesmo inviabilizar o cultivo do arroz. Sementes de plantas halófitas cultivadas em meio salino tendem a apresentar menor imbibição, o que prejudica a germinação e a alongação radicular (Katembe et al., 1998). Os mecanismos associados à resposta do arroz ao excesso de sais na germinação ainda não são totalmente compreendidos, mas devem incluir efeitos osmóticos, assim como toxidez direta causada por alguns íons, desbalanço nutricional, ou a combinação desses fatores (Alam et al., 2003).

À medida que as plantas se desenvolvem e aumenta sua demanda por água, há tendência de ocorrer maior concentração de sais ao redor das raízes, pelo aumento da evapotranspiração das plantas (Grattan et al., 2002). Reduções na taxa de crescimento ocorrem, pois, além da toxicidade pela alta concentração de sais, as plantas ficam incapacitadas de absorver quantidade suficiente de água, pelo decréscimo do componente osmótico do potencial hídrico do solo (Tester & Davenport, 2003). A absorção de água pelas raízes das plantas por osmose é um processo que envolve o movimento da água de um local com baixa concentração

de sais, como o solo, para locais de alta concentração de sais, no interior das células das raízes. Conforme aumenta a concentração de sais no solo, o movimento da água da solução para as raízes diminui. Já, quando a concentração de sais é mais alta no solo em relação ao interior das raízes, o movimento é invertido podendo causar a dessecação de plantas e até a morte. O prolongado estresse hídrico causa murchamento semelhante ao ocasionado pela seca, com as folhas do arroz apresentando coloração verde-azulada, espessamento e maior cerosidade (Ayers & Westcot, 1985).

A tolerância do arroz à salinidade varia conforme o estágio de desenvolvimento da cultura (Pearson, 1959), sendo os períodos de plântula e reprodutivo críticos à salinidade da água de irrigação, enquanto que o maior nível de tolerância se dá durante a germinação (Hayward & Bernstein, 1958), período em que o nível crítico de algumas variedades pode chegar a até 24 dS m⁻¹ (Djaraguiram et al., 2003).

Quando em níveis acima do tolerável, a salinidade da água ocasiona diminuição do perfilhamento e aumento da esterilidade das espiguetas (Ehrler, 1960). Vários estudos, com diferentes genótipos e em diferentes locais e ambientes (Fageria, 1991; Zeng et al., 2001; Grattan et al., 2002; Rodrigues et al., 2005; Melo et al. 2006), demonstraram relação linear entre o aumento dos níveis de salinidade e a diminuição do número de perfilhos, além do aumento do número de perfilhos não produtivos (Castillo et al., 2007). O estresse salino ocasiona, também, redução da fotossíntese, devido à diminuição da disponibilidade de CO₂ no interior das folhas, pelo fechamento de estômatos. Isto acarreta uma série de efeitos cumulativos, pois são afetados os potenciais hídrico e osmótico das folhas, a condutância estomatal, a taxa de transpiração, o conteúdo relativo de água nas folhas, além da síntese de constituintes bioquímicos. Esses efeitos, somados, acarretam um menor acúmulo de foto-assimilados nas folhas e afetam o rendimento de grãos (Sultana et al., 1999).

Os efeitos negativos da salinidade sobre o desenvolvimento das plantas estão relacionados, principalmente, à diminuição da transpiração, pela sua alta correlação com o índice de área foliar (Asch et al., 2005), o que ocasiona redução da assimilação da radiação fotossinteticamente ativa para a produção de

biomassa (Monteith, 1994). A redução no desenvolvimento das plantas com o aumento da salinidade pode ser atribuída, também, a alterações na partição de foto-assimilados (Zeng et al., 2003), devido ao aumento dos processos de consumo de energia, tais como ajuste osmótico e processos de transporte ativo de íons, pelo excesso de sais na planta (Asch et al., 2000). Segundo Taiz & Zeiger (2002), algumas espécies de plantas se adaptam às condições de salinidade por evitarem a desidratação, pela redução do potencial osmótico das células. Entretanto, a taxa de crescimento é reduzida. Embora muitas plantas possuam mecanismo de ajuste osmótico, que se dá com a compartimentação de íons absorvidos nos vacúolos das células, e consigam sobreviver, parte da energia utilizada neste mecanismo pode se refletir negativamente no desenvolvimento das estruturas vegetais.

Outra consequência frequentemente associada à salinidade, é a menor estatura de planta do arroz. Ela reflete o comprimento da folha mais longa, que é a mais jovem (Walfare et al., 1996). Uma menor produção de matéria seca das plantas, portanto, resulta de uma menor emissão de novas folhas, pela diminuição da emissão de perfilhos, o que ocasionará, conseqüentemente, a redução da estatura do arroz. Para Cramer (1993), além das diferenças genótípicas para tolerância à salinidade, os mecanismos que inibem o alongamento foliar, quando da exposição a curtos períodos de estresse, aparentemente são específicos para cada espécie de gramínea.

O efeito do excesso de sais sobre a transpiração das plantas deve ser considerado como um dos principais fatores que determinam a tolerância do arroz à salinidade. A eficiência no consumo de água determinará o suprimento, por fluxo de massa e, conseqüente absorção de macronutrientes, como o cálcio e o magnésio (Barber, 1995), afetando o desenvolvimento das plantas; e de íons tóxicos, como o próprio sódio, já que o arroz sofre pela excessiva absorção desse íon pelos tecidos fotossinteticamente ativos, o que leva a perdas em rendimento. Segundo Asch et al. (2005), o controle da absorção e da distribuição do sódio no tecido é uma característica importante para resistência à salinidade, preferencialmente combinada com alta tolerância à presença de sódio nas folhas. A imobilização desse elemento em alguns tecidos, como a bainha das folhas,

pode estar relacionada à taxa de transpiração da planta, pois esta determina a velocidade de transporte dos íons no xilema, sendo que a menor velocidade de transporte capacitaria a planta a armazenar o sódio em tecidos fisiologicamente menos ativos. Com isso, variedades de arroz tolerantes à salinidade teriam um mecanismo de transpiração independente, que imobilizaria o sódio nesses tecidos, protegendo as demais estruturas das folhas do seu excessivo acúmulo.

No período reprodutivo do arroz, a salinidade causa variações morfológicas semelhantes à de outros estresses ambientais, que causam inibição do crescimento de estruturas das plantas, como a degeneração das ráquis primárias e secundárias e das espiguetas nas panículas (Cui et al., 1995). Nessas circunstâncias, a esterilidade de espiguetas é um parâmetro que se correlaciona negativamente com o rendimento de grãos da cultura (Kathun et al., 1995). Além disso, esses autores verificaram correlação entre os teores de Na no pólen das plantas com o das folhas bandeira, o que pode vir a ser uma ferramenta de predição da esterilidade de espiguetas. Uma vez que a diferenciação das ráquis primária e secundária e das espiguetas ocorre durante um breve intervalo, no início da formação da panícula, o estresse salino anterior ou durante essa fase causa maiores danos à formação das espiguetas, em comparação ao estresse causado após esse período, que é menor ou nulo (Zeng et al., 2001).

Efeitos antagônicos na absorção de nutrientes podem ocorrer sob condições de excessiva disponibilidade de Na^+ , causando deficiências nutricionais no arroz. O desbalanço gerado pelos excessivos teores Na^+ e Cl^- na solução causam decréscimo nos conteúdos de K e Ca nos tecidos (Ahmad et al., 2007; Fageria, 1991), diminuindo, respectivamente, as relações K/Na e Ca/Na. Isso ocorre porque as células mantêm um balanço entre cátions e ânions. Um aumento no conteúdo de Cl nas células, como resultado do alto nível de salinidade, traz consigo o aumento do teor de Na. Como o total de cargas na célula deve ser balanceado, o aumento no nível de Na resulta em diminuição nos teores de K e Ca (Cramer et al, 1985). Altos níveis de sódio, ou baixa relação K/Na no solo, podem deflagrar uma série de processos enzimáticos no citoplasma da planta, permitindo que o sódio compita com o potássio pelos sítios de absorção (Obata et al., 2007), sendo que capacidade da planta em manter alta a relação K/Na no

citosol é premissa básica para o adequado crescimento em solos salinos (Glenn et al., 1999).

Valores absolutos da concentração foliar de íons podem ser usados para distinção entre variedades de arroz “sódio-inclusoras” e “sódio-evitadoras”. A alta concentração de Na nas folhas indica uma “sódio-inclusora” e, tendo esta elevada relação K/Na, têm também a habilidade de absorver K em detrimento do estresse salino. Por outro lado, “sódio-evitadoras” requerem uma menor quantidade de potássio para atingir alta relação K/Na, e têm, portanto, menor concentração foliar de sódio (Asch et al., 2000). Cultivares tolerantes têm maior capacidade de absorção de K^+ e maior conteúdo de Ca nos tecidos (Fageria, 1991); maior eficiência na exclusão de Na^+ e Cl^- e rápido crescimento vegetativo, resultando em diluição do Na nos tecidos. O nível crítico de concentração de NaCl nos tecidos, entretanto, varia amplamente entre variedades. A razão $Na:K < 2:1$ nos grãos pode indicar variedades tolerantes à salinidade, entretanto, o excesso de absorção de Na^+ diminui o peso de grãos e o conteúdo total de proteínas (IRRI, 2007).

Carmona et al. (2009), em estudo realizado com a cultivar IRGA 417 em solos com diferentes níveis de salinidade, observaram redução, na parte aérea, das relações Mg/Na e, principalmente, Ca/Na, que, no solo com saturação por sódio na troca de 20%, foi 2,5 vezes menor em relação à testemunha. Esses autores relataram também efeitos antagônicos entre os níveis de sódio adicionados e a absorção de potássio pelo arroz. Nesse sentido, o excesso de Na^+ no solo pode causar a perda de íons K^+ , em função da despolarização da membrana e substituição por íons Na^+ (Cramer et al., 1991). Os dois cátions têm átomos similares e os transportadores de K^+ são menos específicos em níveis tóxicos de Na^+ (Castillo et al., 2007). A relação entre os íons K e Na é um indicador de tolerância à salinidade, pois reúne duas características desejáveis: alta absorção de K, necessária para os processos metabólicos e ajuste osmótico, e a absorção de sódio, como um indicador do nível de estresse (Garcia et al., 1997).

Os programas de melhoramento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul foram desenvolvidos, em sua maioria, em condições de salinidade baixa ou nula.

Portanto, não se espera haver genótipos resistentes entre as cultivares produzidas (Marcolin et al., 2005). A variedade IRGA 417, por exemplo, pode ser considerada sensível, pois apresentou 65% de espiguetas estéreis quando submetidas à irrigação contínua com água salinizada na concentração de 0,2% de NaCl a partir da diferenciação do primórdio floral (Marcolin & Macedo, 2001). A cultivar BRS Bojuru, por outro lado, apresentou incremento linear na matéria seca das raízes com o incremento da salinidade, o que foi atribuído à habilidade de alocar mais assimilados ao sistema radicular, de modo a superar o excesso salino. Isso faz com que essa cultivar tenha maior relação raiz/parte aérea, pois envia menos assimilados à parte aérea em comparação às raízes (Lima et al., 2005). Esses mesmos autores constataram que nos outros materiais estudados, que foram considerados sensíveis, a relação raiz/parte aérea decresceu com o aumento da concentração salina, pois houve maior efeito prejudicial sobre as raízes em relação à parte aérea, pelo contato direto com a água salina.

Mesmo em trabalhos de pesquisa com genótipos reconhecidamente sensíveis ao estresse salino, alguns experimentos têm sido realizados na tentativa de forçar as plântulas a desenvolver mecanismos de tolerância ao agente estressor. *Hardening*, ou *acclimation* consiste em um processo no qual as sementes ou mudas são submetidas a algum fator limitante, o que facilita a adaptação das plantas, em fases posteriores ao mesmo estresse imposto (Taiz & Zeiger, 2002). No caso do arroz irrigado, a germinação de sementes em água com altos teores de sais poderia promover melhor desempenho das plantas durante os períodos críticos à salinidade (Rodrigues et al., 2005).

2.4. Atributos de salinidade e rendimento de arroz irrigado

Os solos são classificados, conforme o seu nível de salinidade, em salinos, quando apresentam altas concentrações de sais na solução do solo; sódicos, quando o teor de Na⁺ disponível no solo se encontra em concentrações que restringem o crescimento das plantas cultivadas e promovem a dispersão e lixiviação de colóides ao longo do perfil; e salino-sódicos, quando apresentam as características de ambos (Quadro 2.4.1). Os solos sódicos apresentam

percentagem de sódio trocável (PST) acima de 15 %. É a partir desse valor que suas propriedades físicas, em especial a condutividade hidráulica, passam a ser afetadas (Richards, 1954; Embrapa, 2006). Entretanto, esse valor foi estabelecido para as condições do oeste dos Estados Unidos, não podendo ser aplicado para todos os solos, pois diferentes texturas e mineralogias podem levar a valores críticos de PST diferenciados, pela modificação da estrutura física (Freire & Freire, 2007). Para efeitos práticos, neste trabalho, não se está fazendo a distinção entre as três diferentes classes de solos afetados por sais, generalizando-se a terminologia “salinidade”, tanto para solos salinos, quanto sódicos e salino-sódicos.

Tabela 2.4.1. Classificação dos solos afetados por sais (adaptado de Richards, 1954).

Classificação	CE dS m ⁻¹	pH	PST %
Salino	> 4	< 8,5	< 15
Sódico	< 4	> 8,5	> 15
Salino-sódico	> 4	< 8,5	> 15

Assim como o solo, todos os mananciais de água de irrigação possuem sais minerais dissolvidos. Sua composição e concentração, entretanto, são variáveis conforme a fonte de água, sendo que muitos desses sais são benéficos às culturas. No entanto, a alta salinidade pode restringir ou mesmo inviabilizar o cultivo, além de apresentar elementos em concentrações tóxicas (Silva, 2004). Os sais mais comuns na água de irrigação são o cloreto de sódio (NaCl), o gesso (CaSO₄), o sulfato de magnésio (MgSO₄) e o bicarbonato de sódio (NaHCO₃) (Grattan, 2002). Segundo Asch et al. (2000), o principal sal nas águas de irrigação é, normalmente, o NaCl. Há quatro critérios básicos para se avaliar a qualidade da água de irrigação (Ayers & Westcot, 1985): conteúdo total de sais solúveis (salinidade), proporção relativa de sódio em relação a outros cátions (sodicidade), alcalinidade total, relacionada à presença de cálcio e magnésio (alcalinidade) e concentração de elementos traço que podem causar toxicidade.

A tolerância do arroz irrigado à salinidade do solo se restringe até a condutividade elétrica de 3,0 dS m⁻¹, medida na zona da raiz, denominada de CE

efetiva (CEe). A relação entre a CE na água de irrigação (CEi) e a CEe depende da fração de água lixiviada (FL), ou seja, da quantidade da água de irrigação que se move abaixo da zona da raiz, que, por sua vez, varia com a textura do solo. A CEe de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ corresponde a diferentes CEi, de acordo com a seguinte relação: $CEe = CEi/2,2FL$ (Ayers & Westcot, 1985).

Na Austrália, os valores de FL foram estabelecidos para os solos cultivados com arroz irrigado e variam de 0,6, para os de textura arenosa, até 0,2 para os de textura muito argilosa (QNRNE, 2004). No Rio Grande do Sul, nas áreas sujeitas ao problema, predominam os solos francos e arenosos. Nesses casos, os valores de FL devem variar de 0,3 a 0,45, o que corresponderia à CEi entre $2,0$ e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Marcolin et al., 2005). Em solos de textura argilosa, esse valor poderia ser em torno de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$. Ainda, segundo esses autores, para avaliação do dano pela salinidade, é necessário conhecer a perda de produtividade de arroz em função do aumento da condutividade elétrica na zona da raiz (CEe). Mas essa relação não é conhecida para as condições de solo e de salinidade no RS.

A CEe tende a aumentar com o tempo, podendo ser maior que a CEi, devido ao acúmulo de sais na zona radicular, que tende a aumentar com o crescimento das plantas e conseqüente aumento da evapotranspiração das mesmas (Schoenfeld et al., 2007). Em experimento realizado a campo no Vale do Rio Sacramento, EUA, Grattan et al. (2002) testaram a adição de água com CEi variando de $0,4 \text{ dS m}^{-1}$ a 10 dS m^{-1} e encontraram relação linear entre a CEe, na camada de 0 a 7,6 cm de solo e a CEi, o que podia ser expresso pela equação: $CEe = 1,17 \times CEi + 1,2$ ($r^2 = 0,88$). Nesse estudo, o nível crítico de salinidade da lâmina de água foi estabelecido como sendo de $1,9 \text{ dS m}^{-1}$, e o potencial de rendimento do arroz pôde ser estimado pela equação:

$$\% \text{ Rendimento} = 100 - 9,1 \times (CEi - 1,9)$$

Isto indica que, no Vale do Rio Sacramento, o nível crítico de salinidade na zona da raiz é de $1,9 \text{ dS m}^{-1}$, que é menor do que $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, anteriormente

estabelecido para o arroz irrigado (IRRI, 2007), cujo potencial de rendimento em função da CEi é expresso por:

$$\% \text{ Rendimento} = 100 - 12 \times (\text{CEi} - 3,0)$$

2.5. Práticas de manejo para mitigar o efeito salino

Um adequado sistema de drenagem das áreas afetadas, assim como a porosidade natural do solo, permitem a percolação da água no perfil e são tão importantes quanto a água de boa qualidade no processo de lavagem do solo. Estudos desenvolvidos pela FAO (2005), após a ocorrência de um *tsunami*, que causou a inundação de lavouras de arroz com água do mar, na província de Aceh, Indonésia, em dezembro de 2004, demonstram que a quantidade de água infiltrada requerida para lixiviar o excesso de sais pode ser estimada de maneira relativamente simples, bastando, para isso, medir a CEe. A quantidade de água necessária para reduzir a CEe a valores inferiores a 4 dS m^{-1} , pela lixiviação dos sais, varia de 315 mm, em solos com CEe de 10 dS m^{-1} a 765 mm, onde a CEe é de 30 dS m^{-1} . Deve-se ressaltar que os valores não expressam a precipitação pluvial necessária e sim a quantidade de água que deve passar pelo sistema radicular. Isso porque, boa parte da água da chuva pode ser perdida por escoamento ou evaporação superficial. Na Austrália, a quantidade adicional de água de boa qualidade necessária para evitar concentrações tóxicas de sais na zona das raízes varia de 5 - 10% em relação à total, quando a CE da lâmina de água for de 2,0 a $2,25 \text{ dS m}^{-1}$, a 20 - 30%, onde a CE na água da lavoura for de 3,0 a $3,5 \text{ dS m}^{-1}$ (QNRME, 2004).

A adição de água salina ao solo pode também diminuir sua taxa de infiltração, dependendo do percentual de Na^+ em relação a Ca^{2+} e Mg^{2+} . Essa relação é conhecida como Relação de Adsorção de Sódio (RAS). Quanto maior a RAS, maior é a dispersão da argila, o que contribui para a destruição dos macroporos do solo e aumento de camadas impermeáveis (Grattan, 2002). Neste caso, a aplicação de gesso agrícola ao solo é uma alternativa viável para mitigar

os efeitos do Na^+ sobre a estrutura do solo. O gesso, quando em contato com a água, se dissolve em Ca^{2+} e SO_4^{2-} . O Ca^{2+} , em altas quantidades em relação ao Na^+ , o substitui nas cargas negativas do solo às quais o Na^+ está adsorvido, promovendo a floculação da argila e reestruturação do solo, melhorando as taxas de infiltração de água. Todavia, a adição demasiada de gesso pode causar a acidificação do solo, sendo recomendado apenas em condições de pH 8,5, no mínimo (FAO, 2005). Isso não foi verificado de maneira significativa por Ruiz et al. (2004), em um experimento de curta duração, em que atribuem a redução do pH a substituição do sódio adsorvido pelo cálcio do corretivo, além da precipitação dos carbonatos de sódio existentes.

No caso do arroz irrigado, no entanto, é interessante que se mantenha uma camada sub-superficial impermeável, justamente para manutenção de uma lâmina de água sobre a superfície. Neste caso, o benefício da adição de gesso se daria apenas pela extrusão do Na^+ adsorvido às cargas do solo. A necessidade de gesso (NG) requerida para redução da PST a um determinado nível pode ser estimada pela seguinte equação (Vitti et al., 1995):

$$\text{NG (kg ha}^{-1}\text{)} = [(\text{PSTi} - \text{PSTd}) \times \text{CTC} \times \text{d} \times \text{p} \times 86]/100,$$

Onde “PSTi” é a percentagem de sódio trocável inicial; “PSTd” é a percentagem de sódio trocável desejada; “CTC” é a capacidade de troca de cátions, em $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; “d” é a densidade do solo (g cm^{-3}) e “p” é a profundidade do solo a ser recuperada. Existem, também, outras opções de aplicação de produtos ao solo. Gomes et al. (2000) relataram a redução da PST na camada de 0-20 cm de 48,5% para 14% (diminuição de 71%) em um intervalo de 40 dias, num solo salino-sódico do perímetro irrigado do Rio São Francisco, pela adição de 40 Mg ha^{-1} de esterco de curral ao solo. A vinhaça e a própria casca de arroz também se mostraram efetivas na redução da PST. Outros produtos à base de enxofre (S), também podem ser utilizados. A efetividade do enxofre depende de sua oxidação e da presença de Ca^{2+} no solo, para que haja a substituição do Na^+ disponível pelo Ca^{2+} (Freire & Freire, 2007).

Da mesma forma, a aplicação de calcário, tanto calcítico quanto dolomítico, pode se constituir em alternativa de mitigação. O aumento dos teores

de Ca^{2+} e Mg^{2+} na solução do solo pode substituir, a exemplo do que ocorre com o gesso, o Na^+ nos pontos de troca do solo, favorecendo a sua lixiviação.

O correto manejo da adubação potássica também pode se constituir em alternativa de mitigação dos efeitos da salinidade do solo. Atualmente, a recomendação de adubação potássica para altas produtividades em solos com $\text{CTC} < 15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e teor baixo de K pode chegar a até 90 kg ha^{-1} de K_2O (SOSBAI, 2010). Dependendo do percentual de sódio trocável (PST) no solo, o efeito prejudicial do adubo contendo esse nutriente (KCl), aplicado na linha de semeadura, pode agravar o efeito da salinidade no estabelecimento das plantas de arroz. Neste contexto, a alternativa, já adotada por alguns produtores, é a aplicação de fertilizantes a lanço como uma forma de mitigar os danos que o contato do adubo com as sementes pode causar no estande de plantas. Além disso, essa prática apresenta outras vantagens, pois favorece a adubação previamente à semeadura, o que permite um melhor aproveitamento da mão-de-obra ao longo do tempo, além de permitir ao produtor total enfoque apenas na semeadura (Carmona et al., 2005). Isto, porque o intervalo para semeadura, da maioria dos cultivares de arroz utilizados no RS, vai de setembro até meados de novembro (SOSBAI, 2010), período em que, devido à ocorrência das chuvas de primavera, restringe as operações mecanizadas (Stulp et al., 1997). Em propriedades de grande porte, a adubação a lanço efetuada alguns dias ou semanas antes da semeadura pode significar a semeadura do arroz na época correta, uma vez que semeadoras utilizadas apenas com sementes têm seu rendimento de trabalho aumentado, em comparação à prática de semeadura e adubação em linha simultaneamente.

3. CAPÍTULO II - SOLOS AFETADOS POR SAIS NAS PLANÍCIES COSTEIRAS DO RIO GRANDE DO SUL

3.1. Introdução

No Rio Grande do Sul, os solos, de uma maneira geral, estão pouco sujeitos à salinização, mesmo os que apresentam deficiências de drenagem subterrânea. Isto ocorre devido ao volume de chuvas suficiente para lixiviar os sais solúveis acumulados, especialmente o NaCl. No caso das lavouras de arroz irrigado das planícies costeiras do RS, entretanto, problemas de salinidade do solo podem ocorrer, devido à irrigação com água salina e à própria gênese daqueles solos, que são formados por sedimentos de origem marinha e flúvio-lacustre (Villwock & Tomazelli, 1995). A porção sul da costa brasileira é dominada por lagoas costeiras separadas do oceano por uma pequena barreira arenosa que funciona como um obstáculo ao fluxo superficial de água doce (Machado et al., 2008).

A irrigação de lavouras de arroz com água salina proveniente de rios litorâneos (Tramandaí e Mampituba, principalmente), de lagoas e, principalmente, da Laguna dos Patos, são fatores que contribuem para a salinidade dos solos da região. O acúmulo de sais no solo, dependendo da quantidade, pode prejudicar o estabelecimento da lavoura nos anos subsequentes, caso o excesso de sódio remanescente não seja removido. Nas planícies costeiras do Estado, a principal fonte de água para irrigação das lavouras de arroz é a Laguna dos Patos, que se caracteriza por ser um corpo de águas rasas conectada ao oceano Atlântico, no município de Rio Grande, por um canal com 22 km de extensão, 2 km de largura e 12 m de profundidade, em média (Kjervfe, 1986). No inverno, a passagem de

sistemas frontais aumenta a frequência da ocorrência de ventos de quadrante sul (Moller Jr et al., 1996), o que gera um gradiente de elevação da superfície. O gradiente de pressão estabelecido, nesse caso, é responsável por bombear água do mar para o interior da laguna, aumentando a sua salinidade (Castelão & Moller Jr, 2003), principalmente na região estuarina, em sua porção meridional, que ocupa cerca de 10 % da superfície total do corpo lagunar. No verão, a salinização da Laguna dos Patos pode ocorrer com frequência nos meses de janeiro e fevereiro, coincidindo com o período reprodutivo da cultura (Marcolin et al., 2005). Em monitoramento realizado em diferentes pontos de captação de água da Laguna dos Patos para irrigação do arroz, entre os anos de 2005 e 2007, Fraga et al. (2007) observaram grande amplitude de valores de condutividade elétrica, em diversos pontos de captação de canais de irrigação localizados tanto na margem oeste (Planície Costeira Interna à Laguna dos Patos – PCI), quanto na leste (Planície Costeira Externa à Laguna dos Patos – PCE), com mínimas abaixo de $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ e máximas acima de 6 dS m^{-1} , valor este muito acima do tolerável para a cultura do arroz (Ayers & Westcot, 1985).

Apesar de não ser tão evidente quanto à descarga superficial, o fluxo de água também pode ocorrer subsuperficialmente. Esse transporte é um fenômeno freqüente, especialmente quando um aquífero conecta-se com as águas superficiais através de sedimentos permeáveis (Burnett & Dulaiova, 2003), como é o caso da planície costeira do sul do Brasil. Windom & Niencheski (2003) sugeriram que uma quantidade significativa dessa água se dirige ao mar por via subterrânea formando verdadeiros estuários, com processos de mistura entre a água doce da Laguna dos Patos e a marinha do Oceano Atlântico. Já está bem estabelecido que essa mistura subterrânea tende a ser descarregada no mar, principalmente após eventos significativos de chuva, que aumentam o nível da laguna (Machado et al., 2008). Entretanto, a magnitude do fluxo inverso ainda não é conhecida, mas deve ser considerada em épocas de baixa precipitação nas cabeceiras dos principais rios afluentes da Laguna dos Patos, como ocorre em anos do fenômeno climático *La Niña*, o que diminui o nível desse manancial. Dessa forma, a descarga de água salobra poderia se dar na laguna, constituindo-se esta mais uma fonte de intrusão de sal.

Apesar dos esforços recentes sobre a temática no Rio Grande do Sul (Marcolin et al., 2005), ainda não se tem uma dimensão da área e do grau de salinidade dos solos afetados por sais. Nesse sentido, já está bem estabelecido que o problema tende a ocorrer nas várzeas adjacentes à porção sul da Laguna dos Patos, pela proximidade do seu contato com o mar, o que é confirmado pela ocorrência de Planossolos Hápicos solódicos e Planossolos Nátricos (Pinto et al., 2004), além dos solos próximos à foz de rios que se ligam ao mar, como o Tramandaí e o Mampituba, no litoral norte do Estado.

Neste contexto, o levantamento dessas áreas é, atualmente, uma demanda real e importante para dimensionar o problema no Estado e para estabelecer estratégias de ação que visem minimizar ou corrigir esse problema, sendo a geoestatística uma ferramenta auxiliar para o mapeamento das áreas afetadas. Este trabalho teve por objetivo mapear a ocorrência de solos afetados por sais nas planícies costeiras do estado do Rio Grande do Sul.

3.2. Material e Métodos

O trabalho foi realizado entre os meses de julho e setembro de 2008 e de maio e agosto de 2009. A região de estudo foi sub-dividida em três: Planície Costeira Interna (PCI) à Laguna dos Patos, cujos municípios com maior representatividade no cultivo de arroz são Camaquã, Rio Grande, Arambaré, Tapes e Pelotas; Planície Costeira Externa (PCE) à Laguna dos Patos, com destaque para os municípios de Mostardas, Viamão e Palmares do Sul; e Litoral Norte, onde as maiores áreas plantadas ocorrem em Santo Antônio da Patrulha, Osório e Torres. A abrangência de amostragem se estendeu entre os municípios de Rio Grande, localizado às margens da extremidade sul da Laguna dos Patos, e Torres, último município do Litoral Norte do Rio Grande do Sul (Figura 3.1), na divisa com Santa Catarina.

Foram coletadas 766 amostras de solo em áreas das planícies costeiras com histórico de cultivo de arroz irrigado por inundação, sistema de irrigação adotado em praticamente 100 % das lavouras gaúchas (Oliveira, 2006), ou em áreas com potencial de uso pela cultura, no caso, planossolos e gleissolos. Com

base nas informações prévias de extensionistas dos núcleos de assistência técnica locais do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA); lideranças regionais da cadeia orizícola e das comunidades locais; técnicos da iniciativa privada e produtores de arroz, foi efetuado o levantamento de reconhecimento, com base em prospecções a intervalos alternados. A densidade de amostragem foi de 0,08 observação km^{-2} (levantamento de reconhecimento de baixa intensidade) nos locais onde não havia histórico ou conhecimento prévio do problema, e 10 observações km^{-2} (levantamento de reconhecimento de alta intensidade) onde comprovadamente havia efeito da salinidade sobre a cultura, adotando-se metodologia de amostragem proposta pela EMBRAPA (1995). A sintomatologia típica do estresse por salinidade em arroz irrigado é de fácil identificação no campo e se manifesta por falhas no estande, redução na estatura de planta, morte de perfilhos e esterilidade de espiguetas, principalmente.

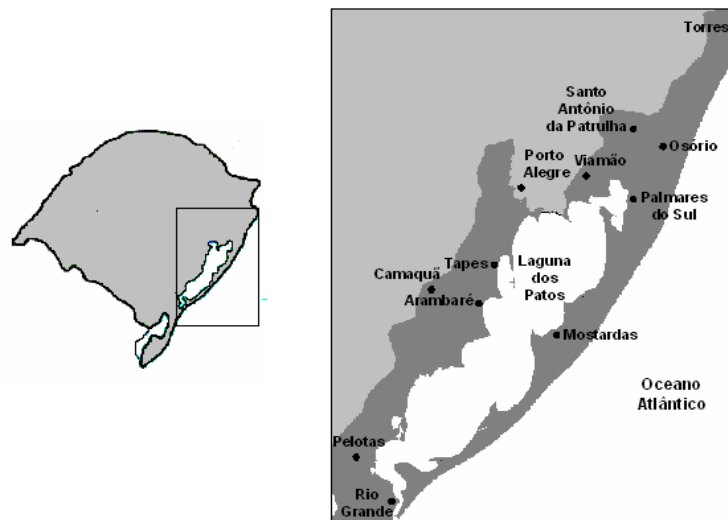


Figura 3.1. Localização da área de estudo no Estado do Rio Grande do Sul. Região escurecida representa a abrangência das amostragens de solo nas Planícies Costeiras Interna e Externa e no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

Todos os pontos de coleta foram georreferenciados com aparelhos GPS. A camada de solo amostrada foi de 0 – 20, cm utilizando-se um trado calador. Cada amostra foi composta de três sub-amostras. Foram determinados a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e os cátions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} ,

Mg^{2+} e $H^+ + Al^{3+}$. A partir da soma destes, obteve-se a percentagem de sódio trocável, pela equação: $PST = (Na^+ / CTC_{pH7}) \times 100$.

Com o objetivo de se observar o comportamento geral dos teores de Na^+ trocável, PST e CEes, foram determinados a média, o desvio padrão, os coeficientes de variação, de assimetria e de curtose, os valores mínimos e máximos e histogramas de frequência. Para verificar a dependência espacial das variáveis, interpolar dados e elaborar mapas, foi empregada a análise geoestatística, sendo que o método de interpolação utilizado foi o inverso do quadrado da distância entre os pontos amostrados no terreno, a partir do software *IDRISI 15.0 "The Andes Edition"*. Esta ferramenta também foi utilizada para plotagem dos pontos amostrados no mapa do Rio Grande do Sul (Figura 3.2), seccionado na região de interesse.

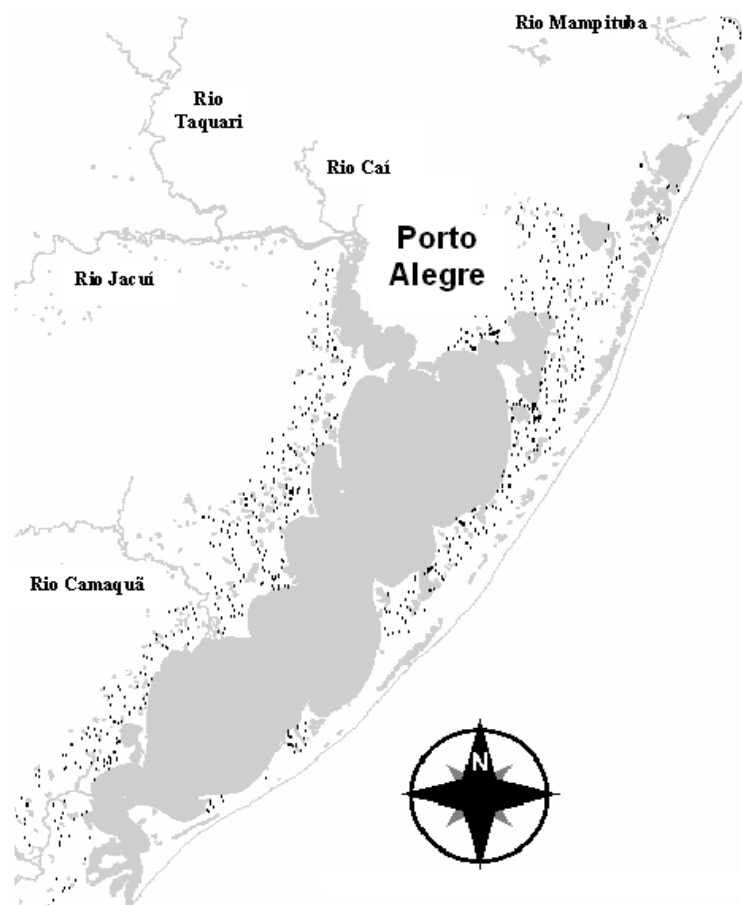


Figura 3.2. Distribuição espacial das amostragens nas planícies costeiras à Laguna dos Patos e Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Coletas realizadas em 2008 e 2009.

3.3. Resultados e Discussão

Numa primeira análise, os valores médios dos teores de Na^+ , PST e CEes do solo (Tabela 3.1) indicariam que, de modo geral, a salinidade do solo nas planícies costeiras do Estado não atinge patamares suficientes para causar danos à cultura do arroz ou à estrutura física dos solos (Richards, 1954). Entretanto, os valores de assimetria e curtose não seguem uma distribuição normal, pois são superiores a 0 e 3, respectivamente (Snedecor & Cochran, 1967), e sim uma distribuição lognormal (Figura 3.3). Isso é reflexo da discrepância entre os valores da média e mediana, que são muito distintos para os três atributos de solo avaliados, demonstrando distribuição assimétrica. A assimetria observada foi sempre positiva, indicando maior frequência de valores abaixo da média e poucos valores situados bem acima dela. Adotando-se os limites de coeficiente de variação (CV) propostos por Warrick & Nielsen (1980), para classificação de variáveis do solo, nota-se que todos os atributos de salinidade avaliados apresentaram CV alto, acima de 1 (Tabela 3.1), o que era esperado pela abrangência das amostragens, realizadas em uma faixa de, aproximadamente, 400 km. Os valores mínimos e máximos obtidos para cada atributo retratam muito bem os altos coeficientes de variação. Já com relação ao desvio padrão, quanto maior o seu valor, maior a dispersão e mais afastados da média estarão os eventos extremos. Isto é, o desvio padrão mede a dispersão dos valores individuais em torno da média. À semelhança dos demais, este parâmetro estatístico também foi muito elevado (Tabela 3.1).

A maior parte das amostras de solo, 47,3 %, apresentou teor de sódio de até 50 mg dm^{-3} (Figura 3.3a). Numa situação intermediária, as amostras com teores entre 51 e 100 mg dm^{-3} e 101 e 250 mg dm^{-3} representaram, somadas 43,1 % de um universo de 766 amostras de solo. Já os solos com teores acima de 250 mg dm^{-3} foram uma minoria. Com relação à percentagem de sódio trocável (PST) no solo, cerca de 400 amostras de solo apresentaram um nível de até 2,5 % (Figura 3.3b), considerado baixo. Os solos com PST entre 5,1 e 15 %, somados, representaram 19,6 %.

Tabela 3.1. Estatística descritiva das variáveis relacionadas à salinidade na camada arável de 766 amostras de solo das planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Entressafras de 2008 e 2009

Estatística descritiva	Na mg dm ⁻³	PST %	CE dS m ⁻¹
Média	128	4,18	2,30
Mediana	52,7	2,18	1,21
Desvio padrão	245	5,73	3,95
CV ⁽¹⁾	1,91	1,37	1,71
Curtose ⁽¹⁾	24,5	13,6	28,7
Assimetria ⁽¹⁾	4,64	3,32	5,04
Mínimo	1,71	0,07	0,27
Máximo	1978	44,2	33,9

⁽¹⁾ Parâmetros adimensionais.

Em solos arenosos com baixa umidade, associados à fertilização potássica na linha de semeadura, esse nível de salinidade pode prejudicar o estabelecimento do estande de plantas (Carmona et al., 2009; Cao et al., 2009). Já os solos com PST acima de 15 % totalizaram 5,1 % das amostras. Níveis de salinidade acima desse patamar são considerados críticos, pela alteração das propriedades físicas do solo (Ayers & Westcot, 1985), uma vez que o excesso de sódio em relação aos demais cátions causa dispersão da argila e, por consequência, prejudica a condutividade hidráulica do solo.

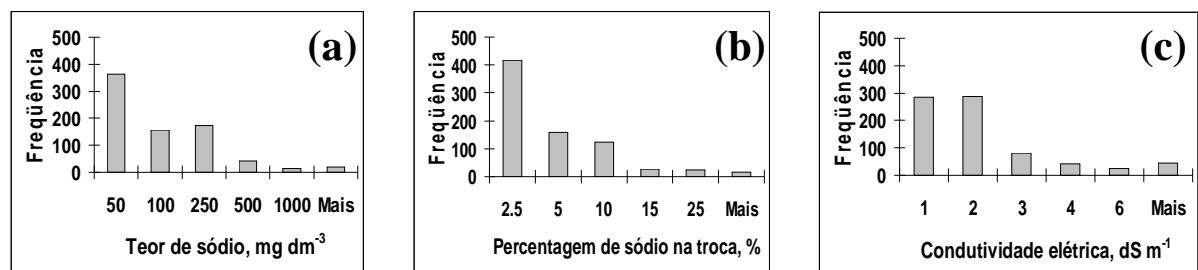


Figura 3.3. Histogramas de freqüência das diferentes classes de teor de sódio no solo (a), porcentagem de saturação por sódio na troca (b) e condutividade elétrica do extrato de saturação (c), em solos cultivados com arroz irrigado nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Entressafras de 2008 e 2009.

À semelhança do verificado com os teores de Na⁺ e PST do solo (Figura 3.3a,b), a CEes da maioria das amostras (75 % do total) localizou-se nos estratos inferiores do histograma de freqüência (Figura 3.3c), demonstrando que,

de modo geral, a salinidade do solo é um problema de abrangência moderada e localizada nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Apenas 14 % das amostras, aproximadamente, apresentaram CEes superior a 4 dS m^{-1} , um dos índices de referência na classificação de solos afetados por sais (Tabela 2.4.1). O nível crítico da CE da solução do solo para a cultura do arroz irrigado é de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Maas & Hofmann, 1977). Considerando-se esse patamar, 25% dos solos amostrados representariam limitação ao cultivo de arroz pelo excesso de sais. Isso ocorre pelo fato de que a água é absorvida pelas raízes das plantas por osmose, processo que envolve o movimento da água de um local com baixa concentração de sais, como o solo, para locais de alta concentração, no interior das células das raízes. Quando a concentração no solo é alta, o movimento da água do solo para as raízes é diminuído. Já, quando a concentração de sais é mais alta no solo em relação ao interior das raízes, o movimento é invertido podendo causar a dessecação das plantas e até a morte (Tester & Davenport, 2003). Há que se ressaltar, entretanto, que, embora o alagamento do solo cause uma elevação inicial da condutividade elétrica pela mobilização de íons (DeDatta, 1983), a utilização de água isenta de quantidades expressivas de sais no cultivo de arroz irrigado tende a facilitar a lixiviação de íons para camadas inacessíveis ao sistema radicular das plantas, especialmente Na^+ e K^+ (Carmona et al., 2010). Isso diminui a força iônica da solução do solo e, por consequência, reduz a condutividade elétrica. Por outro lado, a relação entre a CEes do solo oxidado, condição em que as amostragens foram realizadas, e a CEes do solo reduzido, pela inundação, é de difícil mensuração, pois a dinâmica desse atributo é variável conforme o tipo de solo, principalmente em função da textura e da CTC, que interferem na lixiviação de íons e percolação de água no perfil.

De uma maneira geral, os maiores índices de Na^+ , de PST e de CE no solo foram observados na Planície Costeira Externa do Rio Grande do Sul (Figuras 3.4 - 3.6). Nas proximidades da Lagoa do Casamento, entre os Municípios de Viamão, Palmares do Sul e Mostardas, a água utilizada para irrigação é praticamente isenta de sais de sódio, portanto, a causa da salinização desses solos não pode ser atribuída à utilização de água salina para a irrigação

das lavouras. Dessa forma, os sais presentes nos solos desse local podem ser devidos à sua gênese.

A atual posição geográfica das barreiras costeiras do Rio Grande do Sul é resultado da migração, no sentido do continente, de barreiras pré-existentes. A estratigrafia e datações de carbono 14 da barreira holocênica em Tramandaí demonstram que os depósitos sedimentares de fundo lagunar, sobrepostos por depósitos da fase transgressiva da barreira começaram a ser formados sob condições de intensa salinidade no interior da Laguna dos Patos, em razão da presença de uma barreira, situada a alguns quilômetros mar adentro, à sudeste da atual posição (Medeanic & Dillemburg, 2001). Essa barreira migrou no sentido do continente, sobrepondo-se aos depósitos lagunares, em resposta à migração do nível do mar (Travessas, 2003). Registros estratigráficos realizados por Dillemburg

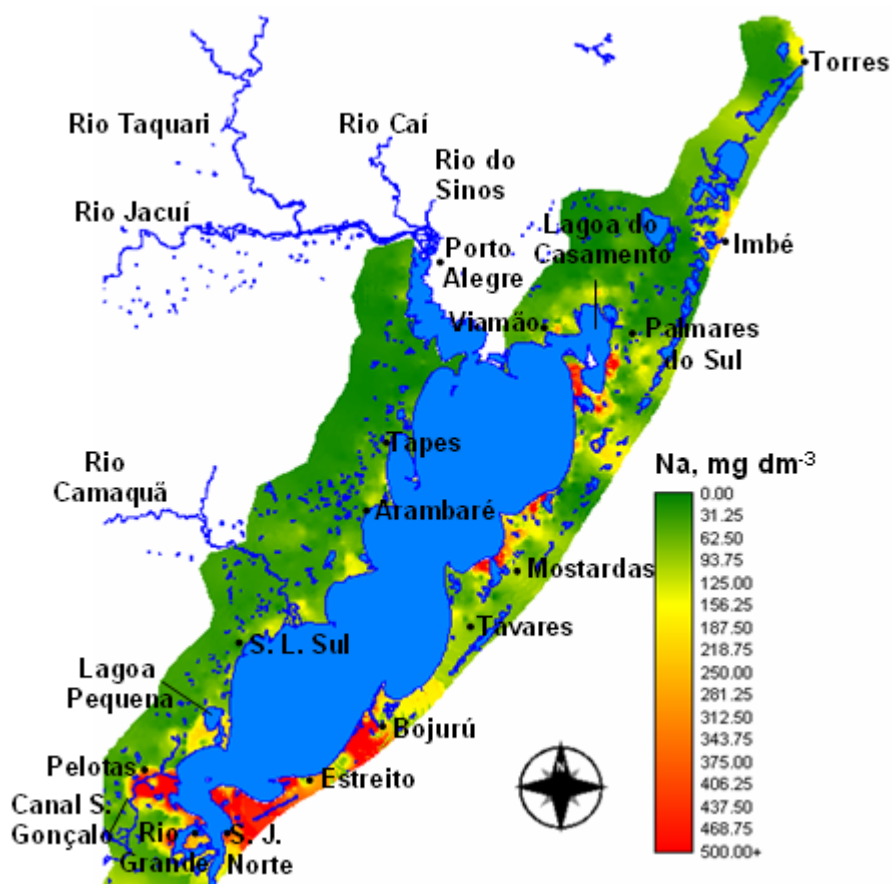


Figura 3.4. Ocorrência de solos afetados por diferentes teores de sódio trocável nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Entressafras de 2008 e 2009

et al. (2005) também demonstram que há a migração de uma barreira no sentido do continente. Esse deslocamento ainda está em curso, devido a um processo erosivo da linha de costa, decorrente de um balanço negativo de sedimentos (Dillemburg et al., 2000).

Esses sedimentos, que podem ser mais ou menos permeáveis, favorecem o fluxo de água subterrânea, proporcionando uma zona de reação onde a água doce da Laguna dos Patos e a água salgada do mar se misturam (Charette & Sholkovitz, 2006). A frente de água doce-salgada migra em resposta ao nível sazonal de água da Laguna dos Patos e ao gradiente hidráulico da água subterrânea (Niencheski et al., 2007).

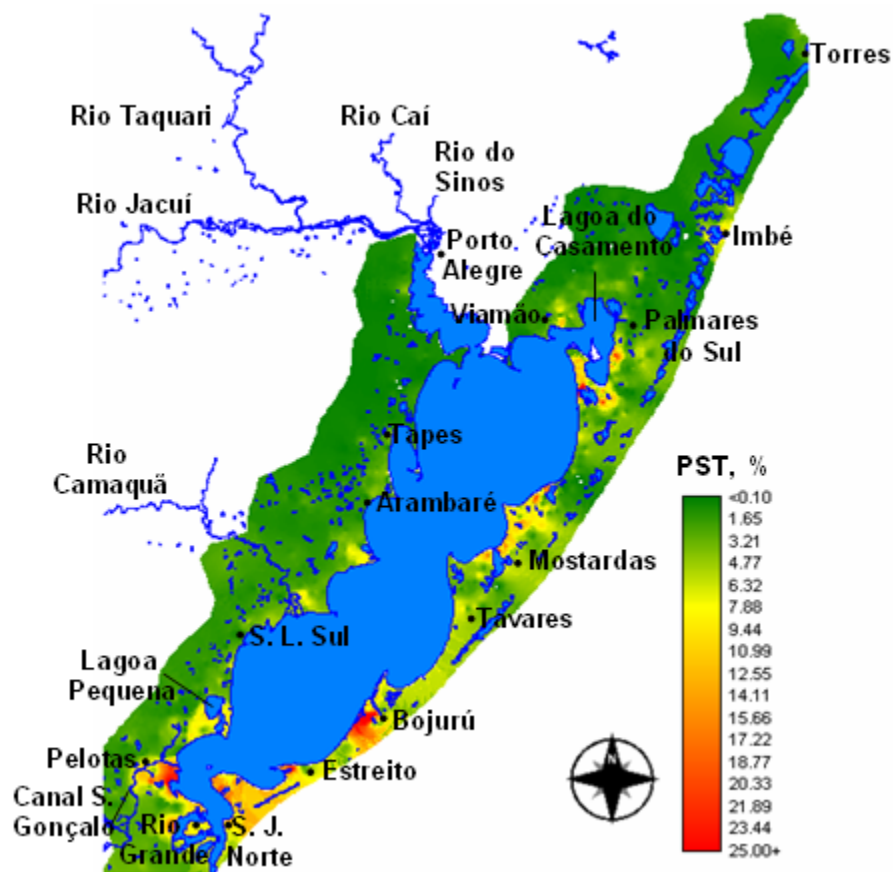


Figura 3.5. Ocorrência de solos afetados por diferentes níveis de saturação por sódio na troca, nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Entressafras de 2008 e 2009.

Essa ligação subterrânea se dá por estruturas denominadas paleocanais. Elementos arquiteturais da plataforma continental gaúcha indicam a existência de paleocanais desenvolvidos em consequência de eventos regressivos marinhos do Quaternário. Eventos transgressivos subsequentes fizeram com que esses canais fossem preenchidos (Abreu & Calliari, 2005). Toldo Jr et al. (2000) estudaram a ocorrência de paleocanais no subfundo da Laguna dos Patos e identificaram o canal fluvial pleistocênico do rio Camaquã, na margem oeste dessa laguna. O sistema de paleocanais mais jovem indica que seu preenchimento sedimentar ocorreu durante o último grande evento transgressivo (final do Pleistoceno) e de mar alto (Holoceno), quando os canais costeiros foram progressivamente preenchidos por sedimentos fluviais, estuarinos e marinhos (Weschenfelder et al., 2008).

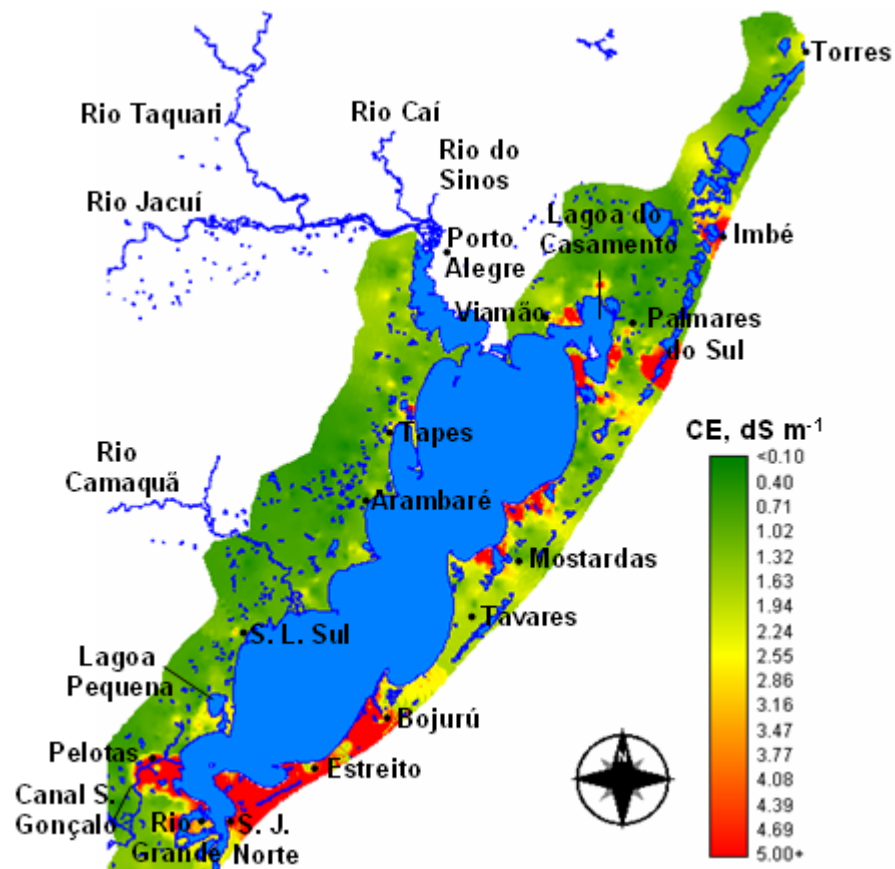


Figura 3.6. Ocorrência de solos afetados por diferentes níveis de condutividade elétrica do extrato saturado nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Coletas realizadas em 2008 e 2009.

Dentre os paleocanais mais jovens, está o da Barra Falsa (Bojuru), antigo canal de ligação entre a Laguna dos Patos e o mar (Toldo Jr et al., 1991). Martins et al. (1996) vincularam as paleodrenagens aos cursos dos principais rios (Jacuí, Sinos, Taquari e Camaquã), que atualmente drenam as terras altas ao norte e ao centro do Rio Grande do Sul. O prolongamento inferido do leito do rio Jacuí tende para estruturas registradas ao largo da cidade de Mostardas, situada na costa oceânica do sistema laguna barreira, assim como o prolongamento do rio Camaquã coincide com a atual Barra Falsa. De modo geral, os paleocanais são relativamente profundos (até 32 m), podendo ter até 3.700 m de extensão (Abreu & Calliari, 2005).

Na região central da PCE, próximo à cidade de Mostardas, foram encontrados altos índices de salinidade do solo. Naquela região, Weschenfelder et al. (2008) encontraram evidências da existência de paleocanais. Os altos níveis de salinidade encontrados na PCE (Figura 3.3) estão justamente sobrepostos aos paleocanais dos rios Jacuí e Camaquã, o que indica que a salinidade do solo na camada arável nesses locais deve estar relacionada ao fluxo subterrâneo de água salobra nos paleocanais, preenchidos com sedimentos permeáveis. Isto porque, em locais onde o lençol freático é mais próximo da superfície e dependendo da evapotranspiração, pode ocorrer a ascendência de sais até a camada arável do solo. Esta também pode ter sido a causa dos altos níveis de sódio observados nos solos mais ao sul da PCE, no município de São José do Norte e na localidade do Bojuru, embora, frequentemente, a água da Laguna dos Patos, nessas regiões, atinja níveis de condutividade elétrica impróprios para o cultivo de arroz irrigado, o que traz à luz a hipótese de que a salinização possa ser, também, devido à utilização de água com excesso de sódio nesses locais.

No Litoral Norte do Estado, a ocorrência de solos afetados por sais ocorreu em uma pequena faixa (Figuras 3.4 – 3.6), em lavouras próximas à foz do rio Tramandaí, o que não foi verificado nas proximidades do rio Mampituba, embora a salinização desse manancial seja um problema recorrente. Os solos utilizados para o cultivo de arroz em Torres, entretanto, diferem dos utilizados em Imbé, pelo maior conteúdo de argila, o que confere àqueles solos maior

capacidade de troca de cátions (CTC), e, portanto, maior poder de “tamponamento” dos íons Na^+ que adentram o sistema, em comparação aos solos arenosos de Imbé, de menor CTC.

Já na PCI, a ocorrência de solos com níveis potencialmente prejudiciais ao cultivo de arroz se restringiu à porção sul dessa região, em algumas áreas localizadas nos municípios de Pelotas e Rio Grande (Figuras 3.4 – 3.6). Nestes casos, a salinidade do solo pode ser proveniente exclusivamente do aporte de água salinizada da Laguna dos Patos. Pela maior proximidade do Oceano Atlântico, a porção meridional da Laguna dos Patos está mais sujeita à intrusão de água salina do mar adjacente, estando as áreas irrigadas do entorno sob o risco de deposição de sais de sódio. Pinto et al. (2004) já haviam reportado a predominância, naquela região, de Planossolos Háplicos solódicos, além de Planossolos Nátricos ao longo do Canal São Gonçalo. Apesar do relevo adequado para o cultivo de arroz, esses solos atualmente são utilizados apenas com pastagens, já que o excesso de sais de sódio inviabiliza a orizicultura.

3.4. Conclusões

A maior ocorrência de solos afetados pela salinidade se verifica na Planície Costeira Externa à Laguna dos Patos, devido, provavelmente, à ascendência de sais de sódio provenientes do sub-solo.

No Litoral Norte, a ocorrência se verifica apenas em Imbé, devido à irrigação com água salina do rio Tramandaí.

Na Planície Costeira Interna à Laguna dos Patos, o problema se restringe a alguns solos dos municípios de Rio Grande e Pelotas, provavelmente pela utilização de água salinizada da laguna.

4. CAPÍTULO III – VIABILIDADE DE USO DA ÁGUA COM DIFERENTES NÍVEIS DE SALINIDADE PARA O ARROZ IRRIGADO, EM SOLOS DAS PLANÍCIES COSTEIRAS DO RIO GRANDE DO SUL

4.1. Introdução

No Rio Grande do Sul, a salinidade do solo se restringe às planícies costeiras e está intimamente ligada à qualidade da água de irrigação e ao substrato sedimentar. Nessa região, a fonte mais utilizada pelos produtores de arroz irrigado por inundação, é a Laguna dos Patos, que, por ter ligação com o Oceano Atlântico, sofre a intrusão de sais. No verão, a salinização desse manancial ocorre com frequência nos meses de janeiro e fevereiro, devido à menor precipitação pluvial e maior demanda das lavouras de arroz do entorno, coincidindo com o período reprodutivo da cultura (Marcolin et al., 2005), justamente o mais sensível à salinidade (Ehrler, 1960). Em estudo realizado ao longo de 24 meses, Fraga et al. (2007) observaram grande amplitude de valores de condutividade elétrica (CE), em diversos pontos de captação de canais de irrigação localizados em ambas as margens da Laguna dos Patos, com mínimas abaixo de $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ e máximas acima de $6,0 \text{ dS m}^{-1}$, valor este muito acima do crítico estabelecido para a água de irrigação utilizada nas lavouras de arroz irrigado no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, de $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ (SOSBAI, 2005; 2010) e do nível crítico de salinidade na solução do solo sob influência das raízes, de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Ayers & Westcot, 1985).

A necessidade de água para o arroz irrigado por alagamento é variável, pois depende de vários fatores, como o ciclo da cultivar, condições de solo e de clima, além do manejo e da qualidade da água de irrigação. Do total de água

consumida pela planta, de modo geral, cerca de 30 % ocorrem durante a fase vegetativa, 55 % na fase reprodutiva e 15 % na fase de maturação (Fageria, 1980). As perdas de água por infiltrações laterais são de difícil estimação, mas somadas às perdas por percolação profunda, podem chegar a 20 mm dia^{-1} em condições desfavoráveis (DeDatta, 1983). O estabelecimento de uma lâmina de água permanente também influi na percolação de água, sendo maior quanto maior for a espessura da lâmina, pelo aumento do gradiente hidráulico. Os fatores que governam o movimento da água no solo são, principalmente, a estrutura, a textura, a densidade, a mineralogia e o conteúdo de matéria orgânica e de sais solúveis.

Um dos indicadores utilizados para estimar as perdas de água no perfil é a fração de lixiviação (FL), que varia de 0,6 para solos arenosos a 0,15 para solos de textura muito argilosa (Ayers & Westcot, 1985). Embora os solos das planícies costeiras sejam de origem sedimentar, os planossolos, predominantes nas áreas aptas ao cultivo de arroz nessas regiões, se caracterizam por apresentar uma camada sub-superficial impermeável, o que restringe sobremaneira a percolação de água no perfil, garantindo a manutenção de uma lâmina d'água para o cultivo de arroz irrigado.

Muitos produtores que utilizam a água da Laguna dos Patos para irrigação não possuem manancial hídrico alternativo, para o uso em caso de intrusão salina que eleve a CE da laguna a níveis acima do crítico estabelecido para a cultura do arroz. Apesar disso, alguns arroteiros utilizam a água com algum grau de salinidade por determinado intervalo de tempo, principalmente no período reprodutivo, sensível ao estresse hídrico, sob pena de terem perdas significativas na produtividade da cultura. Entretanto, o volume de água possível de ser adicionado depende de uma série de fatores, como o nível de salinidade da água que está sendo adicionada, da textura e do nível de salinidade pré-existente no solo, por exemplo. Além disso, em solos já afetados por sais, a utilização de água dessa laguna pode representar riscos à cultura e à estrutura física do solo, mesmo em níveis abaixo de $2,0 \text{ dS m}^{-1}$. A utilização de água com altos níveis de Na^+ altera a percentagem de saturação por sódio (PST) do solo, podendo prejudicar suas características físicas, pela dispersão da fração coloidal do solo, o que ocorre

quando a PST supera a 15 % (Richards, 1954). Este também é o índice crítico de salinidade do solo a partir do qual o rendimento de grãos de arroz é reduzido, especialmente quando a adubação potássica é realizada na linha de semeadura (Carmona et al., 2011).

Nesse sentido, o monitoramento da CE da água pode fornecer uma estimativa do volume de água possível de ser utilizada em solos com PST conhecida, até que se atinja um determinado nível pré-estabelecido, desde que se conheça a quantidade de Na^+ que está sendo aportada ao sistema. Segundo Asch et al. (2000), o principal sal nas águas de irrigação é o cloreto de sódio (NaCl), especialmente em mananciais hídricos conectados ao mar, como é o caso da Laguna dos Patos. Por esse motivo, o teor de Na^+ na água está intimamente relacionado à CE da água, que é de fácil monitoramento, pela praticidade de medição, o que permite ao produtor uma rápida tomada de decisão quanto à possibilidade de uso da água. Nesse contexto, a relação entre o teor de Na^+ e a CE da água de Laguna dos Patos pode servir como um indicador da possibilidade de uso de água, até que a PST do solo atinja um determinado patamar, como o limite crítico de 15 %, desde que se conheça a PST original do solo em que esta água está sendo aportada.

Este trabalho teve por objetivos estabelecer uma relação entre a condutividade elétrica e o teor de Na^+ da água da Laguna dos Patos e, a partir disto, verificar a viabilidade de uso da água de mananciais hídricos com diferentes níveis de salinidade nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul com potencial de uso para o cultivo de arroz irrigado.

4.2. Material e Métodos

Para avaliação de indicadores de salinidade da água da Laguna dos Patos, foram realizadas coletas de amostras em 13 diferentes pontos do manancial, nos municípios de Arambaré, São Lourenço do Sul, Pelotas, Rio Grande e Tavares (Figura 4.1), nos dias 21/05/2009 e 22/05/2009. As coletas foram realizadas utilizando-se uma garrafa do tipo PET de dois litros, com orifícios da extremidade superior até o meio da embalagem. A garrafa coletora foi acoplada

a um suporte com peso, para coletar a água de forma homogênea no perfil da lâmina, sendo coletado um litro de água por amostragem, na profundidade, a partir da superfície da lâmina de água, de 30 cm. Essa profundidade foi determinada a partir do conhecimento de que a Laguna dos Patos, por ser um corpo lagunar de grandes dimensões e de águas relativamente rasas, sofre um processo de permanente recirculação vertical. Nas regiões onde a coluna de água é mais profunda, o sistema se comporta como tendo duas camadas, sendo que na superior, o fluxo possui mesmo sentido do vento, ao contrário da camada de fundo (Castelão & Moller Jr, 2003), o que acarreta a mistura da água no perfil, tornando seus teores de sais homogêneos, apesar da maior densidade da água com maior teor de sais.

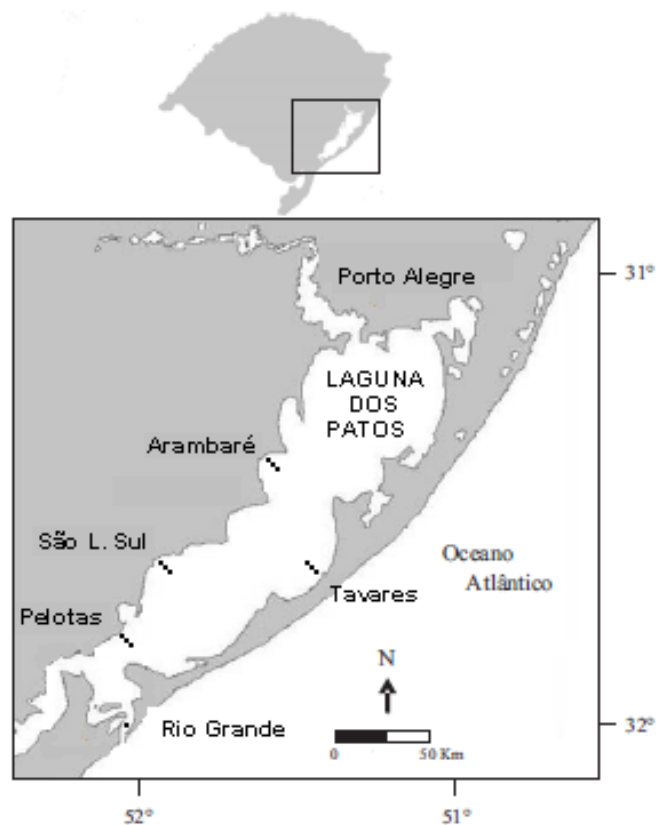


Figura 4.1. Localização dos pontos de amostragem de água, nas proximidades dos municípios de Arambaré, São Lourenço do Sul, Pelotas, Rio Grande e Tavares. Coletas realizadas em 2009.

Foram retiradas e georreferenciadas amostras a cada dois quilômetros de distância da margem, sendo percorridos seis quilômetros, exceção feita a Rio Grande, onde apenas uma coleta foi realizada, no canal de ligação entre a laguna

e o Oceano Atlântico. Imediatamente após as coletas, foi determinada a condutividade elétrica da água das amostras. As mesmas foram, então, acidificadas para posterior análise dos teores de Na^+ , conforme descrito em Tedesco et al. (1995). A partir das coletas de água realizadas em diferentes pontos da Laguna dos Patos, foi possível estabelecer uma relação de ajuste entre a condutividade elétrica “CEi” e o teor de sódio “ Na^+ ” da água de irrigação.

Para o cálculo da quantidade de sódio necessária (Na^+n) para saturar a fração trocável dos solos em 15% (Equação 4.1), foram utilizados os valores de PST original destes mesmos solos (PSTo), a partir das 766 amostras coletadas no entorno da Laguna dos Patos e Litoral Norte (Capítulo II). Baseando-se nesses dados, foi possível determinar a quantidade de:

$$\text{Na}^+n = \left[(\text{Na}^+o \times 15) / \text{PSTo} \right] - \text{Na}^+o \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde “ Na^+n ” representa a quantidade de Na trocável necessária para se elevar a PST do solo a 15%, e “ Na^+o ” é o teor original de sódio trocável deste solo.

Partindo-se da estimativa de “ Na^+n ”, é possível calcular o volume de água “ Va ” necessário para a elevação da PST do solo a 15% (Equação 4.2), em função da condutividade elétrica da água de irrigação, na camada arável de solo de 20 cm, considerando-se uma fração de lixiviação de 0,15:

$$Va \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)} = (2.000 \times \text{Na}^+n) / (\text{Na}^+i / 0,85) \quad \text{Equação 4.2}$$

Tendo como base o modelo criado, estimou-se o volume de água com CEi de 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 dS m^{-1} , possível de ser adicionado em solos das planícies costeiras do Rio Grande do Sul, para elevação da PST desses solos a 15%. Considerou-se, no presente estudo, que solos com PSTo igual ou superior a 15% não podem receber água de irrigação com CE a partir de 1,0 dS m^{-1} , sob pena de terem seus índices de salinidade aumentados. O cálculo de possibilidade de uso da água com diferentes níveis de salinidade, obtido com base em coletas realizadas na Laguna dos Patos, foi utilizado também para a faixa de solo mais ao norte da laguna, até Torres, na divisa do Rio Grande do Sul com Santa Catarina,

apesar da água para irrigação ser proveniente de outros mananciais. Isto porque, duas das mais importantes fontes de água para irrigação naquela região, os rios Tramandaí e Mampituba, também estão conectadas ao Oceano Atlântico e, por isso, sofrem a intrusão periódica de sais.

Com o objetivo de observar o comportamento geral dos dados de volume de água com diferentes níveis de salinidade possível de ser adicionado ao solo, foram determinados a média, o desvio padrão, os coeficientes de variação, de assimetria e de curtose, os valores mínimos e máximos e histogramas de frequência. Para verificar a dependência espacial das variáveis, interpolar dados e elaborar mapas, foi empregada a análise geoestatística, sendo que o método de interpolação utilizado foi o inverso do quadrado da distância entre os pontos amostrados no terreno, a partir do software *IDRISI 15.0 "The Andes Edition"*.

4.3. Resultados e Discussão

Os valores de CE da água foram bastante variáveis entre os diferentes locais e semelhantes dentro de cada local, independentemente da distância do ponto de coleta para a margem (Figura 4.2). Os menores valores de CE foram verificados justamente na região de coleta mais ao norte da Laguna dos Patos, em Arambaré, em comparação aos demais locais. A salinidade nesse local, que variou de 0,93 a 1,13 dS m⁻¹, não prejudica o arroz irrigado, estando esses valores abaixo do crítico estabelecido para a cultura, de 2,0 dS m⁻¹ (SOSBAI, 2005; 2010), desde que os teores de Na trocável no solo sejam baixos. Já em São Lourenço do Sul, a cerca de 100 km ao sul de Arambaré, mais próximo, portanto, do canal de Rio Grande (Figura 4.1), a salinidade da água variou de 5,59 a 6,09 dS m⁻¹; e em Pelotas, ainda mais ao sul, a CE máxima foi de 7,49 dS m⁻¹, valores estes muito acima do crítico para o arroz. Deve-se ressaltar, entretanto, que as amostragens foram realizadas em uma época do ano em que não se utiliza água para irrigação de lavouras de arroz (entressafra), além da Laguna dos Patos estar com seu nível abaixo do normal, devido ao volume de chuvas estar aquém da média nos meses que antecederam as coletas. As amostragens realizadas em Pelotas foram feitas na área da laguna denominada de estuário, ou seja, na porção influenciada pelo

mar, estando suas águas normalmente com altos teores de sais. Por esse motivo, os produtores de arroz da região utilizam, normalmente, fontes próprias de água de boa qualidade para irrigação, provenientes de barragens, ou do Arroio Pelotas. Dificilmente, portanto, utilizam água da Laguna dos Patos. Entretanto, devido à baixa vazão do Arroio Pelotas e à alta demanda por água das lavouras do entorno, o nível desse arroio tende a baixar frequentemente, ocasionando a entrada e mistura de água proveniente da Laguna dos Patos, o que representa risco principalmente aos orizicultores mais próximos à foz do arroio.

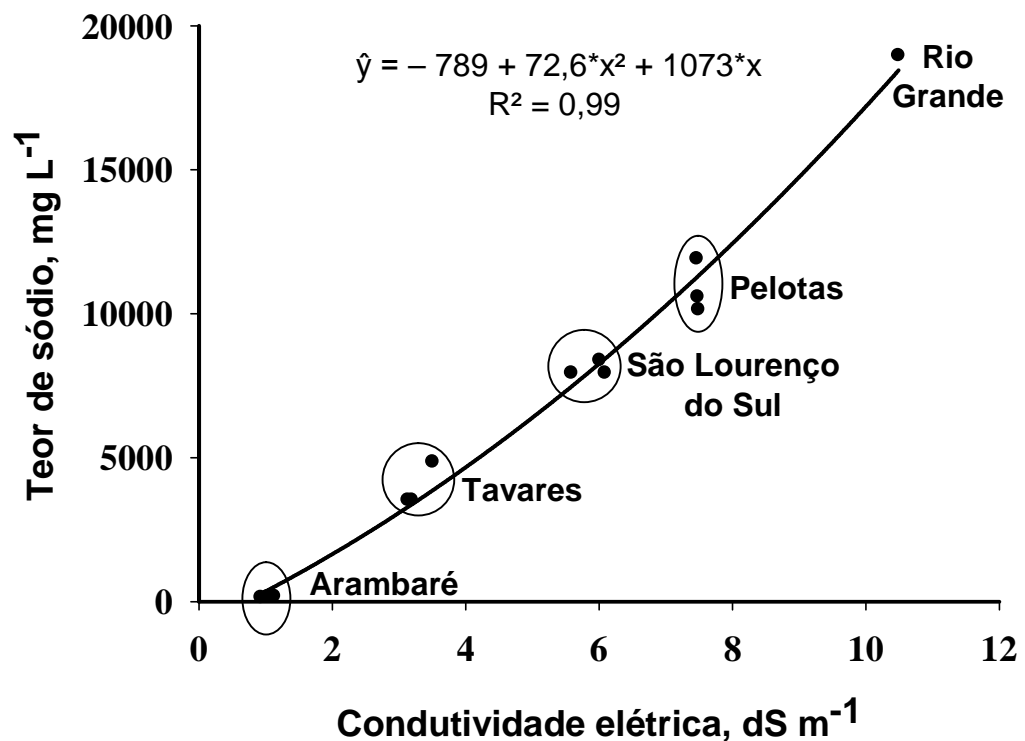


Figura 4.2. Teor de sódio, em função da condutividade elétrica da água da Laguna dos Patos. *: $p < 0,0001$. Coletas realizadas em 2009.

As CE obtidas em Pelotas foram inferiores apenas às verificadas em Rio Grande, de 10,5 dS m⁻¹ (Figura 4.2), o que era de se esperar, pela proximidade com o Oceano Atlântico (Figura 4.1). Já em Tavares, na parte leste da Laguna dos Patos, a salinidade variou, de 3,14 a 3,51 dS m⁻¹. Embora realizadas no lado oposto do manancial, as coletas em Tavares foram feitas em uma posição relativamente intermediária entre Arambaré e São Lourenço do Sul, tomando-se como ponto de referência o canal de Rio Grande (Figura 4.1). Os valores de

salinidade, da mesma forma, foram também intermediários em relação àqueles dois locais da porção oeste da laguna (Figura 4.2), o que evidencia, de certa forma, a influência da distância do local de amostragem em relação a Rio Grande.

A relação verificada entre os teores de “Na⁺i” x “CEi” na água da Laguna dos Patos foi altamente significativa ($p < 0,001$, Figura 4.2). A partir da equação de ajuste entre essas duas variáveis, foi possível determinar a possibilidade de uso da água na área de estudo (Tabela 4.1 e Figura 4.3), com base na Equação 4.2.

Com relação à estatística descritiva do volume de água com diferentes níveis de salinidade possível de ser utilizado (Tabela 4.1), os valores de tendência central e o desvio padrão decresceram com o aumento do teor de sais na água, sendo que, na CE de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, o volume de água possível de ser utilizado é, em média, cerca de 9 vezes menor em relação à CE de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Tabela 4.1). Os coeficientes de assimetria e de curtose não seguiam uma distribuição normal, pois foram superiores a 0 e 3, respectivamente (Snedecor & Cochran, 1967). Isso é reflexo da discrepância entre os valores da média e mediana, que são muito distintos entre cada nível de salinidade, demonstrando distribuição assimétrica, a qual foi sempre positiva, indicando maior frequência de valores abaixo da média e poucos valores situados bem acima desta. Adotando-se os limites de coeficiente de variação (CV) propostos por Warrick & Nielsen (1980), nota-se que todos os atributos de salinidade avaliados apresentaram CV alto, ou seja, acima de 60% (Tabela 4.1), o que era esperado pela heterogeneidade da área de estudo, compreendida em uma ampla faixa do litoral do Rio Grande do Sul. Os valores mínimos e máximos obtidos para cada nível de salinidade da água retratam os altos coeficientes de variação. Deve-se ressaltar que, independentemente do nível de CE, o volume mínimo a se aplicar foi sempre zero. Isto porque, como relatado no item Material e Métodos, muitos dos solos já tinham PST superior a 15%, o que inviabilizaria o uso de água a partir do nível crítico de salinidade adotado no presente estudo. Já com relação ao desvio padrão, quanto maior o seu valor, maior a dispersão e mais afastados da média estarão os eventos extremos. Isto é, o desvio padrão mede a dispersão dos valores individuais em torno da média. À semelhança dos demais, este parâmetro estatístico também foi elevado (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Estatística descritiva referente ao volume de água de irrigação possível de ser adicionado ao solo, em função de diferentes níveis de salinidade da água, em solos das planícies costeiras do Rio Grande do Sul. Coletas realizadas em 2009

Estatística descritiva	Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)			
	1,0	1,5	2,0	3,0
	.....m ³ ha ⁻¹			
Média	2.038	739	441	236
Mediana	1.843	668	399	213
Desvio padrão	1.334	484	289	154
CV ⁽¹⁾	0,65	0,65	0,65	0,65
Curtose ⁽¹⁾	7,59	7,58	7,58	7,59
Assimetria ⁽¹⁾	2,00	2,00	2,00	2,00
Mínimo	0	0	0	0
Máximo	11.542	4.183	2.498	1.335

⁽¹⁾ Parâmetros adimensionais.

O volume de água necessário para suprir as demandas das lavouras de arroz irrigado no Rio Grande do Sul é contrastante entre diversos pesquisadores. Para Medeiros et al. (2008), o arroz irrigado por inundação requer uma quantidade de água que varia de 1,0 a 4,0 L s⁻¹ ha⁻¹, sendo que, no Rio Grande do Sul, o consumo varia de 11.500 m³ ha⁻¹ ciclo⁻¹ a 17.000 m³ ha⁻¹ ciclo⁻¹ para as cultivares precoces e tardias, respectivamente, o que corresponde à vazão de 2,0 a 3,5 L s⁻¹ ha⁻¹. Já para Machado et al (2006), em experimento realizado por dois anos em um Planossolo Háplico eutrófico arênico, com características semelhantes à maioria dos solos abrangidos pelo presente estudo, a necessidade de água variou de 5.374 m³ ha⁻¹ a 6.422 m³ ha⁻¹ por ciclo, não diferindo entre os sistemas de manejo pré germinado, mix de pré-germinado e transplante de mudas. Marcolin & Macedo (2001), em experimento realizado durante cinco safras consecutivas, em que foram comparados os sistemas de cultivo convencional, plantio direto e pré-germinado com irrigação por inundação permanente, concluíram que os volumes de água usados foram de, aproximadamente, 8.000 m³ ha⁻¹ por ciclo, e não diferiram entre os sistemas adotados.

As recomendações de época de semeadura para o arroz irrigado no Rio Grande do Sul (SOSBAI, 2010) preconizam a semeadura entre a segunda quinzena de setembro e o primeiro decêndio de novembro para os cultivares de

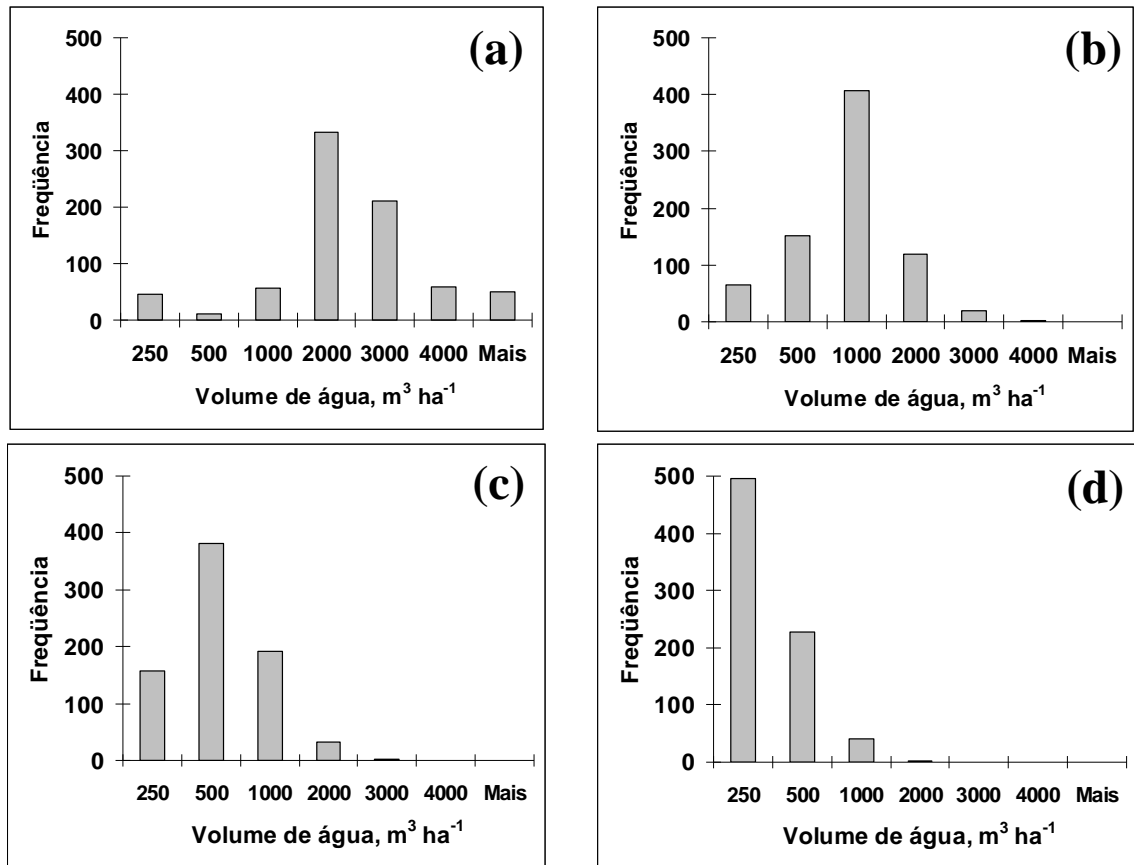


Figura 4.3. Histogramas de frequência das diferentes classes de volume de água possível de ser adicionada aos solos das planícies costeiras do Rio Grande do Sul, em função da condutividade elétrica da água de irrigação de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ (a), $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ (b), $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ (c) e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (d). Coletas realizadas em 2009.

ciclo precoce, que representam a maior parte dos materiais utilizados pelos orizicultores gaúchos (Oliveira, 2006). Nessa época do ano, os volumes de chuva garantem umidade do solo suficiente para a rápida emergência da cultura, principalmente no mês de outubro, além de diminuir a demanda por água no início da irrigação das lavouras, o que ocorre a partir do estágio V3 (Counce et al., 2000), diminuindo o volume total necessário para suprir a demanda total da cultura, pelo melhor aproveitamento da água da chuva, que pode chegar a quase 50% do total necessário (Marcolin et al., 2009). Além disso, a supressão da irrigação cerca de 10 a 20 dias antes do início da colheita é outra medida de economia de água, diminuindo o período de aporte de água para, aproximadamente, 80 dias. Essas medidas, somadas ao correto nivelamento do

solo, o que possibilita a manutenção de uma lâmina uniforme de água de cerca de cinco cm de profundidade, garantem maior racionalização no uso de água. Portanto, para fins de comparação com os dados obtidos no presente estudo, será adotado o consumo de $8.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ por ciclo, estabelecido por Mota et al. (1990) e Marcolin & Macedo (2001).

Os histogramas de distribuição de frequência das diferentes classes de volume de água com níveis crescentes de salinidade possível de ser utilizada nos solos das planícies costeiras do Rio Grande do Sul (Figura 4.3) demonstram que, considerando-se uma CEi de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 4.3a), na maior parte dos solos dessa região (43,5 %), pode-se utilizar um volume de água entre 1001 e $2000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, até que o solo atinja a PST de 15 %. Considerando-se a contribuição média das precipitações pluviais registradas em diversos municípios das planícies costeiras do Estado (IPAGRO, 1989), este valor representa, no máximo, 50 % da demanda da cultura. Já para uma CE da água de irrigação de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 4.3b), a maior parte dos solos (53,1 %) pode receber o aporte de água na faixa entre 501 e $1000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, o que representa entre 6,75 a 12,5 % da demanda total da cultura e entre 12,5 e 25 % do que é aportado ao arroz, considerando-se a contribuição das chuvas.

Já o uso de água com CE de $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 4.3c) passa a ser mais restritivo, sendo que nenhum dos solos das planícies costeiras pode receber volume superior a $3000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de água nesse patamar de salinidade, considerado crítico para a cultura do arroz irrigado no Sul do Brasil (SOSBAI, 2005, 2010), sendo que o volume passível de uso entre 251 e $500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ predomina na maioria dos locais. Em uma situação mais agravada de salinidade da água, considerando uma CE de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 4.3d), nenhum local pode receber volume superior a $2.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e apenas 5,2 % das áreas pode receber a metade desse valor, que equivale a 25 % da necessidade de água do arroz.

O baixo conteúdo de argila da maior parte dos solos da região compreendida pelo estudo traz, como consequência, menor capacidade de troca de cátions, ocasionando menor retenção de íons Na^+ , em comparação a solos argilosos. Dessa forma, a saturação das cargas negativas das partículas coloidais demanda menor volume de água salinizada. Nas planícies costeiras do Rio

Grande do Sul, os solos são formados por depósitos de sedimentos costeiros arenosos relacionados aos quatro últimos grandes eventos transgressivos – regressivos do período Quaternário (Villwock & Tomazelli, 1995). Carmona et al. (2010), por exemplo, verificaram pequena variação textural entre camadas de 0 – 5 cm, 5 – 10 cm, 10 – 20 cm e 20 – 40 cm, em quatro solos da Planície Costeira Externa do Rio Grande do Sul. A diferença na fração argila entre todos os locais e profundidades foi de apenas 40 g kg^{-1} , sendo que o conteúdo máximo de argila foi de 160 g kg^{-1} .

De uma maneira geral, os maiores índices de PST do solo foram observados na Planície Costeira Externa à Laguna dos Patos, e na parte sul da Planície Costeira Interna (Figura 3.5), o que se refletiu em menor possibilidade de uso de água até a saturação da PST do solo a 15 % nesses locais (Figura 4.4). A utilização de água com CE de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 4.4a) é restrita a pequenas faixas de solo, como é o caso das cercanias dos municípios de Rio Grande e de Pelotas, onde a maior salinidade do solo pode ser proveniente do aporte de água salinizada da Laguna dos Patos, pela maior proximidade do Oceano Atlântico. Portanto, a porção meridional da Laguna dos Patos está mais sujeita à intrusão de água salina do mar adjacente, estando as áreas irrigadas do entorno sob o risco de deposição de sais de sódio, o que restringe sobremaneira a irrigação, mesmo que a água utilizada tenha CE de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 4.4).

Por outro lado, nas proximidades da Lagoa do Casamento, dos municípios de Viamão, de Palmares do Sul e de Mostardas e da localidade de Bojuru, a causa da menor possibilidade de uso de água, mesmo com baixa CE (Figura 4.4a,b), está mais relacionada à gênese daqueles solos, altamente permeáveis e com elevada salinidade pré-existente (Figura 3.5), favorecida pelo fluxo de água salobra em subsuperfície, especialmente nas regiões onde foram identificados paleocanais.

Já em relação aos solos do Litoral Norte e considerando-se a CE da água de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$, praticamente todos os solos podem receber volumes próximos a $4.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 4.4a), já que a ocorrência de solos afetados por sais ocorreu em uma pequena faixa, em lavouras próximas à foz do rio

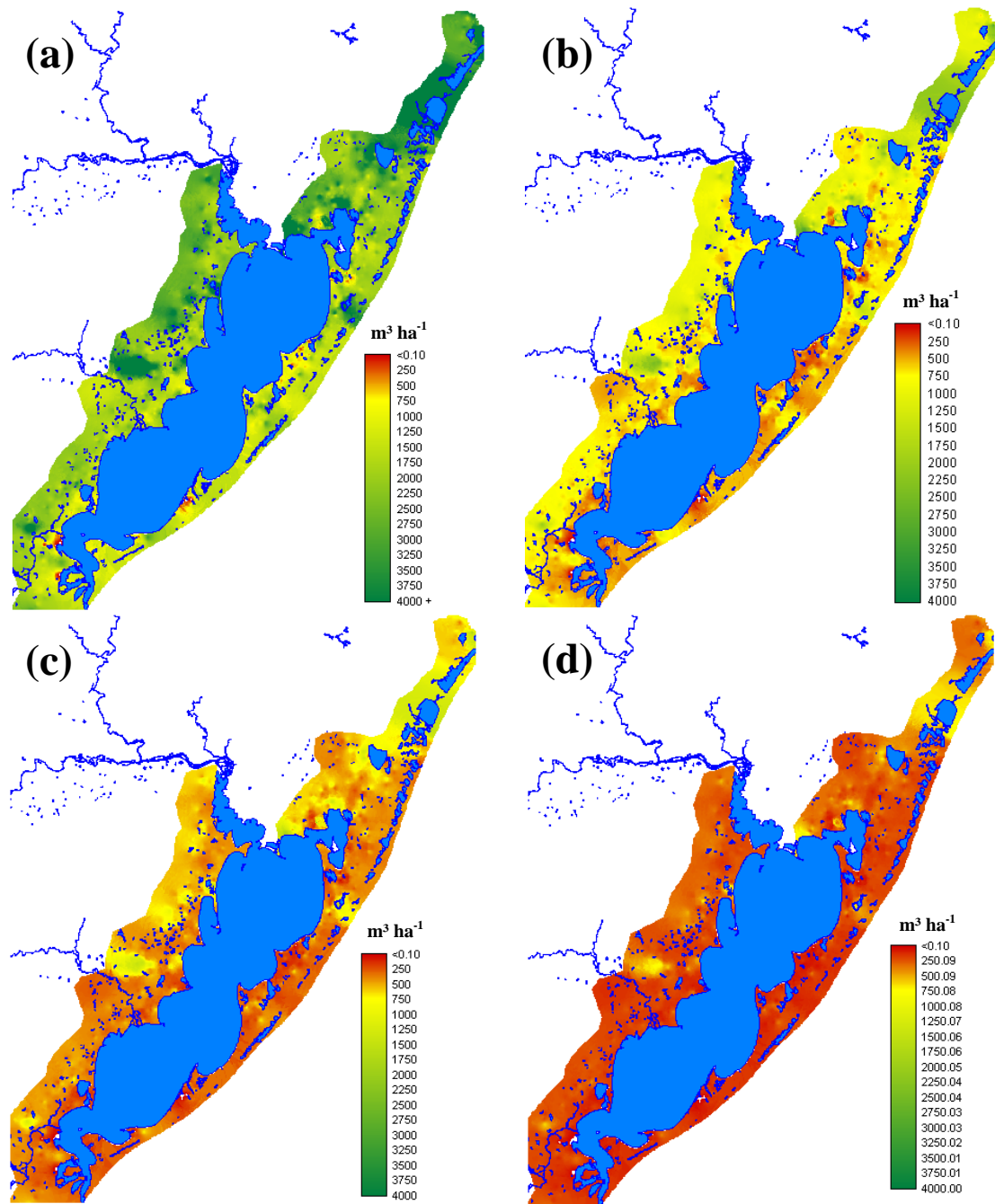


Figura 4.4. Volume de água de irrigação com CE de 1,0 dS m^{-1} (a), 1,5 dS m^{-1} (b), 2,0 dS m^{-1} (c) e 3,0 dS m^{-1} (d) possível de ser utilizada nas Planícies Costeiras do Rio Grande do Sul, até que a PST do solo atinja 15 %.

Tramandaí, o que não foi verificado nas proximidades do rio Mampituba (Figura 3.5), embora a salinização desse manancial seja um problema recorrente. Isto ocorre porque, de modo geral, os solos utilizados para o cultivo de arroz em Torres, diferem dos utilizados em Imbé, pelo maior conteúdo de argila, o que

confere àqueles solos maior capacidade de troca de cátions (CTC), e, portanto, maior poder de “tamponamento” dos íons Na^+ adicionados ao sistema, em comparação aos solos arenosos de Imbé, de menor CTC. Isto se reflete também em situações onde a CE da água é igual ou superior a $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 4.4c,d).

Em situações onde a CE da água é de $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ a $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 4.4c,d), a viabilidade de uso de água na grande maioria dos solos das planícies costeiras é altamente restrita. Nestes casos, o volume de água necessário para atingir a PST crítica é baixo, evidenciando a necessidade de utilização de um manancial hídrico alternativo, com água de boa qualidade, já que o volume passível de uso é, na maioria dos casos, inferior a $500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

4.4. Conclusões

A condutividade elétrica e o conteúdo de Na trocável da água de irrigação proveniente da Laguna dos Patos são muito variáveis e estão altamente relacionados, e aumentam com a proximidade do Canal de Rio Grande.

A maior parte dos solos cultivados com arroz irrigado nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul pode receber o volume de água suficiente para suprir as demandas da cultura, desde que a condutividade elétrica da água não ultrapasse a $1,0 \text{ dS m}^{-1}$.

A água de irrigação com condutividade elétrica de até $1,5 \text{ dS m}^{-1}$, embora abaixo do teor crítico estabelecido para o arroz, não pode ser utilizada como única fonte de água para a cultura na maioria dos solos das planícies costeiras gaúchas, já que causa aumento da PST dos solos a patamar superior a 15 %.

A menor possibilidade de uso da água de irrigação, independentemente do nível de salinidade, se dá nos solos da Planície Costeira Externa à Laguna dos Patos e da porção meridional da Planície Costeira Interna à Laguna dos Patos, onde a salinidade pré-existente no solo é maior.

5. CAPÍTULO IV - ATRIBUTOS DE ARROZ IRRIGADO AFETADOS PELA SALINIDADE DO SOLO E PELO MANEJO DO FERTILIZANTE POTÁSSICO ⁽³⁾

5.1 Introdução

A região das planícies costeiras do Rio Grande do Sul apresenta vastas áreas aptas ao cultivo de arroz irrigado por alagamento, devido, principalmente, à grande disponibilidade de recursos hídricos e ao relevo favorável. Entretanto, a salinidade, tanto do solo, quanto da água, pode se constituir em fator limitante ao cultivo nas regiões do Estado que tem como principal fonte de irrigação a Laguna dos Patos. Por estar ligado ao Oceano Atlântico em sua extremidade Sul, este manancial está sujeito à intrusão de água do mar, com reflexos negativos sobre o teor de sais e, principalmente, de sódio na água da laguna. Os solos adjacentes cultivados com arroz irrigado ficam, portanto, sujeitos à deposição de sais de sódio, em maior proporção, o que pode prejudicar o estabelecimento e o desenvolvimento das lavouras em cultivos subsequentes. Além dos aportes de sódio pela água de irrigação, a salinização das terras cultiváveis nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul pode ocorrer devido à gênese dos solos, formados pela deposição de sedimentos arenosos de origem marinha e flúvio-lacustre (Villwock & Tomazelli, 1995).

O arroz irrigado é considerado moderadamente sensível à salinidade, sendo que o nível crítico, expresso pela condutividade elétrica do extrato de saturação, pode variar de 1,9 dS m⁻¹ (Grattan et al., 2002) a 3,0 dS m⁻¹ (Maas & Hoffman, 1977; Ayers & Westcot, 1999), de acordo com a variedade e a textura do solo. Quanto à salinidade, Fairhurst et al. (2007) estabeleceram o nível crítico de

⁽³⁾ Trabalho submetido à Revista Brasileira de Ciência do Solo em 31 de março de 2010.

acordo com a percentagem de sódio trocável no solo (PST), sendo que solos com PST a partir de 20 % são considerados prejudiciais à cultura. Segundo Pearson & Bernstein (1959), os períodos de plântula e reprodutivo do arroz são críticos à salinidade, o que resulta, respectivamente, em perdas no estande (Oster et al., 1984; Shannon et al., 1998) e em esterilidade de espiguetas (Ehler, 1960; Fraga et al., 2010), atributo esse negativamente correlacionado ao rendimento de grãos (Grattan et al., 2002).

O decréscimo do componente osmótico do solo, gerado pelo excesso de sais na solução do solo, faz com que as plantas tenham a sua capacidade de absorção de água restringida, o que diminui a transpiração, pelo fechamento de estômatos e, conseqüentemente, a assimilação da radiação fotossinteticamente ativa, gerando menor produção de biomassa, com conseqüente diminuição do perfilhamento (Ehler, 1960) e estatura de plantas (Singh et al, 2007). A coloração verde-azulada e o maior espessamento e cerosidade das folhas também são sintomas típicos do prolongado estresse hídrico, gerado pelo excesso de sais (Ayers & Westcot, 1999).

A maior parte dos estudos referentes aos efeitos da salinidade sobre a cultura do arroz, no Rio Grande do Sul, tem sido realizada em ambiente confinado de vasos ou tanques (Machado et al., 1991; Marcolin & Macedo, 2001; Schoenfeld et al., 2007; Fraga et al., 2010), onde se verifica a resposta de diferentes atributos de planta, como a biomassa e a produtividade de grãos de genótipos submetidos a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. Nesses estudos, contudo, ocorre acúmulo de sódio no ambiente radicular, uma vez que se adiciona continuamente água com teores elevados desse íon, sem que seja permitida a lixiviação de sais e a percolação profunda de água, situação real de campo, especialmente em solos arenosos. Isto dificulta a interpretação dos resultados, já que a salinidade no ambiente radicular aumenta constantemente, embora o teor de sódio na água adicionada seja o mesmo, diferentemente do que ocorre no campo, onde a adição de água de boa qualidade tende a diminuir a salinidade. Além disso, nesses trabalhos se utilizam como substrato, em geral, solos isentos de quantidades significativas de sódio, o que não permite o dimensionamento do dano inicial ocasionado pela salinidade pré-existente no solo, como ocorre em

diversas regiões das planícies costeiras do Rio Grande do sul (Carmona et al., 2009a).

Nesse Estado, a semeadura do arroz é feita em solo seco e em linha em cerca de 90% das áreas (Oliveira, 2006), com o alagamento ocorrendo quando as plantas iniciam o perfilhamento (estádio V4, Counce et al., 2000). O curto período prévio à irrigação, entre a emergência e o estágio V4, pode prejudicar o cultivo, em caso de altos teores de sais na zona radicular, especialmente em solos arenosos, com baixa capacidade de retenção de água. Nessas circunstâncias, a salinidade do solo pode causar falhas no processo germinativo, inibição de emissão de perfilhos e morte de plântulas.

A aplicação de altas doses de cloreto de potássio (KCl), na linha de semeadura, pode agravar o dano causado pela salinidade, devido à higroscopicidade do fertilizante. Nesse sentido, a aplicação de KCl a lanço pode mitigar o dano causado, tanto pelo solo, quanto pelo fertilizante em contato direto com as sementes, favorecendo, dessa forma, um melhor estande, além de maior acúmulo inicial de biomassa. Dependendo do nível de salinidade do solo, o maior crescimento inicial proporcionado pela adubação a lanço pode se refletir em melhorias nas fases subsequentes, inclusive no rendimento de grãos.

O trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da salinidade do solo e do manejo da adubação potássica sobre atributos de arroz irrigado, cultivado na Planície Costeira Externa a Lagoa dos Patos.

5.2. Material e Métodos

O trabalho foi realizado a campo na Fazenda Cavalhada, localizada no Município de Mostardas, na Planície Costeira Externa à Laguna dos Patos, RS (Figura 5.1). A área é constituída majoritariamente por Planossolos Háplicos distróficos, sendo o principal manancial hídrico a água proveniente da Lagoa do Casamento, ligada à extremidade norte da Laguna dos Patos. A propriedade se caracteriza por apresentar manchas de salinidade esparsas, com grau de dano variável à cultura. Para a implantação do experimento, foram selecionadas áreas

com histórico de danos diferenciados pela salinidade na emergência e no desenvolvimento do arroz.

Foram selecionados quatro locais (Figura 5.1) com solos de diferentes níveis de salinidade (Richards, 1954) na camada de 0 – 20 cm (Tabela 5.1), expressos pela percentagem de sódio trocável (PST), segundo a Equação 5.1. Os locais foram selecionadas a partir da coleta de 10 sub-amostras de solo, que compuseram uma amostra por local.

$$PST (\%) = \left[\left(Na^+ / CTC_{pH7} \right) \right] \times 100 \quad \text{Equação 5.1}$$

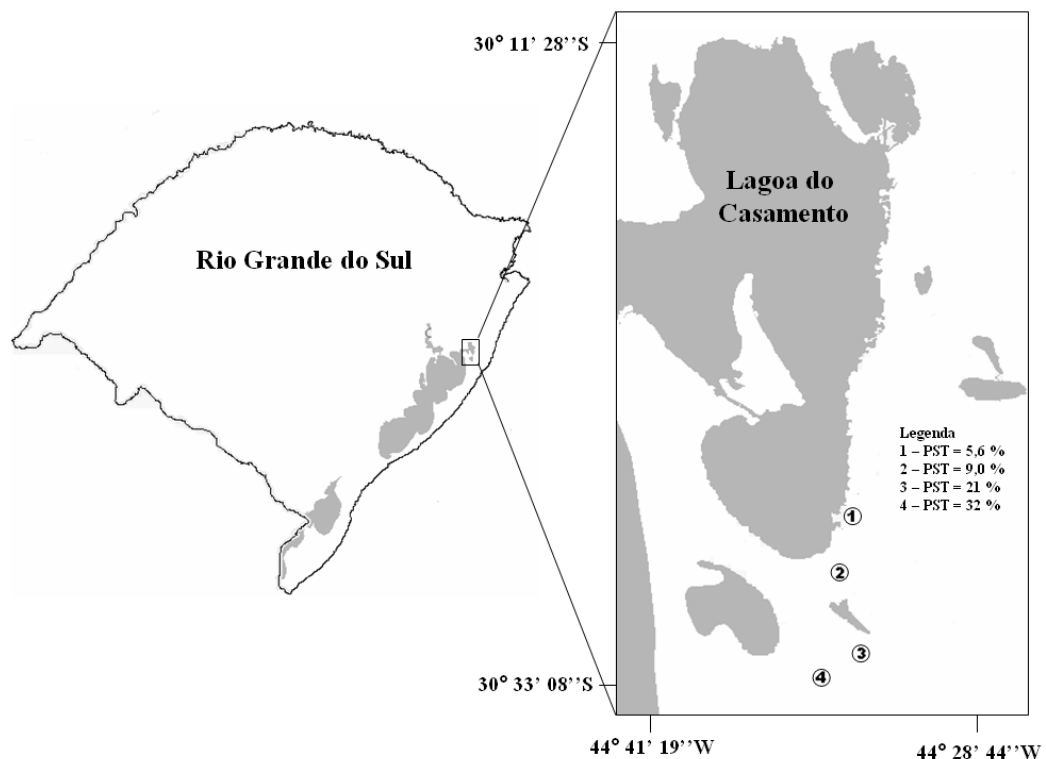


Figura 5.1. Localização dos solos com diferentes níveis de salinidade na Fazenda Cavalhada, em Mostardas, Planície Costeira Externa do Rio Grande do Sul.

Os níveis de saturação de sódio foram: 5,6 %, no local denominado Casamento (30° 27' 08" S; 44° 33' 43" W); 9,0 %, na Cavalhada (30° 29' 45" S; 44° 34' 32" W); 21 %, no Banhado (30° 32' 09" S; 44° 33' 38" W); e 32 %, no Sinval (30° 32' 33" S; 44° 34' 35" W). Foram utilizadas as variedades IRGA 417 em

três locais: Cavalhada, Banhado e Sinval, e a IRGA 422 CL no Casamento, devido à alta infestação por arroz vermelho. Esta variedade tem como parental imediato a cultivar IRGA 417 (Lopes et al., 2003) e, por ser resultado de cinco retrocruzamentos, apresenta 97% das características da IRGA 417. As diferentes denominações dadas aos locais de execução do experimento referem-se aos talhões de lavoura que foram utilizados no presente trabalho.

As parcelas experimentais tiveram a dimensão de 12 m² (4 x 3 m), sendo que as bordaduras tiveram 0,2 m. Desse modo, a área útil foi de 9,36 m² (3,6 x 2,6 m). A área total em cada um dos quatro locais foi de 203,5 m². A semeadura foi realizada em linha, em diferentes datas, em função da dinâmica de semeadura adotada na propriedade: Cavalhada, em 1º de novembro de 2008; Banhado e Sinval, em 8 de novembro de 2008, e Casamento, em 17 de novembro de 2008. A densidade de semeadura utilizada foi de 120 kg ha⁻¹, com espaçamento de 0,2 m entre linhas.

Os atributos dos solos utilizados constam na Tabela 5.1. Os tratamentos referentes ao manejo da adubação potássica, na forma de KCl, consistiram da aplicação de: 1) 90 kg ha⁻¹ de K₂O a lanço; 2) 90 kg ha⁻¹ de K₂O na linha de semeadura e 3) 45 kg ha⁻¹ de K₂O na linha de semeadura + 45 kg ha⁻¹ de K₂O previamente à diferenciação do primórdio floral (DPF – Counce et al., 2000).

Nas parcelas experimentais, foi aplicado também, o equivalente a 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de superfosfato triplo (SFT) granulado, a lanço, logo após a semeadura. Quando as plantas atingiram o estágio V4, foi realizada a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia e, imediatamente após, foi iniciado o alagamento das parcelas experimentais. Na diferenciação do primórdio floral (DPF), foi realizada a segunda aplicação de N, de 30 kg ha⁻¹ totalizando 150 kg ha⁻¹ de N. Em cada nível de salinidade do solo, havia uma testemunha sem adição de cloreto de potássio, mas com 150 kg ha⁻¹ de N, fracionados em V4 (120 kg ha⁻¹) e na DPF (30 kg ha⁻¹). Cada experimento (local) foi realizado com três repetições por tratamento, delineado em blocos casualizados. O controle de plantas daninhas foi feito com herbicidas específicos (penoxulam + clomazone nas áreas cultivadas com IRGA 417 e imazetapir + imazapic, na área cultivada com IRGA 422 CL) aplicados no estágio de desenvolvimento V3 - V4 (Counce et al., 2000),

previamente à entrada de água. A condutividade elétrica da água de irrigação variou de 0,25 a 0,33 dS m⁻¹.

Tabela 5.1. Atributos químicos e teor de argila na camada de 0 – 20 cm dos solos, nos diferentes locais. Mostardas, RS, safra 2008/2009

Local	pH ⁽¹⁾	Argila ⁽²⁾	MOS ⁽³⁾	P ⁽⁴⁾	K ⁽⁵⁾	Na ⁽⁵⁾	Ca ⁽⁵⁾	Mg ⁽⁵⁾	CTC _{pH7,0}	CE ⁽⁶⁾	PST ⁽⁷⁾
	1:1	.....g kg ⁻¹.....	.....	.....mg dm ⁻³.....	.....	.....	.....cmolc dm ⁻³.....	.....	.....	dS m ⁻¹	%
Casamento	4,4	140	18,9	32	42	106	2,33	1,45	8,4	1,96	5,6
Cavahada	4,6	150	13,7	38	62	151	1,87	1,96	7,2	1,77	9,0
Banhado	4,9	140	14,1	26	83	376	2,05	1,77	7,7	6,04	21
Sinval	5,1	130	12,3	36	154	878	2,16	3,14	11,7	12,1	32

⁽¹⁾ potencial de hidrogênio em água (Tedesco et al., 1995); ⁽²⁾ método da pipeta (Tedesco et al., 1995); ⁽³⁾ Matéria orgânica do solo, método da combustão úmida (Tedesco et al., 1995); ⁽⁴⁾ Mehlich 1 (Tedesco et al., 1995); ⁽⁵⁾ Extrator acetato de amônio, 1,0 mol L⁻¹ (EMBRAPA, 1997); ⁽⁶⁾ Condutividade elétrica do extrato saturado (Tedesco et al., 1995); ⁽⁷⁾ Percentagem de sódio trocável (EMBRAPA, 1997).

Quando as plantas do tratamento testemunha, em cada local, atingiram o estágio de desenvolvimento V4, procedeu-se a avaliação do estande em todos os tratamentos daquele local. Em cada parcela, contou-se o número de plantas emergidas em duas linhas de 1,0 m (Foloni et al., 1997). Para avaliação da massa seca da parte aérea das plantas, efetuaram-se coletas em quatro estádios de desenvolvimento do arroz: em V4, aos 21 dias após o alagamento (DAA), aos 42 DAA e no florescimento pleno (FP). Coletou-se 1,0 m de plantas, exceção feita no estágio V4, quando se coletaram 2,0 m. As plantas foram secas em estufa de ventilação forçada por 72 horas, para a determinação da massa seca. Devido ao estabelecimento irregular do estande no Sinval (PST 32 %), em função da alta salinidade e salinidade do solo (Tabela 5.1), optou-se por apenas uma coleta de plantas, no florescimento pleno, para que não fossem prejudicadas as demais avaliações do trabalho. Adicionalmente, aos 42 DAA, mediu-se a estatura das plantas e o teor indireto de nitrogênio na folha mais jovem, pelo aparelho clorofilômetro SPAD-502[®] (Minolta, 1989), nos diferentes locais e tratamentos.

Por ocasião da maturação, previamente à colheita de grãos, cortaram-se, no nível do solo, duas linhas de 50 cm de comprimento cada, em cada local e tratamento. Após contagem do número de perfilhos, o material foi desidratado em estufa de ventilação por 72 horas, para determinação da massa de perfilhos. Foi

avaliado também, o comprimento de panículas. Em seguida, as espiguetas foram retiradas e separadas manualmente das panículas em viáveis e inviáveis, para determinação da massa de 1.000 grãos. A colheita de grãos foi realizada em uma área de 5 m² por parcela. O material colhido foi processado em trilhadora estacionária, sendo que os grãos foram limpos com peneira e pesados com correção de umidade para 13 %.

Os resultados dos atributos de planta em cada nível de salinidade (local) foram submetidos à análise de variância, para verificação da significância estatística ($p < 0,01$; $p < 0,05$) dos efeitos do manejo diferenciado da adubação potássica. Verificada a significância, foi realizada a comparação de médias pelo teste DMS ($p < 0,05$). Adicionalmente, foram correlacionados todos os atributos avaliados, independentemente do manejo da adubação potássica, com os respectivos rendimentos de grãos. Estas correlações foram realizadas apenas para a cultivar IRGA 417 (PST de 9,0 %; 21 % e 32 %).

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1. Atributos de planta afetados pelo manejo do fertilizante potássico

O resumo da análise de variância referente ao estande de plantas nos diferentes níveis de salinidade do solo (Tabela 5.2) demonstra que houve efeito do manejo da adubação potássica nos solos com PST de 5,6 % ($p < 0,01$), 21 % ($p < 0,05$) e 32 % ($p < 0,05$). A aplicação de 90 kg ha⁻¹ de K₂O em linha reduziu ($p < 0,05$) a emergência de plântulas em relação à testemunha (sem adição de K₂O), à aplicação de 90 kg ha⁻¹ de K₂O a lanço e à aplicação fracionada de K₂O (45 kg ha⁻¹ na linha de semeadura e 45 kg ha⁻¹ na DPF) nos solos com PST de 5,6 % e 21 % (Figura 5.2a). O estande de plantas, no solo com PST de 32 %, foi muito baixo, o que deve ser atribuído, principalmente, à alta salinidade, mesmo que tenha sido maior ($p < 0,05$) na testemunha, em relação à aplicação do adubo potássico, independentemente do seu manejo (Figura 5.2a).

Tabela 5.2. Resumo da análise de variância referente ao estande, à massa da parte aérea em V4 (MPAV4), à massa da parte aérea aos 21 dias após o alagamento (MPA21), à massa da parte aérea aos 42 dias após o alagamento (MPA42), à massa da parte aérea da parte aérea no florescimento pleno (MPAFP), à estatura, à leitura de clorofilômetro (Índice SPAD), à massa de perfilhos (MP), a massa de 1.000 grãos (1.000 gr), ao comprimento de panículas (CP) e ao rendimento de grãos (RG), em solos com diferentes percentagens de sódio trocável (PST). Mostardas, RS, safra 2008/2009

Fonte de variação	GL	Quadrado médio										
		Estande	MPAV4	MPA21	MPA42	MPAFP	Estatura	SPAD	MP	1.000 gr	CP	RG
		x 10	x 10 ⁵	x 10 ²	x 10 ²	x 10	x 10	x 10	x 10 ²	x 10 ²	x 10	x 10 ²
.....PST 5,6 %.....												
Blocos	2	16,1	9,79	54,4	1,30	45,2	14,7	2,26	44,6	25,3	136	6,11
Tratamentos	3	705**	1,020**	22,2	3,44*	2,87	58,9	10,2	8,3	7,19	679	42,2*
Resíduo	6	9,57	54,2	11,1	67,3	44,5	24,9	18	18,1	13,8	971	7,33
CV (%)		3,71	19,9	19,2	11,8	11,4	2,10	4,21	25,5	1,46	4,38	3,31
.....PST 9,0 %.....												
Blocos	2	2,51	30,3	15,9	66,8	3,60	88,7	92,6	41,6	0,33	181	40,7
Tratamentos	3	81,4	23,1	32,2	148	4,82	7,21	9,26	122	30,2	116	31,8
Resíduo	6	21,5	30,2	8,62	62,4	2,18	23,9	26,6	115	31,9	390	9,28
CV (%)		4,12	11,8	17,3	15,2	22,8	2,46	5,31	9,13	2,37	2,94	3,53
.....PST 21 %.....												
Blocos	2	714	75,8	43,9	182	1,81	18,3	18,5	281	7,75	10,4	29
Tratamentos	3	1466*	68,9	43,9*	86	1,2	35	28,4	204	28,8	14,7	111
Resíduo	6	264	67,7	9,07	49,3	0,59	11,9	38,7	123	38,2	3,43	59,3
CV (%)		23,8	42,7	33,5	16,0	13,1	1,66	5,68	7,96	2,53	2,61	11,45
.....PST 32 %.....												
Blocos	2	52,5	n/a	n/a	n/a	2,94	48,4	8,28	107	222	1,040	22,8
Tratamentos	3	360*	n/a	n/a	n/a	120*	101	14,2	15,9	29,6	101	132
Resíduo	6	54,7	n/a	n/a	n/a	19,5	55,1	10,9	38,5	48,5	364	30,3
CV (%)		52,0				45,5	4,42	2,68	29,4	3,05	2,41	64,9

*, **: significativo a 5 e 1 %, respectivamente. n/a: não avaliado.

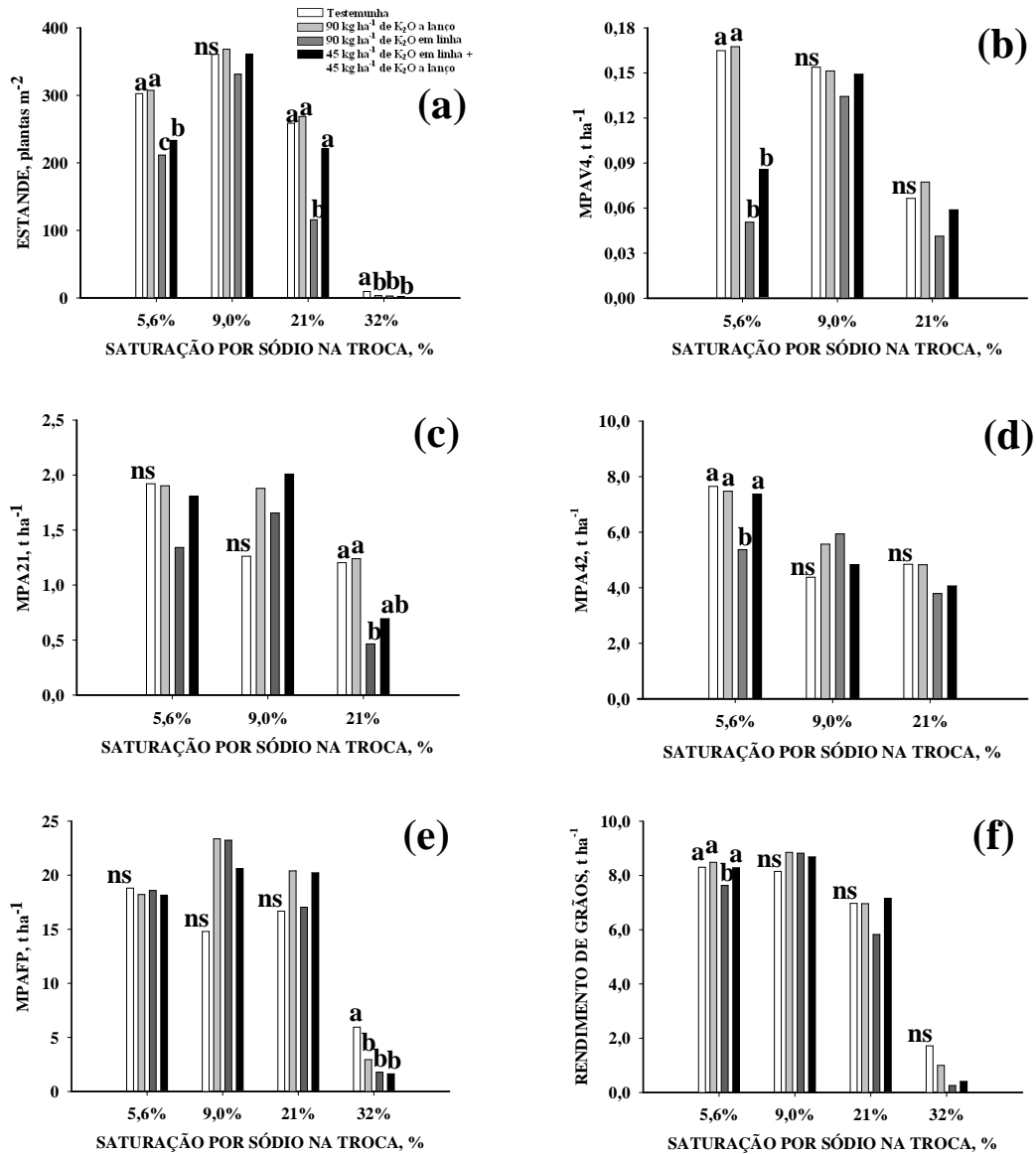


Figura 5.2. Estande (a), massa da parte aérea em V4 (b), massa seca da parte aérea aos 21 DAA (c), massa seca da parte aérea aos 42 DAA (d), massa seca da parte aérea no florescimento pleno (e) e rendimento de grãos (f) de plantas de arroz irrigado em função do manejo da adubação potássica e do nível de salinidade no solo. Médias seguidas pela mesma letra, entre os níveis de salinidade não diferem entre si, pelo teste DMS, a 5% de probabilidade. NS: não significativo no teste de análise de variância. Mostardas, RS, safra 2008/2009.

Ainda com relação ao estande, o fracionamento da aplicação do KCl na linha de semeadura mostrou-se alternativa eficaz na mitigação dos efeitos do contato direto das sementes com o adubo, no nível de PST de 21 %, não diferindo ($p > 0,05$) dos tratamentos testemunha e a lanço, o que não foi verificado no solo

com PST de 5,6 %, onde esta prática resultou em menor estande ($p < 0,05$), em relação à testemunha e aplicação à lanço (Figura 5.2a).

A aplicação de altas doses de potássio na linha de semeadura é, portanto, prejudicial ao estabelecimento das plantas, tanto pela redução do potencial osmótico ao redor do sistema radicular, como pelo efeito específico do cloreto à cultura, que é moderadamente sensível à salinidade. Oster et al. (1984) já sugeriram a necessidade de práticas de manejo para evitar o contato direto das sementes em substratos adversamente salinos, visando emergência mais uniforme das plântulas. Nesse sentido, Carmona et al. (2009b) observaram retardamento no desenvolvimento de plântulas de arroz da cultivar IRGA 417, cultivado em microparcelas de solo com PST de 0,7 %, 5,0 %, 10 % e 20%. Nesse estudo, foi verificado que o crescimento inicial das plântulas foi favorecido pela aplicação do fertilizante potássico a lanço em relação à aplicação na linha de semeadura e que os efeitos eram mais expressivos nos maiores níveis de salinidade do solo. Alguns produtores, nas planícies costeiras do RS, têm aplicado o fertilizante potássico a lanço antecipadamente, como forma de obter melhor estabelecimento da cultura. Essa prática aumenta a vida útil da semeadora e favorece um melhor aproveitamento da mão de obra e a semeadura na época recomendada, principalmente em propriedades de grande porte, ou com disponibilidade restrita de equipamentos.

O manejo diferenciado do fertilizante potássico afetou a massa seca da parte aérea no estágio V4, no solo com PST de 5,6 % ($p < 0,01$), aos 21 DAA no solo com PST de 21 % ($p < 0,05$), aos 42 DAA, novamente no solo com PST de 5,6 % ($p < 0,05$) e no florescimento pleno no solo com PST de 32 % ($p < 0,05$) (Tabela 5.2). No menor nível de salinidade, a massa seca das plantas em V4 (Figura 5.2b) foi semelhante, em comparação ao estande nesse nível de salinidade (Figura 5.2a). O fertilizante potássico aplicado na linha de semeadura, tanto na dose integral, quanto fracionado, reduziu ($p < 0,05$) a produção de biomassa. Nesse local, esse efeito foi novamente verificado aos 42 DAA (Figura 5.2d). Entretanto, apenas a aplicação de 90 kg ha^{-1} de K_2O em linha causou prejuízo ($p < 0,05$) à produção de biomassa. Já aos 21 DAA, o manejo do fertilizante apresentou efeito apenas no solo com PST de 21 % (Figura 5.2c),

onde, a exemplo do verificado no solo com PST de 5,6 % (Figura 5.2b,d) a aplicação da dose integral do fertilizante na linha de semeadura diminuiu ($p < 0,05$) a produção de biomassa, em relação à testemunha e à aplicação à lanço. Já no florescimento pleno, houve produção muito baixa de biomassa no solo com PST de 32 % (Figura 5.2e), o que refletiu o baixo estabelecimento de plantas nesse nível de salinidade (Figura 5.2a), como também verificado por Shannon et al. (1998).

De modo geral, o efeito mais acentuado do manejo do fertilizante potássico sobre os atributos de planta avaliados se observou no solo com PST de 5,6 % (Tabela 5.2), sendo que os prejuízos causados pela aplicação da dose integral de KCl na linha de semeadura foram verificados no estabelecimento, desenvolvimento de biomassa e rendimento de grãos (Figura 5.2a,b,d,f). Era de se esperar, entretanto, que a importância do modo de aplicação do adubo fosse proporcional ao aumento da salinidade do solo, pela soma de fatores desfavoráveis ao cultivo, o que não ocorreu. Nesse sentido, deve-se levar em consideração a menor pluviosidade verificada após a implantação do experimento no solo com PST de 5,6 %, em relação aos demais locais (dados não apresentados), já que a semeadura nesse local foi realizada com nove dias de atraso em relação aos solos com PST de 21 % e 32 % e 16 dias em relação a PST de 9,0 %. A menor ocorrência de chuvas pode ter potencializado o efeito higroscópico do KCl (o que se refletiu até a colheita de grãos - Figura 5.2f), já que os solos em estudo têm baixo teor de argila e matéria orgânica (Tabela 5.1) e, portanto, baixa capacidade de retenção de água.

5.3.2. Relação entre rendimento de grãos e demais atributos de planta nos diferentes níveis de salinidade

As perdas de produtividade em função da salinidade podem ocorrer em função de uma série de causas, como redução da capacidade fotossintética (Sultana et al., 1999), com decréscimo no acúmulo de fotoassimilados nos grãos (Asch et al., 2000), além do decréscimo no enchimento dos grãos, pelo aporte deficitário de carboidratos às panículas (Khatun & Flowers, 1995). Como não foi

verificado, pela análise da variância, efeito dos tratamentos de adubação potássica em alguns atributos de planta (especialmente nos componentes do rendimento) (Tabela 5.2), procurou-se verificar, pelo estudo de regressão (Figura 5.3), quais atributos de planta mais contribuíram para as perdas em rendimento.

Todos os atributos de planta avaliados se relacionaram com o rendimento de grãos. Dentre as medições realizadas durante o período vegetativo da planta, o estande apresentou a maior relação (Figura 5.3a). A massa seca da parte aérea em V4 apresentou maior relação (Figura 5.3b), quando comparada à massa seca da parte aérea aos 21 DAA (Figura 5.3c) e massa seca da parte aérea aos 42 DAA (Figura 5.3d). Dentre todas as avaliações de biomassa, entretanto, a massa seca da parte aérea no florescimento pleno foi a que melhor se relacionou à produtividade (Figura 5.3e). Há na literatura informações de que diferentes genótipos de arroz sofrem inibição na produção de biomassa com o aumento da salinidade do meio de cultivo, como apresentado por Zeng et al. (2001), Grattan et al. (2002) e Fraga et al. (2010). A diminuição do potencial osmótico da solução do solo induz o acúmulo de ácido abscísico pelas plantas (Chazen et al., 1995), diminuindo a condutância estomatal e a concentração intercelular de CO₂. Nesse caso, o fechamento de estômatos diminui os potenciais hídrico e osmótico das folhas, além da síntese de constituintes bioquímicos, gerando menor acúmulo de fotoassimilados e, por consequência, menor produção de biomassa (Sultana et al., 1999).

Esses resultados demonstram a importância de um adequado estabelecimento inicial da cultura, para se ter o desenvolvimento ideal de massa aérea, que inclui, além do perfilhamento, a estatura de planta, como requisitos para rendimento viável de grãos. Os dados apresentados estão em concordância com os obtidos por Zeng & Shannon (2000), que observaram relação positiva entre o perfilhamento das plantas sob estresse salino e a produtividade de grãos de arroz irrigado.

A estatura de planta também apresentou relação com a produtividade da cultura (Figura 5.3f). Neste caso, a menor produção de massa

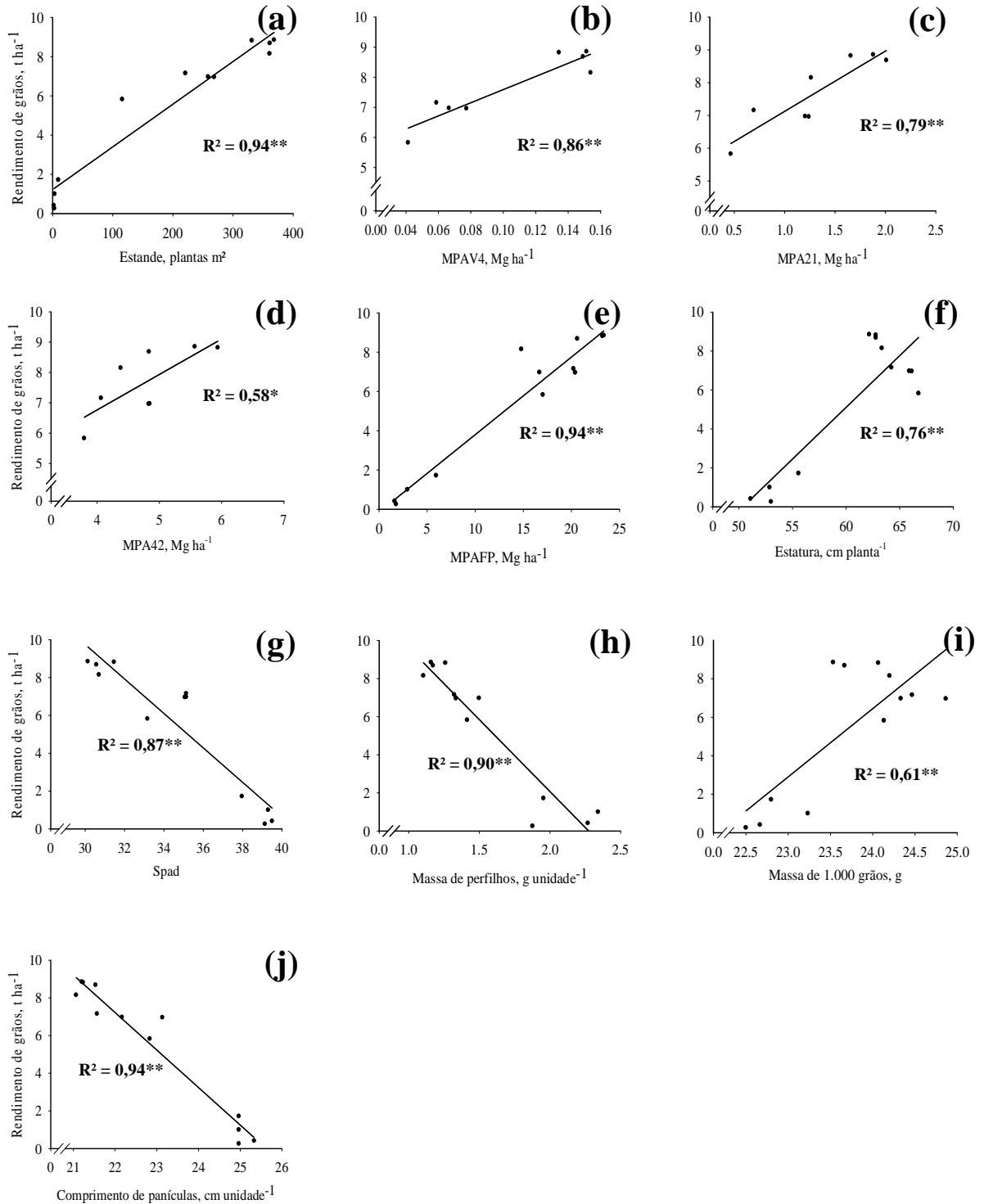


Figura 5.3. Relação entre o estande (a), a massa da parte aérea no estádio V4 (b), a massa da parte aérea aos 21 dias após o alagamento (c), a massa da parte aérea aos 42 dias após o alagamento (d), a massa da parte aérea no florescimento pleno (e), a estatura (f), o índice SPAD (g), a massa de perfilhos (h), a massa de 1.000 grãos (i) e o comprimento de panículas (j) com o rendimento de grãos de arroz do cultivar Irga 417, cultivado em solos com diferentes níveis de salinidade e submetido a diferentes manejos da adubação potássica, **: $p < 0,01$; *: $p < 0,05$. Mostardas, RS, safra 2008/2009.

seca (Figura 5.2e) pode ser resultado do baixo estande (Figura 5.2a) e da menor emissão de folhas, já que a produção de perfilhos tende a ser menor em altos níveis de salinidade, o que se reflete em menor estatura. Além disso, o comprimento das folhas também tende a ser menor (Singh et al., 2007). Outro atributo relacionado ao rendimento foi a massa de 1.000 grãos (Figura 5.3i). A menor massa de grãos, em função da salinidade, pode ser atribuída à diminuição do tamanho dos grãos. Entretanto, a redistribuição de carboidratos entre as espiguetas, após redução no número de espiguetas sob estresse, pode compensar parcialmente as perdas em produtividade pelo aumento da fertilidade de espiguetas, a partir das remanescentes (Zeng & Shannon, 2000), o que não foi observado no presente estudo.

Dentre os atributos que se relacionaram negativamente com a produtividade, destaca-se o comprimento de panículas (Figura 5.3j), seguida da massa de perfilhos (Figura 5.3h) e do índice SPAD (Figura 5.3g). Apesar da salinidade do solo ter ocasionado os maiores prejuízos à massa seca da parte aérea no florescimento pleno (Figura 5.2e) justamente na PST de 32 %, os perfilhos remanescentes ficaram mais grossos, pelo maior espaçamento ocasionado pelo baixo estande (Figura 5.2a), o que contribuiu para o aumento unitário da massa de perfilhos. O mesmo foi observado com relação ao comprimento de panículas, que foi, em média, superior na PST de 32 % (25,1 cm), em relação à PST de 21 % (22,4 cm, em média) e à PST de 9,0 % (21,3 cm).

O maior índice SPAD verificado na PST de 32% pode estar relacionado ao maior acúmulo de amônio nas folhas, conforme constataram Nguyen et al. (2005), em plântulas de arroz cultivadas em solução de 100 mol L^{-1} de NaCl, onde o aumento da atividade proteolítica e a diminuição da síntese de proteínas causaram acúmulo de aminoácidos livres, o que pode, indiretamente, ocasionar acúmulo excessivo de amônio nas folhas (Hoai et al., 2003). A coloração verde-azulada, referida por Ayers & Westcot (1999), como um dos sintomas relacionados à salinidade sobre o arroz, pode estar, portanto, relacionada aos teores elevados de nitrogênio nas folhas. Dessa forma, o índice SPAD pode se tornar um indicador rápido e eficiente do estresse causado pela salinidade.

5.4. Conclusões

A aplicação de altas doses de fertilizante potássico na linha de semeadura afeta negativamente o estabelecimento da cultura do arroz diminuindo o acúmulo de massa seca em fases subsequentes.

Os prejuízos causados ao estande de plantas pela aplicação localizada do fertilizante potássico se refletem na perda de produtividade da cultura, mesmo em níveis baixos de salinidade do solo.

Os atributos de planta, sob diferentes condições de estresse pela salinidade do solo, que melhor se relacionaram positivamente à produtividade são o estande e a massa seca da parte aérea no florescimento pleno, e, negativamente, foi o comprimento de panículas.

6. CAPÍTULO V – ABSORÇÃO PELO ARROZ IRRIGADO E DINÂMICA DE CÁTIONS NA SOLUÇÃO DE SOLOS COM DIFERENTES NÍVEIS DE SALINIDADE ⁽⁴⁾

6.1. Introdução

O cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul ocorre em seis diferentes regiões orizícolas na metade Sul do Estado, denominadas Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, zona Sul e Planícies Costeiras Interna e Externa. As produtividades obtidas são variáveis entre as regiões, embora os níveis de tecnologia disponíveis sejam basicamente os mesmos. Na Planície Costeira Externa, por exemplo, as produtividades são menores em relação às demais regiões, sendo que, na safra 2008/09, a produtividade média foi de 6,8 Mg ha⁻¹, em uma área de 128.760 ha, enquanto que na Fronteira Oeste, foi de 7,8 Mg ha⁻¹, em uma área superior a 310.000 ha (IRGA, 2009a). As discrepâncias observadas entre algumas regiões podem ser atribuídas à ocorrência de diferentes tipos de solo (Streck et al., 2008), variações na radiação solar (Mota, 1995; Custódio, 2007) e estresses específicos a cada uma delas, como a salinidade do solo e da água. Nesse contexto, a Laguna dos Patos assume grande importância, pois, por estar conectada ao Oceano, está sujeita à salinização. Este manancial é a principal fonte de irrigação das lavouras de arroz das planícies costeiras, estando seus solos sujeitos à deposição de sais em níveis incompatíveis com o cultivo do arroz.

⁽⁴⁾ Trabalho publicado na Revista Brasileira de Ciência do Solo (34:1851-1863, 2010), sob o título “Cation dynamics in soils with different salinity levels growing irrigated rice”.

Além do aporte de sais via água de irrigação, a salinização do solo no Rio Grande do Sul pode ocorrer por outras causas. Na Planície Costeira Externa, a formação do solo tem caráter evolutivo, como decorrência da sedimentação marinha e flúvio-lacustre. Esses sedimentos, que podem ser mais ou menos permeáveis, favorecem o fluxo de água subterrânea, proporcionando uma zona de reação onde a água doce da Laguna dos Patos e a água salgada do mar se misturam (Charette & Sholkovitz, 2006). A frente de água doce-salgada se movimenta no perfil do solo em resposta ao nível sazonal de água da Laguna dos Patos e ao gradiente hidráulico da água subterrânea (Niencheski et al., 2007). Em locais onde o lençol freático é mais próximo da superfície e, dependendo da evapotranspiração, pode ocorrer a ascendência de sais até a camada mais superficial do solo.

Uma das alternativas viáveis para mitigação da salinidade do solo pode ser o próprio cultivo de arroz irrigado, desde que se utilize água de boa qualidade durante o ciclo da cultura. Embora o arroz seja uma cultura sensível à salinidade nos estádios de plântula, com diminuição do estande, e no reprodutivo, com esterilidade de espiguetas (Ehrler, 1960; Zeng & Shannon, 2000), o estabelecimento de uma lâmina de água favorece a lixiviação de sais, especialmente do Na, no perfil do solo (Ponnamperuma, 1981). Além disso, a própria absorção pela cultura favorece a saída de outros sais do sistema, já que o arroz irrigado é altamente exigente em K, Ca e Mg (Slaton et al., 2004; Machado, 1983). Embora sejam as características do solo que determinam a intensidade das modificações na solução, a presença de plantas resultará em alterações no processo, quer pela absorção de nutrientes, quer por modificações na rizosfera, principalmente pelo fluxo de oxigênio no aerênquima e a precipitação do Fe^{3+} nas raízes (Silva et al., 2003). Grattan et al. (2002), Boivin et al. (2002) e Schoenfeld et al. (2007) relatam o aumento da salinidade na camada de solo de até 10 cm, pelo efeito de evapoconcentração. Diversos fatores podem influir nessa dinâmica, como a textura, a CTC, a porosidade do solo, a profundidade da camada impermeável do solo e o ambiente em que se conduz o trabalho. Faz-se necessário, portanto, verificar se o cultivo do arroz irrigado tem potencial de

mitigar ou aumentar os níveis de salinidade no solo nas regiões do Estado onde o problema já é previamente estabelecido.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do cultivo de arroz irrigado sobre a dinâmica de cátions básicos e da condutividade elétrica da solução de solos com diferentes níveis de salinidade, na Planície Costeira Externa do Rio Grande do Sul.

6.2. Material e Métodos

O trabalho foi realizado a campo, na Fazenda Cavalhada, localizada no município de Mostardas, na Região Arrozeira denominada Planície Costeira Externa (PCE), Rio Grande do Sul. Na propriedade, predominam Planossolos Háplicos (Streck et al., 2008) e cultiva-se arroz irrigado há cerca de 80 anos.

Foram selecionadas áreas de solo com diferentes níveis de salinidade na camada arável, expressos pela percentagem de saturação por sódio, segundo a equação: $PST (\%) = [(Na^+ / CTC_{pH\ 7,0})] \times 100$. A seleção dos locais foi realizada a partir da amostragem prévia e análise de oito áreas de lavoura, sem e com histórico de sintomas de salinidade nas plantas de arroz, caracterizados por baixo perfilhamento e elevada esterilidade de espiguetas (Ehrler, 1960). Nesses locais, realizaram-se amostragens de solo, nas camadas estratificadas de solo de 0 – 5 cm, 5 – 10 cm, 10 – 20 cm e 20 – 40 cm, numa área de 40 m². Foram retiradas 10 sub-amostras, que compuseram uma amostra composta por camada por local. A partir daí, selecionaram-se quatro locais com diferentes PST na camada de 0 – 20 cm (Tabela 6.1), buscando-se duas áreas que representassem os extremos, uma área com PST média e outra com PST alta. As áreas selecionadas possuíam PST na camada 0 – 20 cm de: 5,6 % (Casamento), sem histórico de efeito da salinidade; 9,0 % (Cavalhada), com histórico de emergência desuniforme, mas sem problemas de esterilidade de espiguetas; 21 % (Banhado), com emergência desuniforme e problemas de esterilidade de espiguetas; e 32 % (Sinval), com emergência esparsa de arroz, alta esterilidade de espiguetas e produtividade de grãos muito baixa.

Tabela 6.1. Atributos químicos iniciais em diferentes locais e camadas dos solos utilizados no experimento. Mostardas, RS, safra 2008/2009

Local	Camada	pH H ₂ O	Argila	Matéria orgânica	P ⁽¹⁾	Cátions trocáveis					CTC	PST ⁽³⁾	CE
						K ⁽²⁾	Na ⁽²⁾	Ca ⁽²⁾	Mg ⁽²⁾	H + Al			
			.....g kg ⁻¹.....		.mg dm ⁻³.	.....cmol _c dm ⁻³					%	dS m ⁻¹	
Casamento	0 - 5	4,4	140	24	34	70	0,40	2,50	1,40	4,67	9,2	4,4	2,23
	5 - 10	4,6	140	22	37	51	0,41	2,51	1,45	4,54	9,0	4,6	1,61
	10 - 20	4,9	140	15	28	23	0,51	2,16	1,47	3,57	7,8	6,6	1,46
	20 - 40	5,6	160	8,6	8,1	51	0,88	2,58	2,81	2,72	9,1	9,7	1,63
Cavanhada	0 - 5	4,6	150	18	36	81	0,40	1,81	1,50	2,53	6,5	6,2	2,01
	5 - 10	4,6	150	15	39	43	0,47	1,63	1,50	3,27	7,0	6,8	1,53
	10 - 20	5,7	130	11	70	62	0,87	2,03	2,42	2,14	7,6	11,4	1,86
	20 - 40	7,1	150	6,5	15	137	2,50	3,06	4,38	1,45	11,7	21,2	2,82
Banhado	0 - 5	4,9	140	19	31	90	1,58	2,03	1,80	2,56	8,2	19,1	6,34
	5 - 10	5,2	160	19	34	82	1,35	2,01	1,68	2,28	7,5	18,0	5,82
	10 - 20	6,3	160	9,5	20	82	1,80	2,07	1,79	1,63	7,5	23,8	5,40
	20 - 40	6,5	160	3,5	9,7	82	2,53	2,23	2,36	1,32	8,7	29,3	4,98
Sinval	0 - 5	5,1	130	14	47	152	5,04	1,77	3,41	2,51	13,1	38,5	15,54
	5 - 10	5,6	120	14	45	148	3,63	2,20	3,12	2,29	11,6	31,3	9,03
	10 - 20	6,3	130	10	26	160	3,30	2,34	3,01	1,93	11,0	30,4	6,87
	20 - 40	7,0	140	4,8	11	183	3,66	2,08	3,18	1,40	10,8	33,6	6,41

⁽¹⁾Método Mehlich 1; ⁽²⁾ Extrator acetato de amônio, 1,0 mol L⁻¹; ⁽³⁾ Percentagem de sódio trocável.

Utilizaram-se as cultivares IRGA 417 em três locais (Cavanhada, Banhado e Sinval) e a IRGA 422 CL em uma das áreas (Casamento), em função da alta infestação por arroz vermelho. Esta variedade tem como parental imediato a cultivar IRGA 417 (Lopes et al., 2003), sendo resultado de cinco retrocruzamentos, apresentando, portanto, 97% das características da IRGA 417. O sistema de cultivo adotado foi o semi-direto. Todas as áreas foram semeadas em linha, em diferentes datas, em função da dinâmica de semeadura adotada na propriedade: Cavanhada, em 01 de novembro de 2008, Banhado e Sinval, em 8 de novembro de 2008 e Casamento, em 17 de novembro de 2008. A densidade de semeadura utilizada foi de 120 kg ha^{-1} , com espaçamento de 0,2 m entre linhas, sendo que as sementes receberam tratamento com inseticida à base de fipronil, para prevenir a infestação de *Oryzophagus oryzae*, a bicheira-da-raiz (Pulver et al., 2005). O controle de plantas invasoras foi feito com herbicidas específicos (penoxulam + clomazone nas áreas cultivadas com IRGA 417 e imazetapir + imazapic, na área cultivada com IRGA 422 CL) aplicados no estágio de desenvolvimento V4 (Counce et al., 2000).

Os atributos químicos e o teor de argila dos solos (Tedesco et al., 1995) estão expressos na Tabela 6.1. A dinâmica de cátions foi estudada na solução do solo do tratamento testemunha (sem adubação potássica) nos quatro níveis de salinidade (Capítulo IV). Como nesses locais os níveis de P eram muito altos (SOSBAI, 2007) e o K era um dos objetos de estudo, não foi realizada adubação de base na cultura. Aplicou-se apenas a adubação de cobertura de 120 kg ha^{-1} de N, sob a forma de uréia, previamente à entrada da água de irrigação, no estágio V4. Utilizaram-se duas fontes de água de boa qualidade: a Lagoa do Casamento (Cavanhada e Casamento) e a Lagoa dos Gateados (Banhado e Sinval). Foi mantida uma lâmina de água de cerca de 5 cm de altura até a colheita dos grãos. Os experimentos foram conduzidos em parcelas de 12 m^2 (4 x 3 m), com espaçamento de 0,5 m e três repetições. Um pluviômetro foi instalado na sede da Fazenda Cavanhada, em local aproximadamente equidistante entre as quatro áreas experimentais. A pluviosidade ocorrida durante a execução do trabalho, nos meses de novembro e dezembro de 2008 e janeiro e fevereiro de 2009, consta na Tabela 6.2, onde também se encontram os dados de precipitação auferidos na

estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nos mesmos meses. Para efeitos de comparação, são apresentados os limites máximos médios de precipitação para o município de Mostardas, também válidos para o local dos experimentos, baseados em isoietas de cartas climáticas básicas (média de 30 anos), assim como a precipitação média (11 anos) nos municípios de Tramandaí e Mostardas, que distam de 84 e 63 km da sede da Fazenda Cavalhada, respectivamente.

Tabela 6.2. Precipitação pluvial total nos meses de execução dos experimentos na Fazenda Cavalhada e no Município de Mostardas⁽¹⁾ e média mensal de pluviosidade dos Municípios de Mostardas⁽²⁾ e Tramandaí⁽³⁾

Local	2008		2009	
	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro
	.....mm.....			
Cavalhada	24,5	109	106,5	182
Mostardas ⁽¹⁾	16	61	120	146
Mostardas ⁽²⁾	até 60	até 80	até 100	até 100
Tramandaí ⁽³⁾	86	97	95,5	113,2

⁽¹⁾ Dados fornecidos pelo 8º Distrito de Meteorologia, Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, a partir de medições na estação automática locada no município de Mostardas. ⁽²⁾ Dados baseados em isoietas de cartas climáticas básicas. Normal do período de 1931 – 1960 (IPAGRO, 1989). ⁽³⁾ Pluviosidade média mensal. Normal de 1961 – 1972 (IPAGRO, 1979).

Previamente à entrada de água nos quadros, foram instalados coletores de solução do solo nas profundidades de 5, 10, 20 e 40 cm. O equipamento consiste de uma mangueira plástica de 5 mm de diâmetro conectada a um tubo coletor de PVC de 25 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento, recoberto nas extremidades com tela de nylon. Pela extremidade da mangueira, localizada acima da lâmina de água, extraiu-se, com seringa de 60 mL, aproximadamente 40 mL de solução por profundidade (Silva et al., 2003). As alíquotas eram imediatamente acondicionadas em tubos plásticos com tampa a vácuo. As coletas foram realizadas a partir do sétimo dia após o início do alagamento (7 DAA), até 91 DAA, num intervalo de sete dias entre as coletas. Coletaram-se, também, amostras da lâmina de água e da água de irrigação, esta até 84 DAA, quando foi suprimida a irrigação das lavouras. Cerca de quatro horas após as coletas, foram determinados a condutividade elétrica (CE) e o pH das amostras. Após isso,

acidificaram-se as alíquotas, sendo analisados, posteriormente, os teores de Na, K, Ca e Mg na solução do solo, na lâmina de água e na água de irrigação.

Quando as plantas atingiram o estágio de desenvolvimento V4, em cada local, procedeu-se a avaliação do estande. Em cada parcela, contou-se o número de plantas emergidas em duas linhas de 1 m linear. Para avaliação da massa seca, efetuou-se a coleta de 1 m linear da parte aérea das plantas, quando estas atingiram o florescimento pleno (FP), aos 77 DAA. As plantas foram secas em estufa de ventilação forçada por 72 horas, para determinação da massa seca e, posteriormente, dos teores no tecido e da absorção de Na, K, Ca e Mg. A colheita de grãos foi realizada em uma área de 5 m² por parcela. O material colhido foi processado em trilhadora estacionária, sendo os grãos limpos com peneira e pesados. A massa foi corrigida para a umidade de 13 %.

Os resultados de solução do solo, lâmina de água e água de irrigação foram submetidos à análise de regressão. Utilizaram-se as equações polinomiais que melhor se ajustaram aos dados, sendo apresentada a significância dos coeficientes de regressão a 10, 5 e 1 %, juntamente com os coeficientes de determinação. Para determinação do balanço de íons na solução do solo, em função da absorção das plantas, efetuou-se a subtração das concentrações iônicas na solução aos 7 DAA pelas concentrações aos 77 DAA, período que coincidiu com o florescimento pleno nos quatro locais. Foram utilizadas as concentrações iônicas médias nas profundidades de 5, 10 e 20 cm, já que, para o arroz irrigado, cerca de 90% das raízes se concentram na camada de 0-20 cm (Lopes et al, 1994; Teo et al, 1995; Abichequer, 2004). De posse dos valores do saldo iônico na solução entre 7 e 77 DAA e da absorção iônica aos 77 DAA foram determinadas, por diferença, as perdas de íons por lixiviação.

6.3. Resultados e Discussão

6.3.1. Estande e massa seca de plantas no florescimento pleno

Entre os níveis de salinidade avaliados, o melhor estabelecimento ocorreu na Cavalhada, sendo superior até ao verificado no Casamento (Tabela 6.3), de menor nível de salinidade do solo (Tabela 6.1). Isso pode ter ocorrido pela

semeadura mais tardia no Casamento (17 de novembro de 2008), numa condição desfavorável de umidade, ao contrário da condição verificada na Cavalhada (1° de novembro de 2008), Banhado e Sival (8 de novembro de 2008). O estabelecimento inferior no Banhado e, principalmente, no Sival deve ser atribuído à maior salinidade do solo nesses locais, em comparação ao Casamento e Cavalhada (Tabela 6.1). Diversos estudos (Oster et al., 1984; Shannon et al., 1998; Grattan et al., 2002) reportam uma diminuição do estande de plantas proporcional ao nível de salinidade, tanto do solo quanto da água de irrigação e da solução do solo.

Tabela 6.3. Estande e massa seca do arroz irrigado, cultivado em solos com diferentes níveis de salinidade. Mostardas, RS, safra 2008/2009

Local	PST ⁽¹⁾	Estande ⁽²⁾	Massa seca ⁽³⁾
	%	plantas m ⁻²	t ha ⁻¹
Casamento	5,6	303	18,8
Cavalhada	9,0	361	14,8
Banhado	21,0	259	16,7
Sival	32,0	10	5,9

⁽¹⁾ Percentagem de sódio trocável. ⁽²⁾ No estágio de desenvolvimento V4 (Counce et al., 2000). ⁽³⁾ No florescimento pleno.

A tendência de maior produção de massa seca no florescimento pleno se verificou justamente no menor nível de salinidade (Tabela 6.3). Entretanto, a tendência de maior produção observada no Banhado, com PST de 21 %, em relação à Cavalhada, com PST de 9,0 %, não era esperada. A exemplo do que ocorreu no estabelecimento, a massa seca observada no maior nível de salinidade foi muito inferior aos demais locais (Tabela 6.3), reflexo da maior salinidade do solo (Tabela 6.1).

6.3.2. Dinâmica de íons na solução do solo e absorção pelas plantas

Os teores de Na na solução do solo (Figura 6.1) foram, a exemplo dos teores em solo seco (Tabela 6.1), se elevando com o nível de salinidade e com a profundidade das camadas avaliadas. De uma maneira geral, os teores na solução

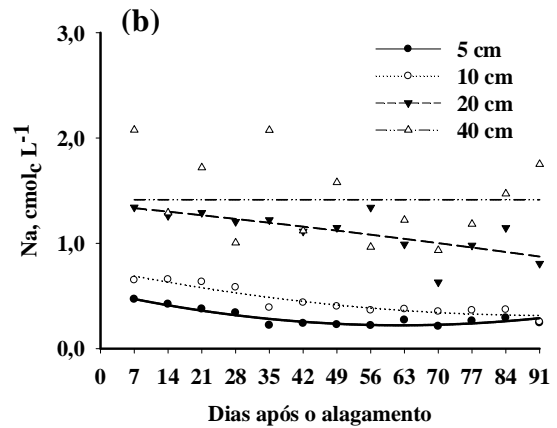
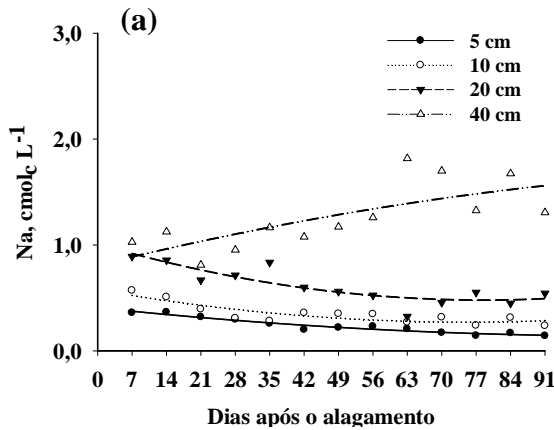
diminuíram com o desenvolvimento da cultura; exceção feita ao Banhado (Figura 6.1c) nas profundidades de 5 cm e 20 cm, onde o teor de sódio se manteve relativamente estável, com oscilações ao longo do ciclo. Essa diminuição nos teores de sódio no tempo foi também observada na lâmina de água (Figura 6.2a), a qual também foi diretamente influenciada pelo grau de salinidade do solo (Tabela 6.1), uma vez que a água de irrigação (Figura 6.2b) era de boa qualidade (teores máximos de Na ao redor de $0,3 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$). Os teores de Na na lâmina de água decresceram com maior intensidade naqueles locais onde os teores no solo eram originalmente maiores (Tabela 6.1) e, ao final do ciclo do arroz, se aproximaram. Os teores desse elemento na lâmina de água (Figura 6.2a) seguiram a mesma tendência do ocorrido na solução do solo (Figura 6.1), indicando que existe uma relação de equilíbrio, regulada pela interface entre a superfície do solo e a lâmina de água. A incidência regular de chuvas ao longo do período de estudo, principalmente nos meses de dezembro de 2008 e janeiro e fevereiro de 2009, quando as precipitações foram acima da média (Tabela 6.2), deve ter ocasionado a diminuição, por efeito de diluição, do sódio contido na água de irrigação, com exceção do verificado na Cavalhada (Figura 6.2b).

A ação física das raízes aumenta a permeabilidade e a condutividade hidráulica do solo, facilitando a lixiviação de sódio, o que, somado à absorção desse íon pelo arroz, pode ter contribuído para essa diminuição ao longo do ciclo do arroz (McNeal et al., 1966), uma vez que pode ocorrer substituição parcial de K por Na nos sítios de absorção das raízes do arroz (Castilhos et al., 1999). Adicionalmente, a alta atividade biológica nas raízes eleva a concentração de CO_2 na rizosfera e, juntamente com a solubilização de carbonatos nativos do solo, pode ter deslocado parte do Na^+ presente nos sítios de troca, facilitando a sua saída da camada sob influência da rizosfera (Chhabra & Abrol, 1977). Devido ao seu alto raio iônico hidratado, o Na é o cátion mais facilmente carregado com o fluxo de água.

A diferença entre os teores de Na na solução do solo aos 7 DAA e 77 DAA foi similar em Casamento, Cavalhada e Banhado (Tabela 6.4). A absorção desse íon, entretanto, foi bastante diferenciada nesses três locais, sendo superior

5 cm: $\hat{y} = 0,4073 - 0,0049^{***}x + 0,0000219^{***}x^2$ ($R^2 = 0,94$)
 10 cm: $\hat{y} = 0,5776 - 0,0081^{***}x + 0,0000542^{***}x^2$ ($R^2 = 0,74$)
 20 cm: $\hat{y} = 1,0093 - 0,0135^{***}x + 0,0000862^{***}x^2$ ($R^2 = 0,75$)
 40 cm: $\hat{y} = 0,8098 + 0,0114^{**}x - 0,0000349^{**}x^2$ ($R^2 = 0,52$)

5 cm: $\hat{y} = 0,5384 - 0,0102^{***}x + 0,0000818^{***}x^2$ ($R^2 = 0,87$)
 10 cm: $\hat{y} = 0,7520 - 0,0093^{***}x + 0,0000497^{***}x^2$ ($R^2 = 0,88$)
 20 cm: $\hat{y} = 1,3655 - 0,0046^{**}x - 0,00000939^{**}x^2$ ($R^2 = 0,50$)
 40 cm: $\hat{y} = y = 1,413$



5 cm: $\hat{y} = 0,9793 + 0,0526^{**}x - 0,0013^{**}x^2 + 0,0000057^{**}x^3$ ($R^2 = 0,66$)
 10 cm: $\hat{y} = 4,459 - 0,0645^{***}x + 0,005^{***}x^2$ ($R^2 = 0,79$)
 20 cm: $\hat{y} = 4,8621 - 0,0538^*x + 0,0019^*x^2 - 0,0000144^*x^3$ ($R^2 = 0,54$)
 40 cm: $\hat{y} = 3,889 + 0,0277^{**}x - 0,0001^{**}x^2$ ($R^2 = 0,48$)

5 cm: $\hat{y} = 6,047 - 0,0856^{***}x + 0,0005^{***}x^2$ ($R^2 = 0,77$)
 10 cm: $\hat{y} = 11,407 - 0,1324^{***}x + 0,0008^{***}x^2$ ($R^2 = 0,84$)
 20 cm: $\hat{y} = 9,24 - 0,1047^*x + 0,0008^*x^2$ ($R^2 = 0,41$)
 40 cm: $\hat{y} = 8,782 - 0,1058^{**}x + 0,0007^{**}x^2$ ($R^2 = 0,50$)

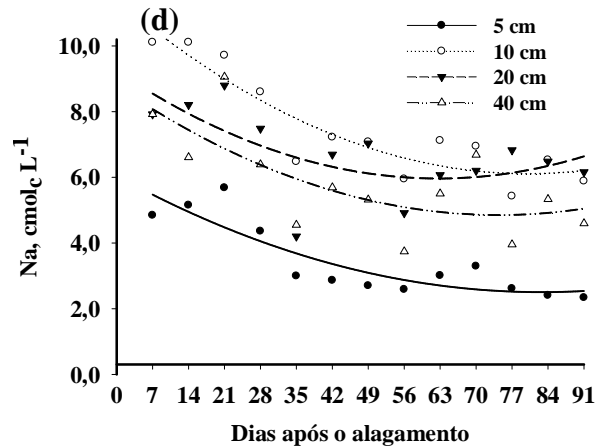
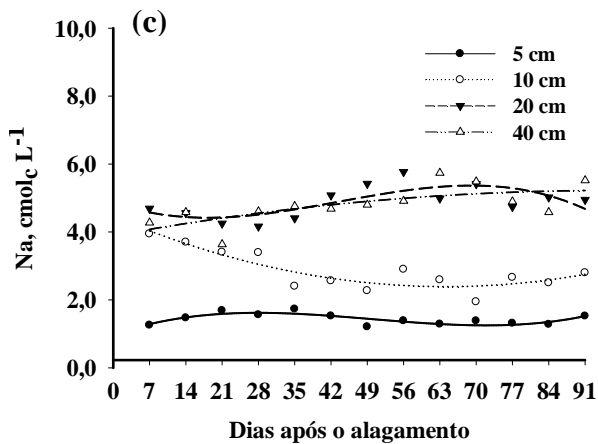


Figura 6.1. Evolução dos teores de sódio na solução do solo nas diferentes profundidades e níveis de salinidade: baixa - Casamento (a), média - Cavahada (b), alta - Banhado (c), muito alta - Sinval (d). *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.

no Banhado (Tabela 6.4). A menor absorção na Cavahada pode ser explicada, em parte, pela menor produção de massa seca no florescimento pleno nesse local. Apesar dessa absorção discrepante, a diferença entre o saldo iônico e a absorção de nutrientes foi positiva e semelhante, indicando que, nesses três locais, foram perdidos por lixiviação entre 55 e 68 mg L⁻¹ de sódio, isso sem

contabilizar possíveis contribuições da fração não trocável à solução do solo. Já no Sinval, esse valor chegou a 520 mg L^{-1} . A maior lixiviação nesse local pode ter sido estimulada tanto pela baixa absorção de Na (Tabela 6.4), em função do baixo estande e produção de massa seca (Tabela 6.3), quanto pela alta salinidade do solo (Tabela 6.1).

Casamento: $\hat{y} = 0,1141 + 0,00135^{**}x + 0,00001^{**}x^2$ ($R^2 = 0,49$)
 Cavalhada: $\hat{y} = y = 0,1384$
 Banhado: $\hat{y} = 0,3082 + 0,0011^{***}x - 0,0000387^{***}x^2$ ($R^2 = 0,76$)
 Sinval: $\hat{y} = 0,6276 - 0,0066^{**}x + 0,00001316^{**}x^2$ ($R^2 = 0,57$)

Casamento: $\hat{y} = y = 0,09 - 0,0004^*x - 0,0000002^*x^2$ ($R^2 = 0,45$)
 Cavalhada: $\hat{y} = y = 0,141$
 Banhado: $\hat{y} = 0,2365 - 0,0032^{**}x + 0,0000225^{**}x^2$ ($R^2 = 0,50$)
 Sinval: $\hat{y} = 0,2638 - 0,0044^{**}x + 0,0000374^{**}x^2$ ($R^2 = 0,84$)

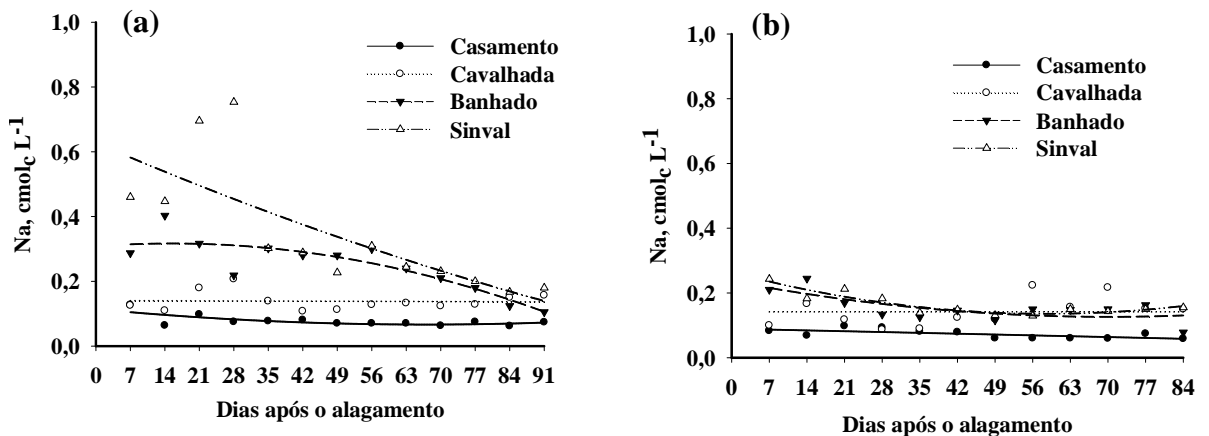


Figura 6.2. Evolução dos teores de sódio na lâmina de água (a) e na água de irrigação (b), nos diferentes locais. * , ** , ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.

Na profundidade de 40 cm, o teor de Na na solução não apresentou uma dinâmica padrão entre os locais avaliados, pois, ao longo do cultivo, foi aumentando no Casamento (Figura 6.1a) e no Banhado (Figura 6.1c) e diminuindo no Sinval (Figura 6.1d). No caso do Casamento e Banhado, o aumento dos teores em camadas mais profundas no solo pode ser devido à ascensão da frente salina ou à lixiviação do Na (Tabela 6.4), proveniente dos horizontes mais superficiais. Já no maior nível de salinidade, a diminuição nos teores de Na em todas as profundidades avaliadas pode ser devido à lixiviação desse íon às camadas mais profundas, o que pode ocorrer caso a camada impermeável, característica de planossolos, esteja localizada em maior profundidade.

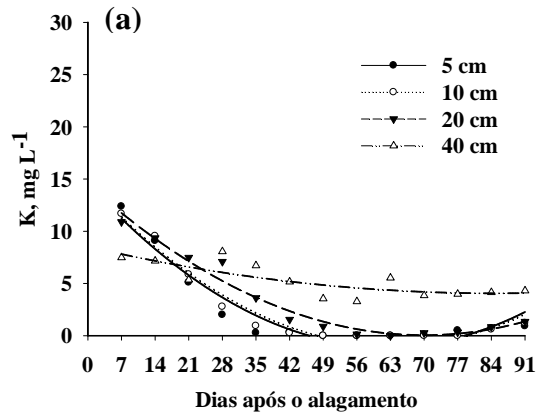
Tabela 6.4. Concentração iônica na solução do solo, absorção de cátions no florescimento pleno e diferença entre a concentração na solução e absorção iônica do arroz irrigado, cultivado em solos com diferentes níveis de salinidade. Mostardas, RS, safra 2008/2009

Local	PST ⁽¹⁾ %	Sol [7 DAA - 77 DAA] ⁽²⁾ mg L ⁻¹	Absorção mg dm ⁻²	Δ ⁽³⁾ mg L ⁻¹
.....Na.....				
Casamento	5,6	70,4	5,43	65,0
Cavahada	9,0	69,9	1,78	68,1
Banhado	21,0	64,4	9,32	55,1
Sinval	32,0	524	3,25	520
.....K.....				
Casamento	5,6	11,2	343	-331
Cavahada	9,0	22,8	247	-225
Banhado	21,0	64,8	239	-174
Sinval	32,0	43,5	74,2	-30,7
.....Ca+Mg.....				
Casamento	5,6	27,8	102	-74,0
Cavahada	9,0	28,7	59,2	-30,5
Banhado	21,0	442	55,9	386
Sinval	32,0	399	16,5	383

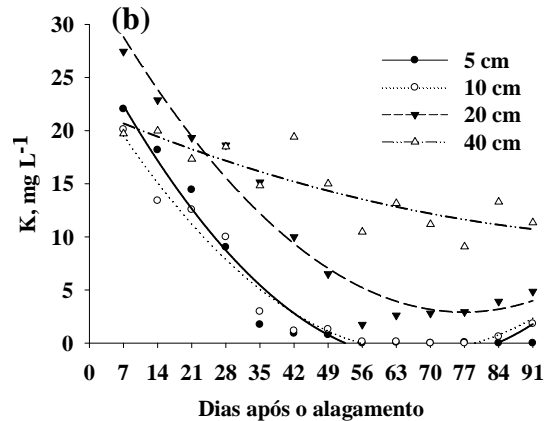
⁽¹⁾ Percentagem de sódio trocável. ⁽²⁾ Saldo iônico na solução do solo pela diferença de concentração medida aos sete dias após o alagamento e aos 77 dias após o alagamento. ⁽³⁾ Diferença entre o saldo iônico na solução do solo e a absorção iônica pelas plantas.

Como não foi adicionado adubo potássico ao solo, os teores iniciais (aos 7 DAA) desse nutriente na solução do solo (Figura 6.3) devem resultar do equilíbrio entre os cátions do solo (Tabela 6.1), uma vez que as plantas ainda eram pouco desenvolvidas. Nesta situação, os teores de K na solução do solo, nos diferentes locais e profundidades, se relacionam com os teores de Na que, por ação de massa, deslocam os íons de K dos pontos de troca. Entretanto, ao longo do ciclo do arroz, os teores de K na solução do solo (Figura 6.3) diminuíram em todos os locais e profundidades. Os teores de K na lâmina de água (Figura 6.4a) seguiram a mesma tendência da dinâmica nas camadas de 5 a 20 cm, no Casamento, na Cavahada e no Banhado (Figura 6.3a-c), diminuindo ao longo do estágio vegetativo e parte do reprodutivo e aumentando a partir de 70 DAA. Esse aumento não pode ser atribuído à contribuição de K via água de irrigação, já que esta atingiu os menores valores justamente no final do ciclo da cultura (Figura 6.4b). O K, por não participar da estrutura dos compostos orgânicos (Marschner, 1995), é rapidamente reciclado a partir da senescência das folhas. Costa et al.

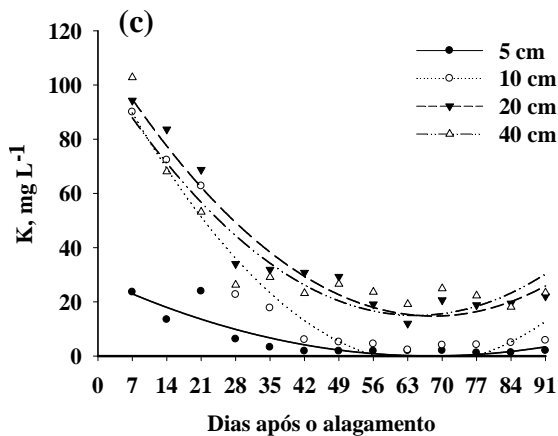
5 cm: $\hat{y} = 14,516 - 0,4999^{***}x + 0,0040^{***}x^2$ ($R^2 = 0,93$)
 10 cm: $\hat{y} = 14,6098 - 0,4906^{***}x + 0,0039^{***}x^2$ ($R^2 = 0,96$)
 20 cm: $\hat{y} = 14,4941 - 0,4132^{***}x + 0,0030^{***}x^2$ ($R^2 = 0,97$)
 40 cm: $\hat{y} = 8,512 - 0,1054^{***}x + 0,0006^{***}x^2$ ($R^2 = 0,62$)



5 cm: $\hat{y} = 28,143 - 0,8721^{***}x + 0,0064^{***}x^2$ ($R^2 = 0,96$)
 10 cm: $\hat{y} = 24,501 - 0,7498^{***}x + 0,0056^{***}x^2$ ($R^2 = 0,97$)
 20 cm: $\hat{y} = 34,285 - 0,8169^{***}x + 0,0053^{***}x^2$ ($R^2 = 0,96$)
 40 cm: $\hat{y} = 21,997 - 0,1943^{***}x + 0,0008^{***}x^2$ ($R^2 = 0,74$)



5 cm: $\hat{y} = 28,532 - 0,8413^{***}x + 0,0062^{***}x^2$ ($R^2 = 0,80$)
 10 cm: $\hat{y} = 112,605 - 3,459^{***}x + 0,0260^{***}x^2$ ($R^2 = 0,95$)
 20 cm: $\hat{y} = 114,170 - 2,9161^{***}x + 0,0214^{***}x^2$ ($R^2 = 0,95$)
 40 cm: $\hat{y} = 106,694 - 2,8397^{***}x + 0,0220^{***}x^2$ ($R^2 = 0,88$)



5 cm: $\hat{y} = 66,3048 - 1,5477^{***}x + 0,0107^{***}x^2$ ($R^2 = 0,84$)
 10 cm: $\hat{y} = 81,1470 - 0,9448^{***}x + 0,0044^{***}x^2$ ($R^2 = 0,83$)
 20 cm: $\hat{y} = 71,6513 - 0,8825^{***}x + 0,0057^{***}x^2$ ($R^2 = 0,64$)
 40 cm: $\hat{y} = 46,6296 - 0,3478^{***}x + 0,0014^{***}x^2$ ($R^2 = 0,65$)

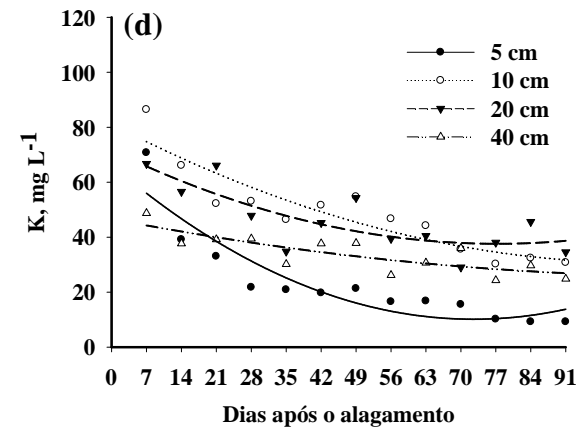


Figura 6.3. Evolução dos teores de potássio na solução do solo nas diferentes profundidades e níveis de salinidade: baixa - Casamento (a), média - Cavahada (b), alta - Banhado (c), muito alta - Sinval (d). *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.

(2009) observaram acúmulo de K nas proximidades da planta de milho e diminuição com o afastamento da linha de semeadura, comportamento conhecido como “lavagem de K” (Klepker & Anghinoni, 1995). Dessa forma, o elemento pode ter escorrido dos tecidos vegetais do arroz, sendo depositado na lâmina de água. Isso pode ser comprovado pela dinâmica desse nutriente no local com maior salinidade (Sinval – Figura 6.4a), onde ocorreu desenvolvimento muito pequeno das plantas (Tabela 6.3). Nesse caso, houve discreto aumento do teor de K na

lâmina a partir de 84 DAA (Figura 6.4a). O aumento nos teores de K na lâmina pode ser atribuído também ao aumento dos teores na solução no final do ciclo (Figura 6.3), já que há uma relação de equilíbrio entre a lâmina e a solução do solo.

Casamento: $\hat{y} = 6,3683 - 0,1647^{***}x + 0,00131^{***}x^2$ ($R^2 = 0,57$)
 Cavalhada: $\hat{y} = 9,3036 - 0,3092^{***}x + 0,0028^{***}x^2$ ($R^2 = 0,96$)
 Banhado: $\hat{y} = 10,580 - 0,3628^{***}x + 0,0034^{***}x^2$ ($R^2 = 0,76$)
 Sinval: $\hat{y} = 20,483 - 0,5357^{***}x + 0,0037^{***}x^2$ ($R^2 = 0,87$)

Casamento: $\hat{y} = 5,844 - 0,1156^{**}x + 0,0008^{***}x^2$ ($R^2 = 0,60$)
 Cavalhada: $\hat{y} = 6,8616 - 0,0822^{***}x + 0,0003^{***}x^2$ ($R^2 = 0,85$)
 Banhado: $\hat{y} = 7,942 - 0,1556^{***}x + 0,0009^{***}x^2$ ($R^2 = 0,89$)
 Sinval: $\hat{y} = 8,605 - 0,1711^{***}x + 0,0011^{***}x^2$ ($R^2 = 0,85$)

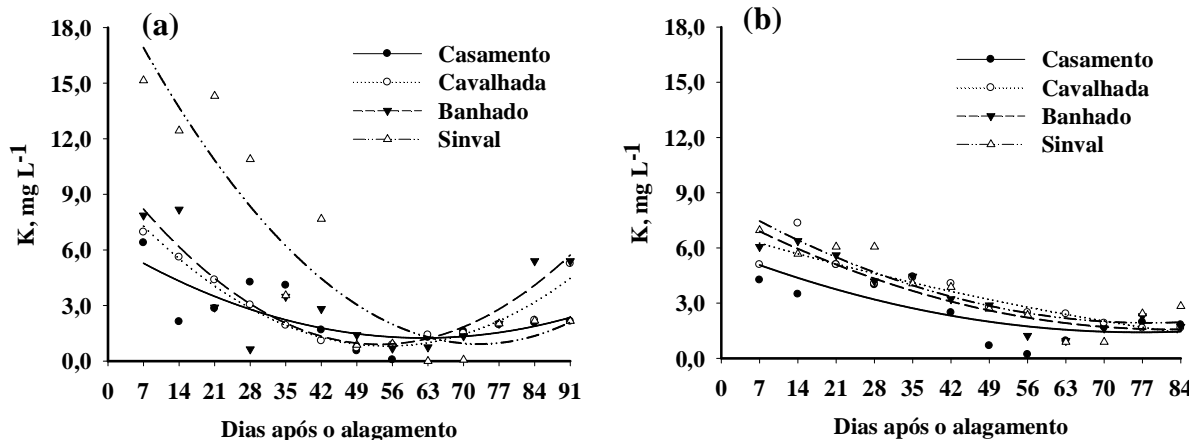


Figura 6.4. Evolução dos teores de potássio na lâmina de água (a) e na água de irrigação (b), nos diferentes locais. *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.

Era, entretanto, esperado um aumento dos teores de K na solução do solo nas primeiras semanas, já que, após o alagamento, ocorre o rápido consumo de oxigênio do solo e os microorganismos anaeróbios passam a utilizar compostos oxidados do solo, como receptores de elétrons, dentre eles nitrato e óxidos de ferro e manganês (Ponnamperuma, 1972). Modificar-se-ia, dessa forma, a composição da solução do solo, que passaria a ter aumentados os teores de Fe^{2+} , Mn^{2+} e NH_4^+ , que deslocariam outros cátions para a solução, como o K (DeDatta, 1983), aumentando a sua disponibilidade para as plantas e as perdas por lixiviação. Essas perdas são significativamente maiores quando da irrigação contínua das lavouras de arroz (Santos et al., 2002). A presença das plantas, entretanto, parece ter impedido a ocorrência desse fenômeno, uma vez que a depleção do K foi mais acentuada na profundidade de 20 cm e já iniciou-se a partir da segunda amostragem, aos 14 DAA (Figura 6.3). Semelhantes resultados foram

observados por Silva et al. (2003), cujos estudos foram feitos em ambiente fechado, com um Planossolo e um Gleissolo com e sem a presença de plantas. Esses autores constataram a diminuição dos teores de K na camada de 0 – 10 cm por efeito da absorção radicular.

O ápice da depleção de K na solução do solo, independentemente do seu teor original no solo, que foi bastante variável (Tabela 6.1), ocorreu entre 49 DAA e 84 DAA, quando passou a haver discreto aumento nos teores (Figura 6.3). Os valores mínimos, nessa ocasião, chegaram a ser nulos por várias semanas na camada de maior crescimento radicular (0-10 cm), no Casamento (Figura 6.3a), na Cavalhada (Figura 6.3b) e no Banhado (Figura 6.3c), onde o estabelecimento do arroz não foi tão seriamente afetado (Tabela 6.3).

A diferença entre o saldo de K entre 7 DAA e 77 DAA e a absorção de K pelas plantas foi negativa nos quatro locais (Tabela 6.4), indicando que houve contribuição de formas não-trocáveis de K para a nutrição das plantas, principalmente naqueles locais (Casamento, Cavalhada e Banhado) onde houve maior desenvolvimento (Tabela 6.3). Mesmo com um estande muito baixo, a absorção de K no Sinval também foi suficiente para determinar uma contribuição de formas não trocáveis (Tabela 6.4). As plantas superiores possuem mecanismos extremamente eficientes na absorção de K, mesmo em baixas concentrações na solução do solo (Gommers et al., 2005). Isso gera um gradiente em direção às raízes, criando um ambiente favorável à liberação de formas não trocáveis de K, ocasionando um permanente tamponamento das formas de K trocáveis e não trocáveis, adsorvidas tanto com baixa quanto com alta energia de ligação, presentes nas entrecamadas dos argilominerais, ou em minerais primários (Kaminski et al., 2007). Castilhos & Meurer (2002) e Fraga et al. (2009), cultivando arroz em vasos com diferentes tipos de solo, demonstraram a contribuição de formas não trocáveis de K na nutrição das plantas. A passagem do K trocável para a forma não trocável pode ser rápida (Rosolem et al., 2006), especialmente em situações em que a concentração desse nutriente na solução do solo é muito baixa. No entanto, o ápice de absorção do K pelo arroz irrigado ocorre a partir da diferenciação do primórdio floral, ou seja, cerca de 35 a 40 dias após o início do alagamento em cultivares de ciclo precoce, e cai dramaticamente, após o

florescimento pleno das plantas (Lopes et al., 1994). Dessa forma, era de se esperar, no presente estudo, que os teores de K na solução do solo aumentassem já a partir de 77 DAA, quando a avidéz das plantas por nutrientes diminui, o que só ocorreu a partir de 84 DAA, período que coincide com a fase de senescência das folhas de arroz (Ookawa et al., 2003) e com a ocorrência de chuvas (Tabela 6.2), que possibilitaram a “lavagem” das folhas.

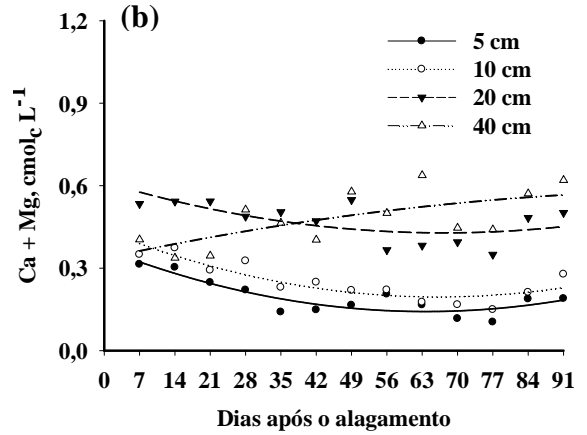
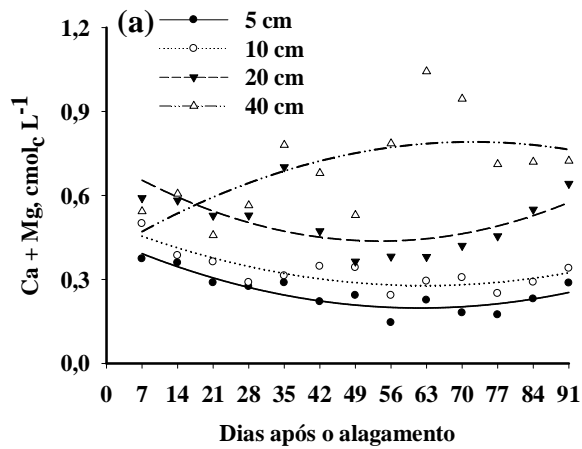
Os valores negativos para a diferença entre o saldo de K na solução na camada até 20 cm e a absorção de K pelas plantas, dificultam a lixiviação desse elemento nos solos estudados, ao contrário do que foi verificado com o Na (Tabela 6.4). Entretanto, a diminuição da concentração de K em todos os locais, na profundidade de 40 cm (Figura 6.3), fora, portanto, do alcance da maioria das raízes, permite supor que pode ter havido lixiviação de K. Dão suporte a essa afirmação os dados de Beltrame et al. (1991), que verificaram perdas acumuladas de $65,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de K na camada de 20 a 30 cm num período de 63 dias após o alagamento, em Planossolo Hidromórfico com características semelhantes às do solo em estudo.

Os teores iniciais de Ca+Mg na solução do solo (Figura 6.5), a exemplo do K (Figura 6.3), decorrem das relações de equilíbrio entre os cátions, especialmente da ação de Na, o principal determinante do grau de salinidade dos solos utilizados (Tabela 6.1). O mesmo ocorreu com os seus teores ao longo do ciclo da cultura, havendo o decréscimo na solução do solo em todos os locais, especialmente na camada de solo sob influência das raízes, até 20 cm, registrando-se leve aumento ao final do ciclo da cultura nos dois locais com menor salinidade: Casamento (Figura 6.5a) e Cavalhada (Figura 6.5b). Esses efeitos também foram observados na lâmina de água (Figura 6.6a) e, também, não estão relacionados com a água de irrigação (Figura 6.6b), cujos teores desses nutrientes foram similarmente baixos e pouco alterados ao longo do ciclo do arroz.

Nos dois locais de menor salinidade (Casamento e Cavalhada), observou-se também aumento nos teores de Ca+Mg na solução do solo na profundidade de 40 cm (Figura 6.5a,b). Isso pode ter ocorrido pelo efeito de lixiviação proveniente das camadas superiores, ou devido à dessorção desses

5 cm: $\hat{y} = 0,4451 - 0,0080^{***}x + 0,0000649^{***}x^2$ ($R^2 = 0,80$)
 10 cm: $\hat{y} = 0,5018 - 0,0072^{***}x + 0,0000572^{***}x^2$ ($R^2 = 0,71$)
 20 cm: $\hat{y} = 0,7246 - 0,0107^*x + 0,0000996^*x^2$ ($R^2 = 0,41$)
 40 cm: $\hat{y} = 0,3981 + 0,0109^*x - 0,0000759^*x^2$ ($R^2 = 0,41$)

5 cm: $\hat{y} = 0,3702 - 0,0072^{***}x + 0,0000562^{***}x^2$ ($R^2 = 0,78$)
 10 cm: $\hat{y} = 0,4374 - 0,0073^{***}x + 0,0000553^{***}x^2$ ($R^2 = 0,79$)
 20 cm: $\hat{y} = 0,6129 - 0,0055^*x + 0,0000409^*x^2$ ($R^2 = 0,45$)
 40 cm: $\hat{y} = 0,3355 + 0,0040^{**}x - 0,0000158^{**}x^2$ ($R^2 = 0,46$)



5 cm: $\hat{y} = 1,0240 - 0,0145^{***}x + 0,0001^{**}x^2$ ($R^2 = 0,55$)
 10 cm: $\hat{y} = 5,4359 - 0,1315^{***}x + 0,0009^{***}x^2$ ($R^2 = 0,92$)
 20 cm: $\hat{y} = 7,5287 - 0,1141^{***}x + 0,0005^{***}x^2$ ($R^2 = 0,91$)
 40 cm: $\hat{y} = 5,1386 - 0,0585^{***}x + 0,0002^{***}x^2$ ($R^2 = 0,72$)

5 cm: $\hat{y} = 5,1826 - 0,0855^{**}x + 0,0005^{**}x^2$ ($R^2 = 0,52$)
 10 cm: $\hat{y} = 6,6304 - 0,0607^{***}x + 0,0000899^{***}x^2$ ($R^2 = 0,89$)
 20 cm: $\hat{y} = 5,8127 - 0,1000^{***}x + 0,0007^{***}x^2$ ($R^2 = 0,82$)
 40 cm: $\hat{y} = 5,0759 - 0,0796^{***}x + 0,0004^{***}x^2$ ($R^2 = 0,81$)

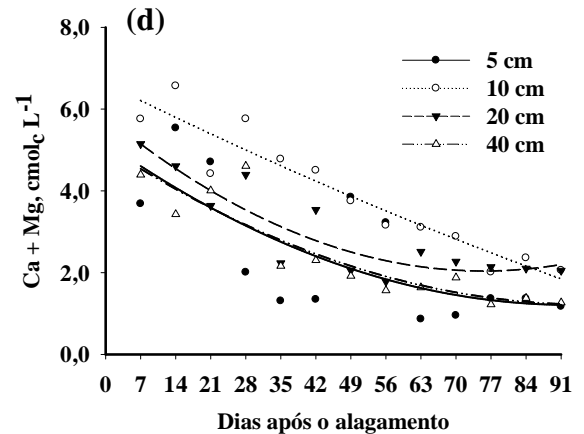
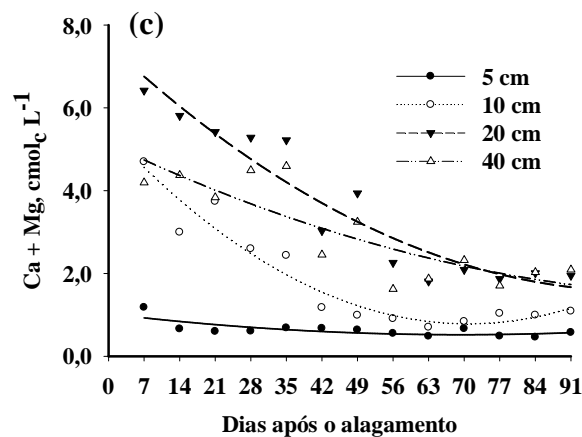


Figura 6.5. Evolução dos teores de cálcio + magnésio na solução do solo nas diferentes profundidades e níveis de salinidade: baixa - Casamento (a), média - Cavalhada (b), alta - Banhado (c), muito alta - Sinval (d). *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.

íons, em função da substituição, dos sítios de troca, pelo Fe^{2+} e Mn^{2+} , em decorrência das reações de oxi-redução causadas pelo alagamento (DeDatta, 1983). O aumento da concentração de Ca e Mg na solução de solos alagados parece ter sido a causa dos valores negativos verificados para a diferença entre o saldo de Ca+Mg na solução do solo e a absorção desses elementos pelas plantas na Cavalhada e, principalmente, no Casamento, onde houve absorção muito superior à dos demais locais (Tabela 6.4).

Casamento: $\hat{y} = 0,1533 - 0,0032^{**}x + 0,0000316^{**}x^2$ ($R^2 = 0,49$)
 Cavalhada: $\hat{y} = 0,1476 - 0,0008^{**}x + 0,00000459^{**}x^2$ ($R^2 = 0,54$)
 Banhado: $\hat{y} = 0,2629 - 0,0043^{**}x + 0,0000266^{**}x^2$ ($R^2 = 0,56$)
 Sinval: $\hat{y} = 0,3250 - 0,0028^{**}x - 0,00000122^{**}x^2$ ($R^2 = 0,78$)

Casamento: $\hat{y} = 0,1443 - 0,0028^*x + 0,0000249^*x^2$ ($R^2 = 0,48$)
 Cavalhada: $\hat{y} = 0,1280 + 0,008^{***}x - 0,0000197^{***}x^2$ ($R^2 = 0,65$)
 Banhado: $\hat{y} = 0,2266 - 0,0038^{***}x + 0,0000260^{***}x^2$ ($R^2 = 0,87$)
 Sinval: $\hat{y} = 0,2060 - 0,0023^{***}x + 0,00000781^{***}x^2$ ($R^2 = 0,86$)

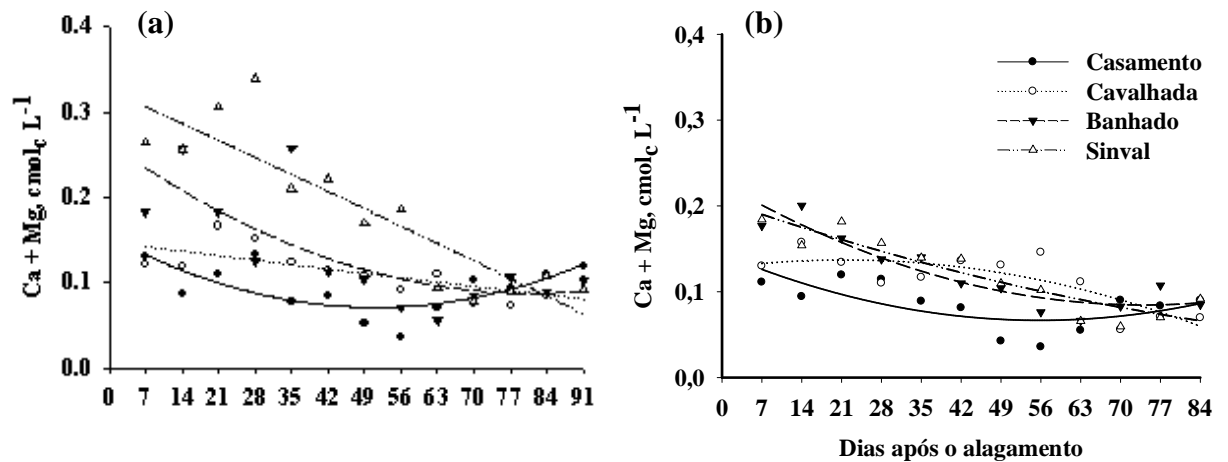


Figura 6.6. Evolução dos teores de cálcio + magnésio na lâmina de água (a) e na água de irrigação (b), nos diferentes locais. *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.

Em trabalho realizado com Planossolos submetidos ao alagamento sem a presença de plantas de arroz, Sousa et al. (2002) verificaram aumento dos teores de Ca e Mg na solução do solo até 35 DAA e posterior diminuição até a estabilidade. Resultado semelhante foi obtido por Silva et al. (2003), com e sem a presença de plantas. Entretanto, ambos os estudos foram realizados em vasos, o que impediu um fluxo hidráulico descendente que pudesse carrear esses elementos em profundidade, como foi verificado por Santos et al. (2002), a campo, na profundidade de 60 cm. Dessa forma, pode-se inferir que a depleção de Ca e Mg (Figura 6.5) foi devida principalmente à lixiviação, já que as maiores perdas se deram nos dois locais de maior salinidade (Figura 6.5c,d). Os valores positivos e semelhantes da diferença entre o saldo de Ca+Mg na solução e a absorção pelas plantas, observados no Banhado e Sinval, comprovam uma significativa perda de Ca+Mg por lixiviação. Isto em decorrência, principalmente, dos altos teores desses elementos na solução do solo, nos primeiros dias de alagamento (Figura 6.5c,d). Por não serem tão exigidos pela cultura do arroz, a depleção de ambos (Ca e Mg) na solução do solo não chegou ao nível verificado com o K, que praticamente desapareceu da solução do solo em alguns casos (Figura 6.3a-c).

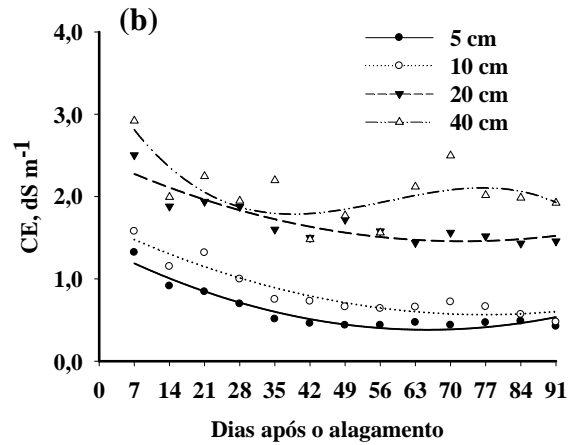
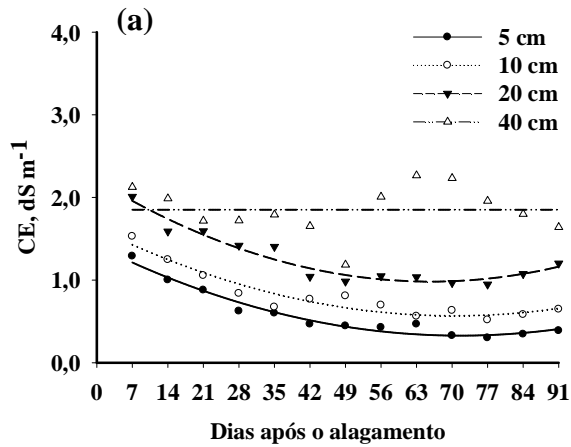
A condutividade elétrica (CE) da solução do solo, por ser determinada pela concentração iônica, especialmente de sódio, seguiu tendência semelhante à dos íons básicos. Ela aumentou com o nível de salinidade dos solos (Tabela 6.1) e diminuiu ao longo do ciclo do arroz em todos os locais, nas camadas de solo de 0 – 20 cm (Figura 6.7). Aos 40 cm de profundidade, verificou-se diminuição da CE na solução do solo na Cavalhada e Sinval (Figura 6.7b,d) e constância no Casamento e no Banhado (Figura 6.7a,c). A exemplo dos cátions básicos, a CE da lâmina de água (Figura 6.8a) esteve relacionada com a CE da solução do solo, decrescendo ao longo do ciclo da cultura, proporcionalmente ao nível de salinidade do solo, porém não relacionada à CE da água de irrigação (Figura 6.8b). A pequena diminuição da CE, em dois locais (Banhado e Sinval) deve-se, provavelmente ao efeito de diluição pela incidência regular das chuvas (Tabela 6.2), anteriormente comentada.

A CE é uma variável utilizada para o monitoramento da salinidade do solo, pela praticidade na medição e alta correlação com o teor de sais solúveis, uma vez que representa o fenômeno de transferência de eletricidade exercido pelas partículas carregadas, solutos iônicos (cátions e ânions) e colóides, sobre uma força aplicada em um campo elétrico. Em geral, a CE dos solos aumenta após a inundação, atingindo um máximo e decrescendo para valores estáveis (Ponnamperuma, 1972). Isso, entretanto, não foi verificado no presente estudo, o que deve ser reflexo da dinâmica dos cátions avaliados (Figuras 6.1, 6.3 e 6.5), que, de modo geral, demonstrou haver menores teores na camada superficial do solo. A diminuição mais significativa da CE ocorreu no solo com maior salinidade (Sinval - Figura 6.7d), à semelhança do que ocorreu com os teores de Na (Figura 6.6.1d), mantendo-se, no entanto, em patamares acima de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, considerados como prejudiciais ao cultivo do arroz (Ayers & Westcot, 1985), em todas as profundidades.

A mobilização de íons que ocorre durante as primeiras semanas de alagamento determina aumento da CE, que é variável conforme o tipo de solo. Em solos de maior CTC, esse processo tende a ser mais estimulado. Boivin et al. (2002), por exemplo, verificaram aumento da CE de $0,3$ a $1,2 \text{ dS m}^{-1}$, ao longo do

5 cm: $\hat{y} = 1,4148 - 0,0304^{***}x + 0,0002^{***}x^2$ ($R^2 = 0,96$)
 10 cm: $\hat{y} = 1,6284 - 0,0301^{***}x + 0,0002^{***}x^2$ ($R^2 = 0,92$)
 20 cm: $\hat{y} = 2,2046 - 0,0372^{***}x + 0,0003^{***}x^2$ ($R^2 = 0,94$)
 40 cm: $\hat{y} = \bar{y} = 1,852$

5 cm: $\hat{y} = 1,393 - 0,0309^{***}x + 0,0002^{***}x^2$ ($R^2 = 0,93$)
 10 cm: $\hat{y} = 1,668 - 0,0287^{***}x + 0,0002^{***}x^2$ ($R^2 = 0,89$)
 20 cm: $\hat{y} = 2,459 - 0,0277^{***}x + 0,0002^{***}x^2$ ($R^2 = 0,82$)
 40 cm: $\hat{y} = 3,441 - 0,1033^{**}x + 0,0020^{*}x^2 - 0,0000117^{*}x^3$
 ($R^2 = 0,54$)



5 cm: $\hat{y} = 2,469 - 0,0181^{*}x + 0,0001^{*}x^2$ ($R^2 = 0,44$)
 10 cm: $\hat{y} = 4,836 - 0,0568^{***}x + 0,0004^{***}x^2$ ($R^2 = 0,66$)
 20 cm: $\hat{y} = 7,064 - 0,0436^{***}x + 0,0003^{***}x^2$ ($R^2 = 0,77$)
 40 cm: $\hat{y} = \bar{y} = 5,563$

5 cm: $\hat{y} = 9,446 - 0,1530^{***}x + 0,0009^{***}x^2$ ($R^2 = 0,96$)
 10 cm: $\hat{y} = 14,381 - 0,1960^{***}x + 0,0011^{***}x^2$ ($R^2 = 0,95$)
 20 cm: $\hat{y} = 12,621 - 0,1775^{***}x + 0,0012^{***}x^2$ ($R^2 = 0,87$)
 40 cm: $\hat{y} = 11,072 - 0,1590^{***}x + 0,0011^{***}x^2$ ($R^2 = 0,84$)

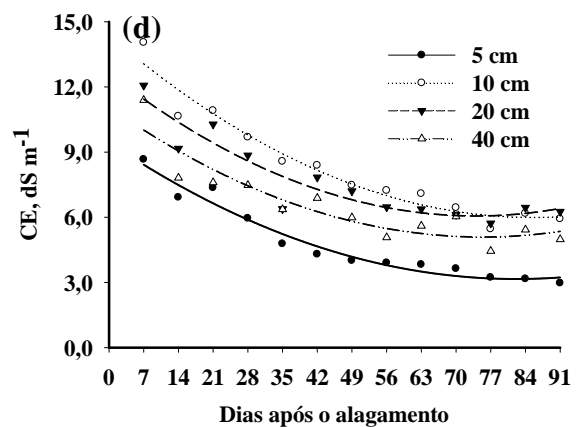
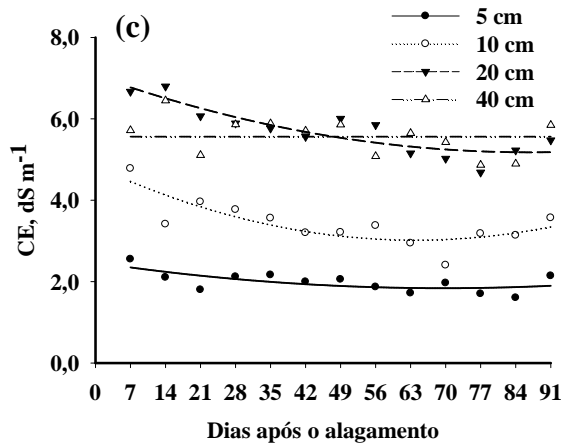


Figura 6.7. Evolução da condutividade elétrica (CE) da solução do solo nas diferentes profundidades e níveis de salinidade: baixa - Casamento (a), média - Cavahada (b), alta - Banhado (c), muito alta - Sinval (d). *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.

ciclo do arroz em Vertissolo, mais rico em cátions em relação ao Planossolo utilizado no presente trabalho. Entretanto, o trabalho desses autores foi efetuado numa região africana, caracterizada por balanço hídrico anual negativo (2.000 mm), com precipitações médias ao longo do período de 280 mm, distribuídas no período das chuvas (julho – outubro). O cultivo de arroz, no período de escassez de precipitações, não permite a diluição dos sais contidos na lâmina de água e na

solução do solo. Essa característica climática é antagônica à verificada no local do experimento, no município de Mostardas, onde houve distribuição uniforme de chuvas durante a execução dos trabalhos (Tabela 6.2), o que favoreceu a diminuição da CE, tanto na lâmina de água (Figura 6.8a) quanto na água utilizada para irrigação (Figura 6.8b). Entretanto, em ambos os casos, os valores foram semelhantes aos do final do ciclo da cultura.

Casamento: $\hat{y} = 0,30 - 0,0034^{***}x + 0,0000188^{***}x^2$ ($R^2 = 0,74$)
 Cavalhada: $\hat{y} = \bar{y} = 0,318$
 Banhado: $\hat{y} = 0,8381 - 0,0133^{***}x + 0,0000727^{***}x^2$ ($R^2 = 0,74$)
 Sinval: $\hat{y} = 1,5969 - 0,0265^{***}x + 0,00001^{***}x^2$ ($R^2 = 0,82$)

Casamento: $\hat{y} = 0,1371 + 0,0093^{**}x - 0,0003^{**}x^2 + 0,00000183$ ($R^2 = 0,65$)
 Cavalhada: $\hat{y} = \bar{y} = 0,3048$
 Banhado: $\hat{y} = 0,5216 - 0,006^{***}x + 0,000027^{***}x^2$ ($R^2 = 0,85$)
 Sinval: $\hat{y} = 0,6507 - 0,0109^{***}x + 0,0000754^{***}x^2$ ($R^2 = 0,87$)

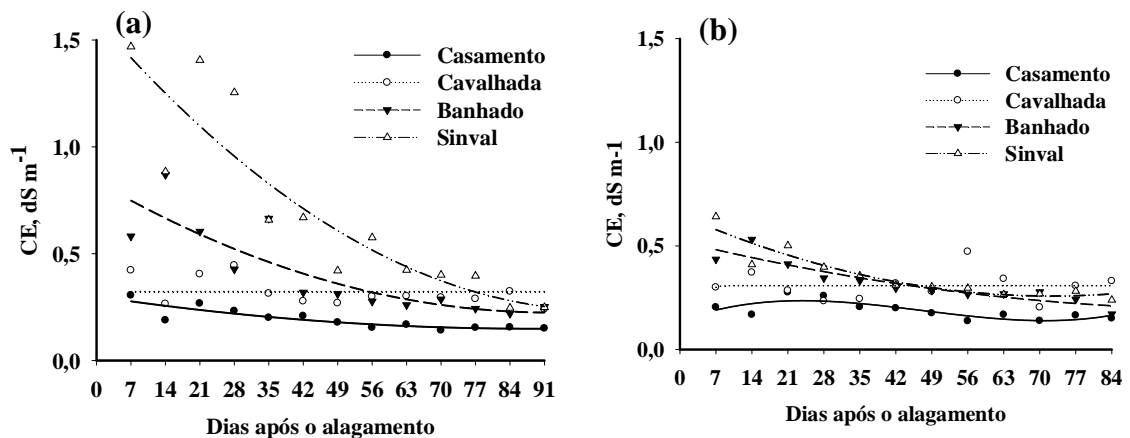


Figura 6.8. Evolução da condutividade elétrica (CE) da lâmina de água (a) e da água de irrigação (b), nos diferentes locais. *, **, ***: significativo a 10, 5 e 1%, pelo teste F, respectivamente. Mostardas, RS, safra 2008/2009.

Em trabalhos realizados em vasos, o fluxo de transpiração de água cria um gradiente hidráulico em direção às raízes, o que constitui o principal fator que governa a dinâmica da CE do solo, já que, com o desenvolvimento das plantas, ocorre maior acúmulo de íons na camada superficial do solo, por efeito da evapoconcentração. Isso se dá, normalmente, próximo à diferenciação do primórdio floral das plantas, período de maior absorção de nutrientes (Lopes et al., 1993). Schoenfeld et al. (2007) observaram, em diferentes tipos de solo, inclusive num planossolo, aumento acentuado da CE medida nas profundidades de 5 e 10 cm, aos 42 DAA, justamente em função do aumento da demanda transpiratória verificada nesse período. Dinâmica semelhante foi observada por Sousa et al. (2002), aos 35 DAA, para o K, o Ca e o Mg. Chhabra & Abrol (1977), também

cultivando arroz em vasos, porém permitindo a saída de percolados, verificaram drástica redução na salinidade de um solo altamente afetado por sais, como o que ocorreu a campo no presente estudo, demonstrando que a percolação de água e a lixiviação de sais, assim como a depleção de íons pela absorção radicular são, em magnitude, mais expressivas do que um possível efeito de concentração de nutrientes nas camadas mais superficiais do solo, em função da transpiração das plantas.

6.4. Conclusões

O cultivo de arroz irrigado contribuiu para a depleção dos teores dos cátions básicos Na, K, Ca e Mg e, por consequência, da condutividade elétrica da solução do solo na camada de exploração das raízes, independentemente da salinidade original do solo.

A lixiviação e a absorção radicular de cátions básicos, por serem mais importantes do que os efeitos da evapoconcentração de nutrientes, governam a dinâmica de cátions básicos na solução do solo na camada de exploração das raízes.

7. CAPÍTULO VI – VARIAÇÃO GENÉTICA DO ARROZ NA RESPOSTA A SALINIDADE DURANTE A EMERGÊNCIA

7.1. Introdução

Em regiões áridas e semi-áridas, um dos mais importantes estresses ambientais relacionados à emergência das plantas é a salinidade do solo (Demir et al., 2003). Solos de regiões costeiras, sujeitos à intrusão periódica de água salina, também estão aptos a apresentar teores excessivos de sais. A resposta do arroz ao estresse salino na germinação é um tema cada vez mais relevante, principalmente no continente asiático. A escassez crescente de mão de obra, de fundamental importância no sistema de plantio por transplante, faz com que os produtores de arroz migrem para os sistemas de semeadura em linha, ou convencional a lanço. Em ambos os casos, a semeadura se dá em solo seco, ao contrário do que ocorre no sistema de transplante de mudas. No Rio Grande do Sul, a semeadura em linha representa cerca de 90 % da área total cultivada com esse cereal no Estado (Oliveira, 2006), incluindo-se as planícies costeiras, onde se verificam os problemas relacionados à salinidade, tanto da água (Capítulo III), quanto do solo (Capítulo II). Nesse sentido, torna-se importante o conhecimento da resposta do arroz à salinidade na emergência.

Informações a respeito da variação genética na tolerância à salinidade na emergência são escassas. Esse subsídio é importante na decisão de se adotar qualquer sistema de semeadura em que as sementes sejam diretamente dispostas no solo. No entanto, os resultados da pesquisa em relação ao nível crítico de salinidade do solo, a partir do qual a emergência será afetada, são contrastantes. Segundo Akbar & Yabuno (1974), por exemplo, a salinidade atrasa o processo, mas não reduz significativamente a percentagem de sementes

germinadas. Khan et al. (1997), por outro lado, afirmam que o arroz é relativamente tolerante à salinidade na emergência, não sendo significativamente afetado em solos com condutividade elétrica de até $16,3 \text{ dS m}^{-1}$. Jagadev & Jena (1993) reportaram que o nível crítico de algumas cultivares é de 11 dS m^{-1} , indicando haver elevada variação genética do arroz na resposta a esse estresse.

Em um meio de cultivo onde o potencial osmótico é reduzido, as falhas na emergência podem estar relacionadas à ineficiência das sementes em absorver água (Mansour, 1994), ou ao efeito tóxico do excesso de sais (Leopold & Willing, 1984). Em estudo realizado com duas espécies de *Atriplex*, Katembe et al. (1998) afirmam que a emergência das plantas em potencial osmótico de $-1,0 \text{ MPa}$ foi retardado em meio de cultivo contendo NaCl, em comparação ao meio de cultivo de mesmo potencial osmótico, mas à base de solução iso-osmótica PEG (polietileno glicol), o que indica que pode haver combinação de fatores (osmótico e iônico) influenciando a emergência. Nesse sentido, a estabilidade de membranas seria um bom indicador do efeito deletério causado pelo NaCl. Em altas concentrações, o Na^+ pode substituir o Ca^{2+} da membrana plasmática, diminuindo a sua permeabilidade, o que ocasiona a liberação de eletrólitos, como o K^+ , para o meio externo (Cramer et al., 1985). Relativamente à salinidade, os íons que causam mais problemas às plantas são o Na^+ e o Cl^- , sendo normalmente os mais abundantes na água de irrigação (Asch et al., 2000). Nesse sentido, o processo físico de absorção de água leva à ativação de mecanismos metabólicos que se seguem à quebra de dormência após a hidratação. A emergência de sementes envolve a ativação de sistemas enzimáticos, assim como a mobilização de reservas nutricionais, sendo que esses processos são adversamente afetados pelo excesso de NaCl no solo (Levitt, 1980).

Este trabalho teve como objetivos estabelecer o nível crítico para a salinidade na emergência de diferentes variedades de arroz asiáticas, além de verificar a velocidade de emergência e os mecanismos fisiológicos associados à variação genética na resposta ao estresse salino.

7.2. Material e Métodos

O trabalho foi realizado nas dependências do Crop and Environmental Sciences Division, divisão de pesquisa do International Rice Research Institute – IRRI (Los Baños, Filipinas). Selecionaram-se variedades com diferentes origens e respostas à salinidade no período vegetativo da cultura: BR47 (Índia, tolerante), CSR36 (Bangladesh, tolerante), IR72046 (Filipinas, tolerante), FL478 (Filipinas, tolerante), Nona Bokra (Japão, tolerante) e IR29 (Filipinas, suscetível). Foram realizados dois estudos paralelamente: 1) determinação do nível crítico à salinidade na emergência e índice de velocidade de emergência de diferentes cultivares de arroz em meio salino e 2) avaliação da absorção de água e estabilidade de membranas das sementes desses materiais expostas à salinidade.

Para o estabelecimento do nível crítico dessas variedades à salinidade, foram semeadas, em placas de Petry, 10 sementes de cada cultivar. Nas placas, depositaram-se três camadas de papel toalha, para favorecer a embebição e emergência das sementes. Os níveis de salinidade estabelecidos foram obtidos a partir da adição de NaCl em água destilada e constaram de: zero (controle), 4, 8, 12, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 e 32 dS m⁻¹. Utilizaram-se três repetições por tratamento. Em cada nível de salinidade, adicionaram-se 15 mL de solução salina (apenas água destilada no controle) por placa de Petry. Para minimizar ao máximo a evaporação de água no interior das placas, as mesmas foram vedadas com fitas *tape*, suficientemente porosas para a entrada de oxigênio nos recipientes. Na sequência, as placas foram dispostas em incubadoras, cuja temperatura foi mantida em 28° C. Esse estudo constou de 234 placas de Petry (seis variedades x 13 níveis de salinidade x três repetições).

A emergência das sementes foi verificada a partir do segundo dia, diariamente até o décimo dia (ISTA, 1993), sendo que a última avaliação ocorreu no décimo quarto dia. Consideraram-se emergidas as sementes com coleóptilo emitido (Yoshida, 1981). A determinação do nível crítico de salinidade se deu a partir do número de sementes emergidas no décimo dia de avaliação. Isto porque, em condições reais de campo, a partir desse período, as sementes ficam mais suscetíveis ao ataque de patógenos de solo, o que constitui um fator a mais de

estresse às sementes, além da salinidade por si. Considerou-se como teor crítico o nível de salinidade que causou redução superior a 30% na emergência das sementes (Zhou et al., 2010) dos cultivares avaliados. Apresentaram-se os resultados referentes à emergência aos dois, cinco, 10 e 14 dias após a embebição.

A avaliação do índice de velocidade de emergência das diferentes variedades foi feita a partir da Equação 7.1, conforme metodologia proposta pela AOSA (1983). Para o cálculo desse atributo, foram utilizados os valores médios de emergência nos níveis de salinidade de zero, 12, 18 e 24 dS m⁻¹, do segundo ao décimo quarto dias de avaliação, sendo a comparação feita entre os diferentes genótipos.

$$IVE = \frac{N^{\circ} \text{ de sementes emergidas}}{\text{Dia da primeira contagem}} + \dots + \frac{N^{\circ} \text{ de sementes emergidas}}{\text{Dia da última contagem}} \quad \text{Equação 7.1}$$

Já para a determinação da absorção de água e estabilidade de membranas das variedades em estudo, foram dispostas 20 sementes de cada variedade em placas de Petry, com três camadas de papel toalha. Essas sementes foram divididas em dois grupos de 10 sementes, dentro de cada placa, sendo que o peso seco de cada grupo foi determinado individualmente. Foram adicionadas às placas de Petry, 15 mL de soluções salinas de 0 (controle), 12, 18 e 24 dS m⁻¹. As placas foram vedadas com fita *tape* e dispostas em incubadoras, cuja temperatura foi de 28° C. Após um, três e cinco dias de embebição, as placas foram retiradas da incubadora. Foram utilizadas três repetições por tratamento. Dessa forma, o experimento constou de 216 placas de Petry (seis variedades x quatro níveis de salinidade x três intervalos de embebição x três repetições).

Para a determinação da absorção de água pelas sementes, após cada intervalo de embebição, retirou-se o grupo de 10 sementes correspondente de cada placa de Petry, sendo as sementes lavadas com água em abundância e secadas com papel toalha, para remoção do excesso de água remanescente na

casca, pesando-se o material na sequência. A determinação da absorção de água foi calculada segundo a Equação 7.2.

$$A_a = (m_s - m_u) / m_s \quad \text{Equação 7.2}$$

Onde “ A_a ” é a absorção de água, em mL g de semente⁻¹, “ m_s ” é a massa seca do grupo de 10 sementes, em gramas, e “ m_u ” é a massa úmida, em gramas, do grupo de sementes após a embebição.

Já o outro grupo de 10 sementes foi usado para a determinação de liberação de eletrólitos, em função da salinidade (AOSA, 1983). Após a lavagem das sementes com água em abundância, o material foi disposto em tubos de ensaio, sendo adicionados 20 mL de água deionizada. Os tubos foram vedados e dispostos em uma câmara com água a 32° C. Após 12 e 24 h em banho-maria, os tubos foram retirados, para determinação da condutividade elétrica da solução. A determinação da liberação de eletrólitos pelas sementes após 12 e 24 h foi determinada a partir das Equações 7.3 e 7.4, respectivamente.

$$LE_{12} = CE_{12} / m_s \quad \text{Equação 7.3}$$

$$LE_{24} = (CE_{24} - CE_{12}) / m_s \quad \text{Equação 7.4}$$

Onde “ LE_{12} ” é a liberação de eletrólitos, em mS m⁻¹ g⁻¹ de sementes, após 12 horas em banho-maria; “ CE_{12} ” é a condutividade elétrica da solução, em mS m⁻¹, após 12 horas em banho-maria; “ m_s ” é a massa seca do grupo de 10 sementes, em gramas; “ LE_{24} ” é a liberação de eletrólitos, em mS m⁻¹ g⁻¹ de sementes, após 24 horas em banho-maria; e “ CE_{24} ” é a condutividade elétrica da solução, em mS m⁻¹, após 24 horas em banho-maria.

Os resultados referentes ao estabelecimento de nível crítico na emergência foram submetidos à análise de regressão, sendo que os dados melhor se ajustaram ao tipo sigmoidal, sendo apresentadas as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação, para os tempos de embebição de dois, cinco, 10 e 14 dias. Com relação ao índice de velocidade de emergência, foram comparados os desempenhos de todas as variedades. Os dados foram agrupados

nos diferentes níveis de salinidade e submetidos à análise de variância, com posterior comparação de médias pelo teste DMS ($p < 0,05$). Os resultados de absorção de água foram submetidos à análise de variância e a comparação de médias (DMS, $p < 0,05$) foi feita entre os tempos de embebição e os níveis de salinidade, sendo apresentado o erro padrão. Já no caso da liberação de eletrólitos, optou-se por apresentar apenas o erro padrão dos valores médios.

7.3. Resultados e Discussão

A emergência das diferentes variedades estudadas diminuiu com o aumento da salinidade do meio (Figura 7.1), sendo que os coeficientes de determinação dos ajustes sigmoidais foram altamente significativos em todos os casos (Tabela 7.1). Além disso, quanto menor o tempo de embebição, menor foi a emergência relativa à testemunha, especialmente aos dois dias após a embebição (DAE). Esse é o tempo normalmente demandado pelo arroz para emergência, sob condições ideais de temperatura (Yoshida, 1981), o que foi comprovado neste estudo, já que todos os materiais apresentaram emergência relativa superior a 80% no menor nível de salinidade estudado (Figura 7.1). Ainda com referência ao menor tempo de embebição, o nível de salinidade a partir do qual a emergência passou a ser inibida foi variável entre as variedades, com destaque para os cultivares BR47 e CSR36, cuja redução se iniciou ao redor de 12 dS m^{-1} (Figura 7.1b e 7.1d, respectivamente), ao contrário dos demais genótipos, que apresentaram maior suscetibilidade à salinidade aos 2 DAE. Já aos 5 DAE, houve expressivo aumento na emergência em relação a 2 DAE, em todas as variedades avaliadas, independentemente do nível de salinidade do meio de cultivo, o que era esperado (Figura 7.1).

Sementes de arroz suficientemente embebidas e não dormentes tendem a iniciar a emergência após um período de tempo relacionado à temperatura. Se o potencial hídrico do meio de embebição for reduzido, a emergência será atrasada ou inviabilizada, dependendo da extensão de redução do potencial hídrico (Hegarty, 1978). Neste estudo, nota-se que a emergência sofreu retardamento nos níveis de condutividade elétrica intermediários em todas as cultivares (Figura 7.1),

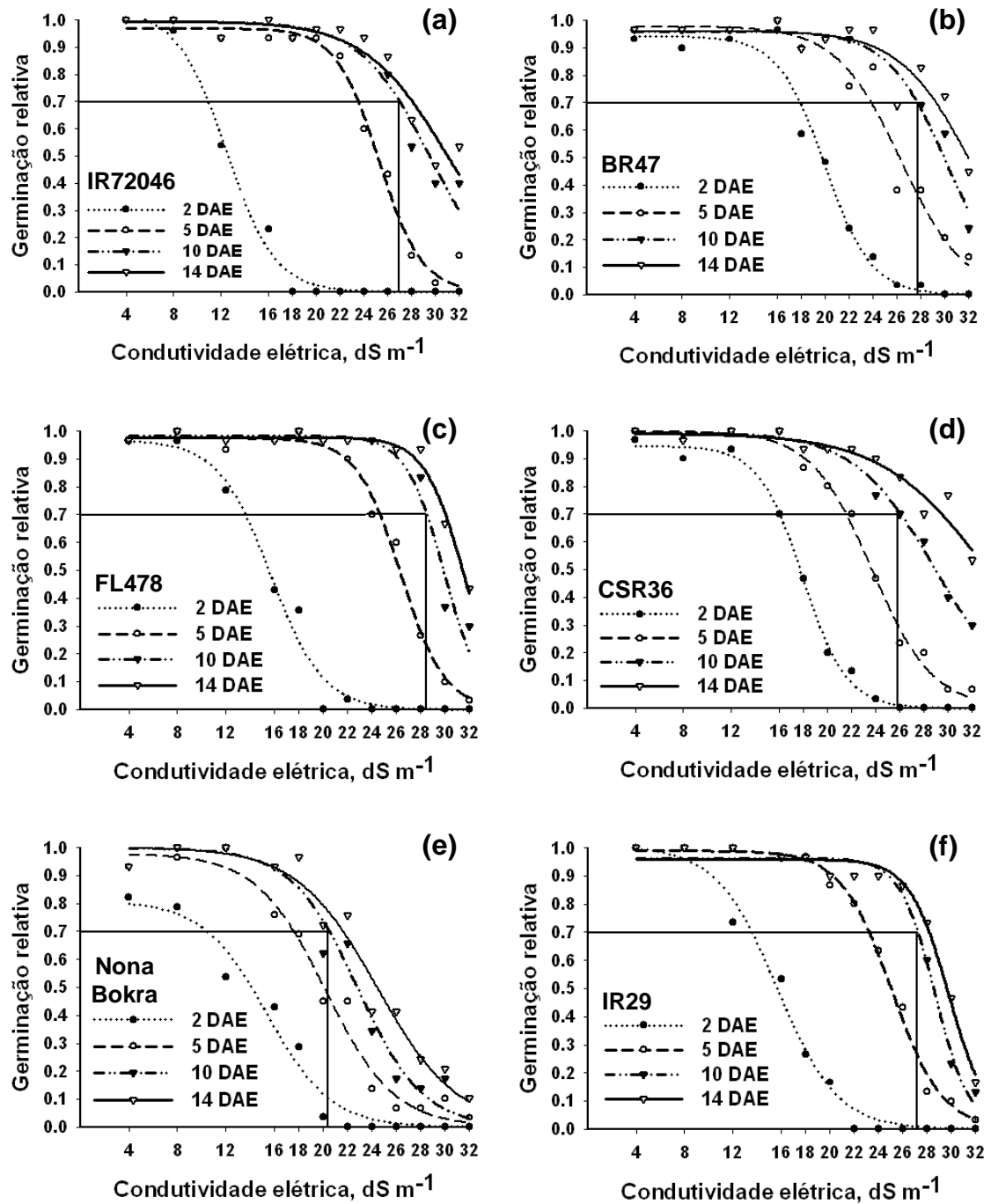


Figura 7.1. Emergência relativa das variedades de arroz IR72046 (a), BR47 (b), FL478 (c), CSR36 (d), Nona Bokra (e) e IR29 (f), submetidos a níveis de salinidade por dois, cinco, 10 e 14 dias. DAE: dias após a embebição. Los Baños, Filipinas, 2010.

mas nos casos mais elevados de salinidade, foi praticamente inviabilizada, como atestam os resultados de emergência das variedades Nona Bokra e IR29, que

foram muito baixas nesses níveis mais elevados de salinidade e praticamente não variaram entre 10 e 14 DAE (Figura 7.1e,f).

Tabela 7.1. Equações e coeficientes de regressão das curvas sigmoidais de resposta de variedades de arroz expostos a níveis de salinidade por diferentes intervalos de embebição. Los Baños, Filipinas, 2010

Intervalo	Equação	R ²
.....IR72016.....		
2 DAE	$\hat{y} = 1,036 / (1 + e^{- (x - 12,42) / - 2,057})$	0,99***
5 DAE	$\hat{y} = 0,969 / (1 + e^{- (x - 25,25) / - 1,804})$	0,98***
10 DAE	$\hat{y} = 0,995 / (1 + e^{- (x - 29,56) / - 2,934})$	0,94***
14 DAE	$\hat{y} = 0,996 / (1 + e^{- (x - 31,07) / - 3,471})$	0,90***
.....BR47.....		
2 DAE	$\hat{y} = 0,943 / (1 + e^{- (x - 19,95) / - 1,946})$	0,98***
5 DAE	$\hat{y} = 0,978 / (1 + e^{- (x - 26,35) / - 2,692})$	0,96***
10 DAE	$\hat{y} = 0,960 / (1 + e^{- (x - 30,15) / - 2,463})$	0,93***
14 DAE	$\hat{y} = 0,961 / (1 + e^{- (x - 32,20) / - 2,956})$	0,84**
.....FL478.....		
2 DAE	$\hat{y} = 0,968 / (1 + e^{- (x - 15,67) / - 2,150})$	0,98***
5 DAE	$\hat{y} = 0,976 / (1 + e^{- (x - 26,37) / - 1,815})$	0,99***
10 DAE	$\hat{y} = 0,984 / (1 + e^{- (x - 29,94) / - 1,565})$	0,96***
14 DAE	$\hat{y} = 0,978 / (1 + e^{- (x - 31,53) / - 1,605})$	0,98***
.....CSR36.....		
2 DAE	$\hat{y} = 0,946 / (1 + e^{- (x - 17,91) / - 1,823})$	0,99***
5 DAE	$\hat{y} = 0,998 / (1 + e^{- (x - 23,71) / - 2,521})$	0,99***
10 DAE	$\hat{y} = 0,996 / (1 + e^{- (x - 28,99) / - 3,370})$	0,99***
14 DAE	$\hat{y} = 0,992 / (1 + e^{- (x - 33,33) / - 4,378})$	0,93***
.....Nona Bokra.....		
2 DAE	$\hat{y} = 0,810 / (1 + e^{- (x - 15,36) / - 2,643})$	0,97***
5 DAE	$\hat{y} = 0,978 / (1 + e^{- (x - 20,21) / - 2,823})$	0,98***
10 DAE	$\hat{y} = 0,998 / (1 + e^{- (x - 22,81) / - 2,699})$	0,96***
14 DAE	$\hat{y} = 0,999 / (1 + e^{- (x - 24,44) / - 3,288})$	0,97***
.....IR29.....		
2 DAE	$\hat{y} = 1,006 / (1 + e^{- (x - 15,62) / - 2,492})$	0,99***
5 DAE	$\hat{y} = 0,990 / (1 + e^{- (x - 25,10) / - 2,090})$	0,99***
10 DAE	$\hat{y} = 0,964 / (1 + e^{- (x - 28,67) / - 1,434})$	0,98***
14 DAE	$\hat{y} = 0,959 / (1 + e^{- (x - 29,79) / - 1,605})$	0,98***

significativo (0,0001 < p < 0,001); *significativo (p < 0,0001).

De modo geral, o nível crítico estabelecido aos 10 DAE foi semelhante entre todas as variedades estudadas e ficou entre, aproximadamente, 26 e 28 dS m⁻¹, exceção feita à variedade japonesa Nona Bokra (Figura 7.1e). Neste caso específico, o nível crítico foi de, aproximadamente, 20 dS m⁻¹, inferior portanto,

aos demais materiais avaliados, inclusive a IR29, cultivar usada como controle em programas de melhoramento, por ser suscetível à salinidade no período vegetativo, ao contrário da Nona Bokra, a qual é tolerante (Gregorio et al., 1997). Esses resultados demonstram não haver, aparentemente, relação entre a tolerância na emergência e período vegetativo, pelo menos para as variedades Nona Bokra (Figura 7.1e) e IR29 (Figura 7.1f). A complexidade da tolerância à salinidade entre diferentes genótipos (Zeng et al., 2003), assim como a resposta diferenciada ao estresse nos diferentes período de desenvolvimento (Pearson, 1959; Maas & Hoffman, 1977), são alguns dos principais empecilhos ao sucesso dos programas de melhoramento genético em arroz para tolerância à salinidade.

Apesar de ser uma espécie glicófita, os níveis críticos alcançados pelas diferentes variedades de arroz em estudo (Figura 7.1) se assemelham a halófitas moderadamente resistentes à salinidade, como *Hordeum jubatum* (Ungar, 1991). Isso pode ser atribuído ao baixo nível crítico de potencial hídrico do solo a partir do qual as plantas de arroz germinam (Shonjani, 2002).

Os dados obtidos no presente estudo se assemelham a alguns resultados disponíveis na literatura. Djanaguiram et al. (2003), por exemplo, avaliando os genótipos de arroz ADT38, White Ponni, ADT39, IR20 e TRY1, verificaram emergência relativa superior a 70% em todos os materiais expostos a condutividade elétrica de 24 dS m^{-1} , sete dias após a imposição do estresse. Resultado semelhante fora obtido por Shonjani (2002), avaliando a variedade AI-NAN-TSAO, cuja emergência foi de 87% em meio salino de 24 dS m^{-1} , por cinco dias. Por outro lado, Hakim et al. (2010), em estudo realizado com as cultivares IR20, BR29, BR40, Pokkali, MR33, MR68, MR84, MR52, MR211, MR219, MR220 e MR 232, não verificaram emergência ao nível de salinidade de 20 dS m^{-1} , após nove dias de avaliações, sendo que o nível crítico dos melhores genótipos foi de apenas 12 dS m^{-1} . Esses resultados se assemelham ao nível crítico proposto por Jagadev & Jena (1993), de 11 dS m^{-1} , o que ilustra a grande variabilidade de resposta do arroz ao estresse salino imposto às sementes.

O índice de velocidade de emergência (IVE) média, na comparação dentro de cada nível de salinidade, foi semelhante entre a maior parte dos genótipos selecionados para este estudo (Figura 7.2). Não foram observadas

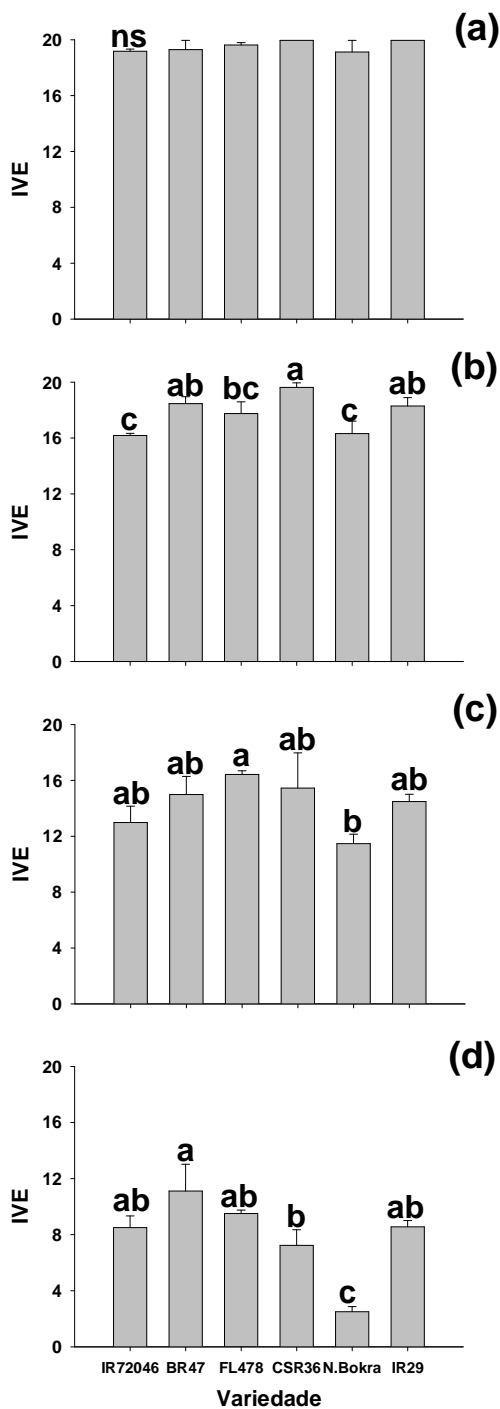


Figura 7.2. Índice de velocidade de emergência média de genótipos de arroz submetidos aos níveis de salinidade de zero (a), 12 dS m⁻¹ (b), 18 dS m⁻¹ (c) e 24 dS m⁻¹ (d). Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste DMS ($p < 0,05$); ns: não significativo. Barras indicam o erro padrão. Los Baños, Filipinas, 2010.

diferenças ($p > 0,05$) entre as variedades no tratamento testemunha (Figura 7.2a), o que reflete semelhança genética em condições de ausência de estresse por salinidade. Entretanto, já no nível de 12 dS m^{-1} , as variedades IR72046 e Nona Bokra (Figura 7.2b) apresentaram o pior desempenho ($p < 0,05$). Esta última, também teve o IVE mais afetado ($p < 0,05$) em relação às demais nos níveis de 18 dS m^{-1} (Figura 7.2c) e 24 dS m^{-1} (Figura 7.2d). Conforme o esperado, os dados referentes a esta variedade especificamente coincidem com os resultados relativos ao nível crítico para a salinidade na emergência, onde a cultivar Nona Bokra apresentou o pior desempenho (Figura 7.1). Já as demais variedades não apresentaram desempenho uniforme nos diferentes níveis de estresse. A cultivar CSR36, por exemplo, apresentou o maior IVE em salinidade de 12 dS m^{-1} (Figura 7.2b), o que não foi verificado no nível de 24 dS m^{-1} , quando obteve performance inferior ($p < 0,05$) a BR47 (Figura 7.2d). O mesmo ocorreu com a variedade IR72046, cujo IVE foi a menor ($p < 0,05$) no índice de salinidade de 12 dS m^{-1} (Figura 7.2b), ao contrário do observado em 18 e 24 dS m^{-1} (Figura 7.2 c,d).

Baseado na análise de variância da absorção de água pelas sementes, observa-se que houve efeito do tempo de embebição ($p < 0,001$) e da salinidade ($p < 0,001$), assim como efeito interativo ($p < 0,001$) desses dois fatores sobre esse atributo (Tabela 7.2).

Tabela 7.2. Análise de variância referente à absorção de água pelas sementes de diferentes variedades de arroz asiáticas expostas à salinidade por diferentes intervalos de embebição. Los Baños, Filipinas, 2010

Fonte de variação	Quadrado Médio						
	GL	IR72046	BR47	CSR36	FL478	Nona Bokra	IR29
Tempo embebição (E)	2	0,597***	0,519***	0,115***	0,428***	0,155***	0,551***
Salinidade (S)	3	0,379***	0,282***	0,0535***	0,268***	0,071***	0,323***
E x S	6	0,187***	0,127***	0,016***	0,114***	0,023***	0,156***
Erro	24	0,009***	0,001***	0,003***	0,006***	0,001***	0,002***

***: significativo ($p < 0,0001$).

De modo geral, a absorção de água pelas sementes aumentou conforme o maior tempo de embebição e diminuiu com o aumento do nível de

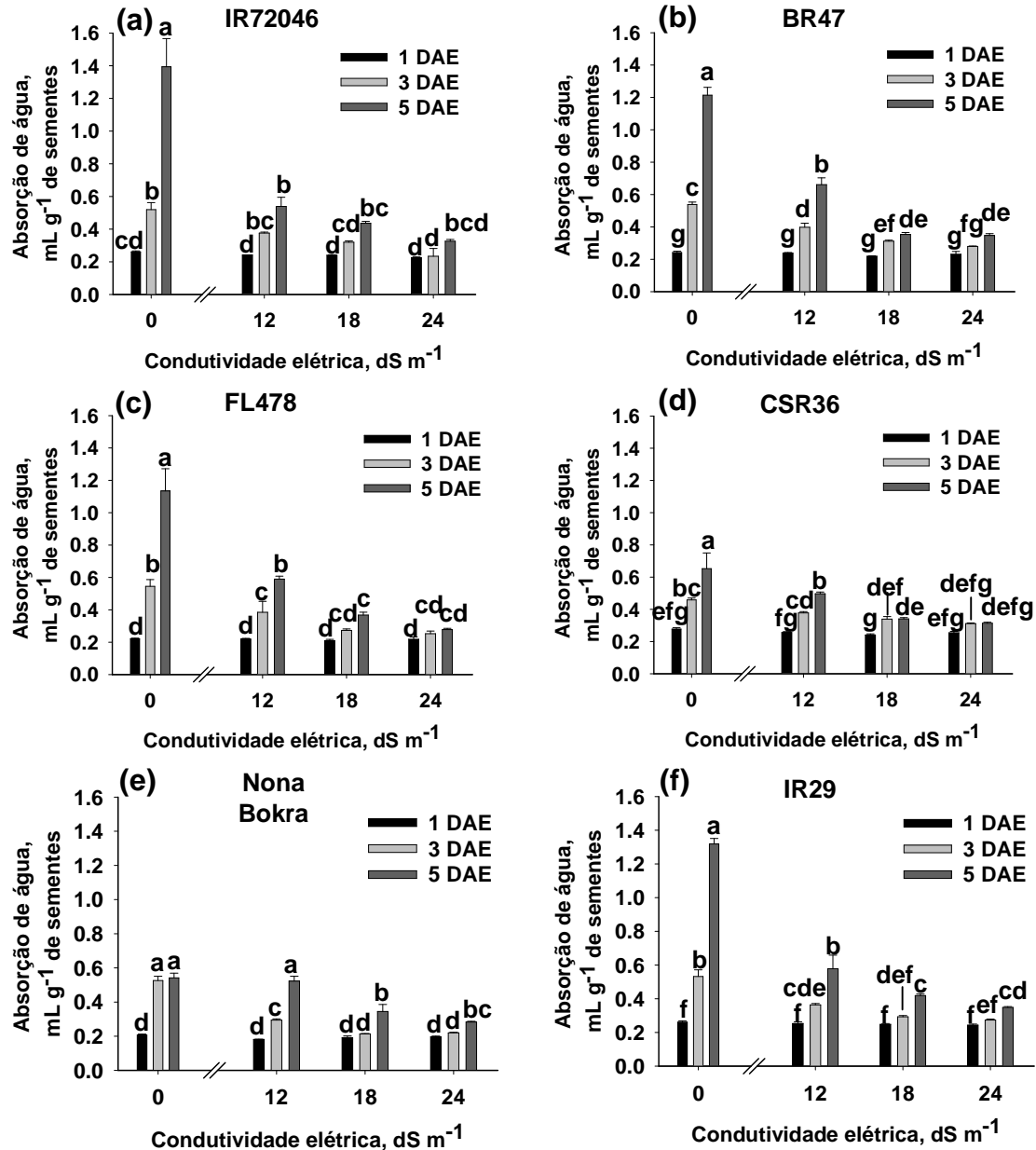


Figura 7.3. Efeito da salinidade sobre a absorção de água por diferentes genótipos de arroz a um, três e cinco dias após a embebição. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste DMS ($p < 0,05$). Barras indicam o erro padrão. Los baños, Filipinas, 2010.

salinidade (Figura 7.3). Entre todos os genótipos avaliados, não houve diferença ($p > 0,05$) entre a absorção de água 1 DAE, independentemente da condutividade elétrica do meio. As maiores diferenças na absorção de água foram verificadas no tratamento controle, sendo que o tempo de embebição de cinco dias proporcionou os maiores ($p < 0,05$) volumes de absorção em relação aos tratamentos de um e três dias de embebição, com exceção mais uma vez, da variedade Nona Bokra

(Figura 7.3e), não sendo observada diferença ($p > 0,05$) entre os tratamentos com três e cinco dias de embebição. Considerando-se apenas o nível de salinidade de 12 dS m^{-1} , houve diferença ($p < 0,05$) entre todos os tempos de embebição e todos os genótipos avaliados, sendo que, assim como no tratamento testemunha, a absorção aos 5 DAE foi superior em relação a 3 DAE e este em relação a 1 DAE (Figura 7.3).

Os maiores efeitos sobre a absorção de água foram verificados nos níveis de salinidade de 18 e 24 dS m^{-1} (Figura 7.3). Em ambos os casos, a influência do tempo de embebição foi minimizada. Considerando-se os intervalos de três e de cinco dias, as variedades FL478 e CSR36 não apresentaram diferença ($p > 0,05$), entre os maiores níveis de salinidade (Figura 7.3a,d, respectivamente). Já no caso da variedade IR72046, para o maior tempo de embebição, não se verificou diferença ($p > 0,05$) entre os níveis de 12 , 18 e 24 dS m^{-1} (Figura 7.3a).

Comparando-se os valores médios dos tratamentos controle e 24 dS m^{-1} , independentemente do tempo de exposição ao sal, a variedade IR72046 (Figura 7.3a) apresentou a maior redução na absorção de água, cerca de 64% . As variedades FL478 e IR29 também apresentaram expressiva redução, ao redor de 60% (Figura 7.3c,f, respectivamente). Já a menor redução foi verificada para a variedade CSR36 (Figura 7.3d), com apenas 37% , seguida do genótipo Nona Bokra, com 45% de redução (Figura 7.3e). Sob esse aspecto, aparentemente não houve relação entre o menor nível crítico e taxa de emergência obtidos para essa variedade (Figuras 7.1e e 7.2, respectivamente), entretanto, em valores absolutos, a média de absorção de água dessa variedade, sob 24 dS m^{-1} de salinidade, foi a menor entre todos os materiais avaliados (Figura 7.3e).

A absorção de água pelas sementes envolve duas fases distintas: primeiro, o movimento ocorre através dos espaços livres (apoplasto) e não depende do potencial osmótico do meio de cultivo; num segundo momento, a água atravessa as membranas celulares em direção ao interior das células, sendo que esse processo é governado pela diferença entre o potencial osmótico da semente e do meio ao redor (Bewley & Black, 1994). Desse modo, a semelhança entre os valores de absorção de água após um dia de embebição (Figura 7.3),

independentemente do nível de salinidade, parece ter se dado em função da entrada de água via apoplasto. Por outro lado, os diferentes patamares de absorção observados, com o aumento do nível de salinidade, provavelmente representam o processo subsequente de absorção de água, o qual é governado pela diferença de potencial osmótico que a adição de NaCl proporcionou no meio de cultivo.

A liberação de eletrólitos pelas sementes seguiu tendência inversa ao observado com relação à absorção de água, ou seja, no período de 12 horas em banho-maria, aumentou com o maior nível de salinidade adotado e com o tempo de embebição (Figura 7.4). As diferenças entre os tratamentos foram mais uniformes no intervalo de embebição de um dia. Já no intervalo de três dias, em alguns casos, a liberação de eletrólitos foi maior no nível de salinidade de 18 dS m⁻¹, como verificado nas avaliações das variedades IR72046 (Figura 7.4b) e IR29 (Figura 7.4q). Fato semelhante foi observado aos 5 DAE, novamente com as variedades IR72046 (Figura 7.4c) e FL478 (Figura 7.4i). Excetuando-se o tratamento controle, em todos os níveis de salinidade e intervalos de embebição, a liberação de eletrólitos foi superior na medição realizada 12 horas após o início do banho-maria, em relação ao período de 24 hs, assim como observado por Ismail et al. (1997).

A liberação de eletrólitos da variedade Nona Bokra (Figura 7.4m-o) seguiu padrão semelhante aos demais genótipos, sendo, entretanto, menor em comparação a algumas cultivares, como a FL478 (Figura 7.4g-i) e a IR29 (Figura 7.4p-r). Infere-se, dessa forma, que a maior suscetibilidade dessa variedade à salinidade (Figuras 7.1 e 7.2) não estaria associada diretamente à estabilidade de membranas, em relação à elevada presença de sais.

O NaCl, quando presente no meio de cultivo, tende a atravessar rapidamente a membrana celular em direção ao citoplasma das células. Com isso, o potencial osmótico no interior das células diminui, o que facilita a hidratação das sementes, pelo aumento do seu potencial matricial em comparação ao meio externo (Katembe et al., 1998). Isto constitui um mecanismo de adaptação das plantas a uma condição desfavorável à absorção de água. Entretanto, quando

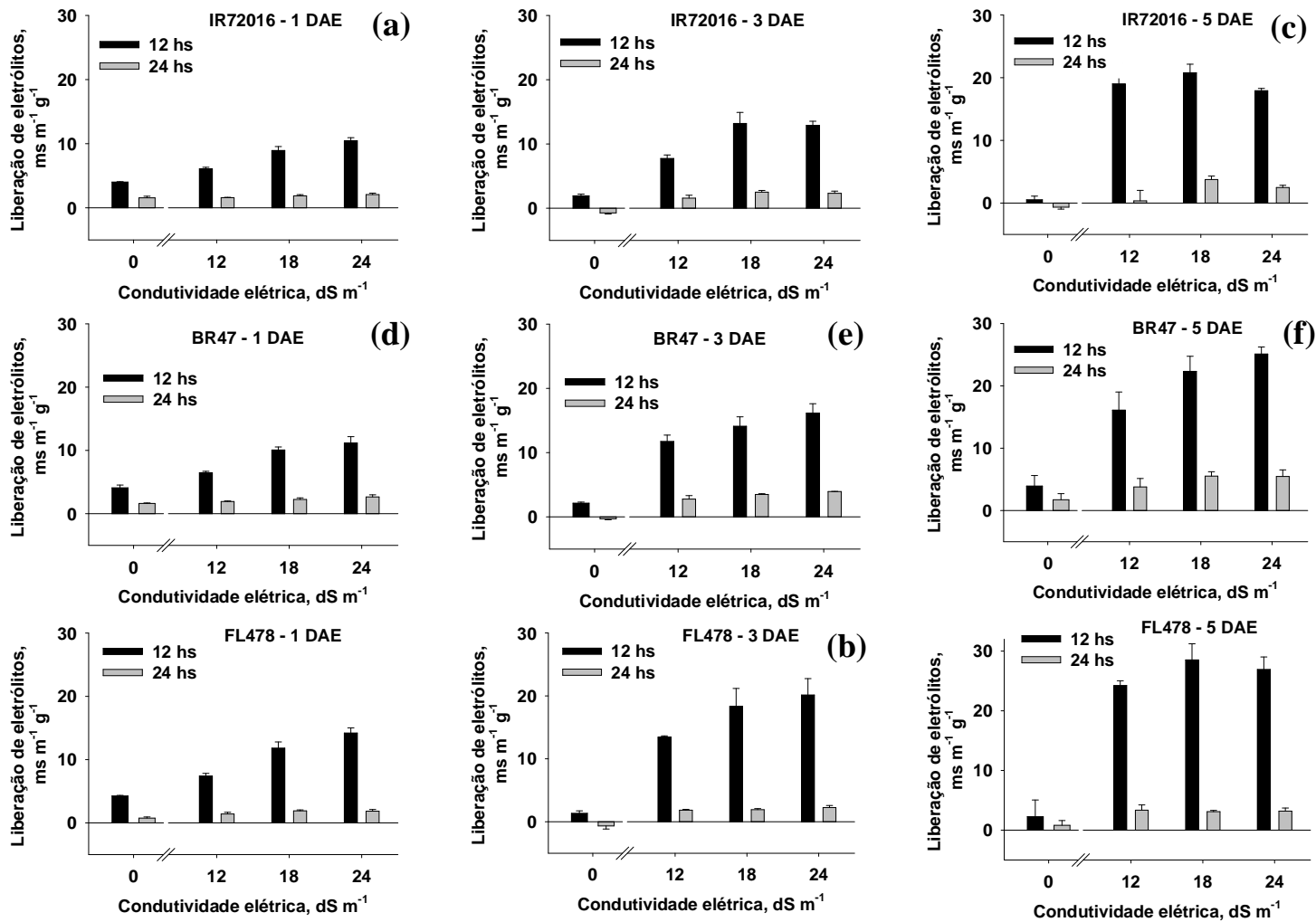


Figura 7.4. Liberação de eletrólitos por diferentes variedades de arroz em função do nível de salinidade e do tempo de embebição. Barras indicam o erro padrão. Los Baños, Filipinas, 2010.

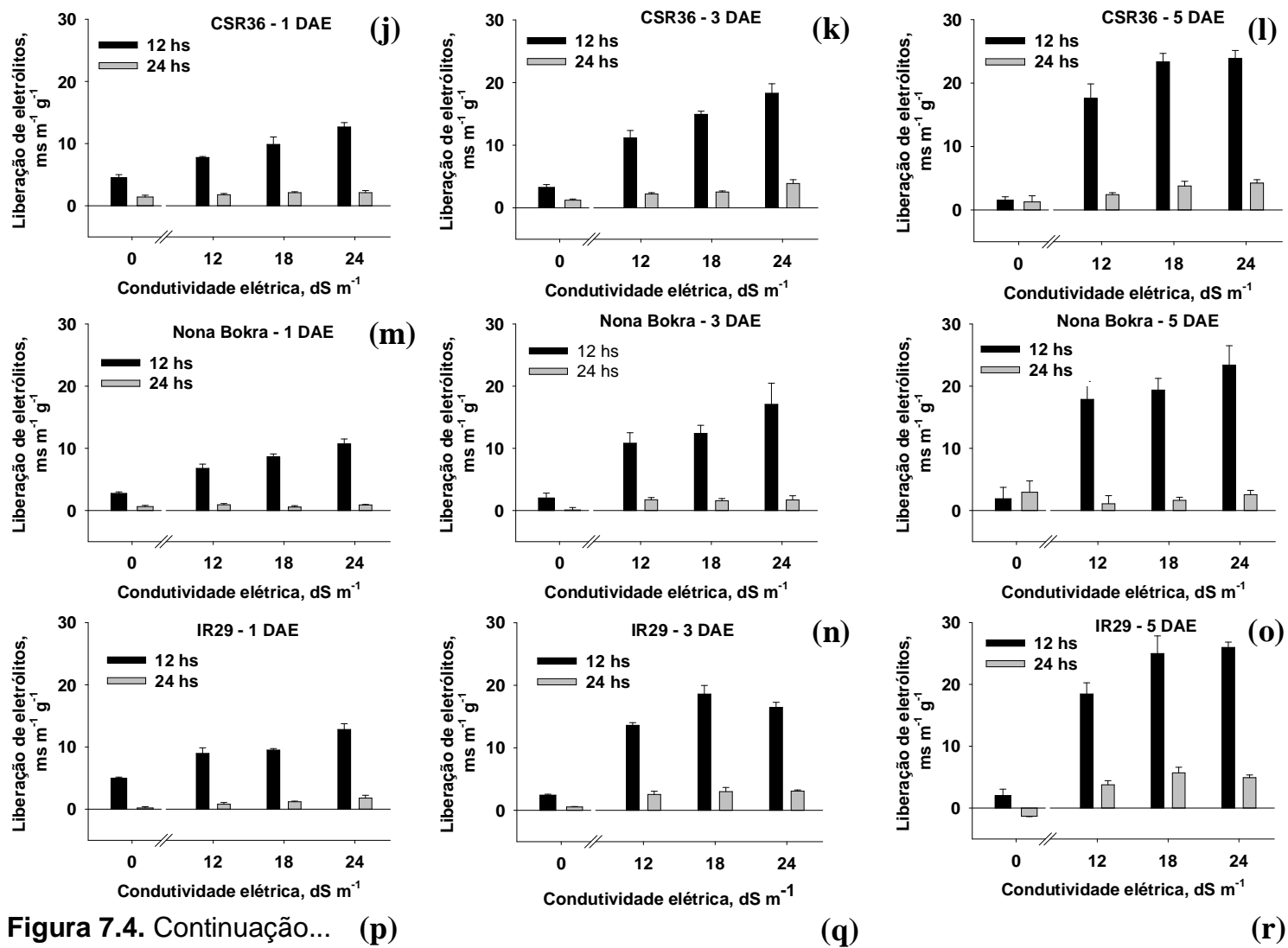


Figura 7.4. Continuação... (p)

(q)

(r)

presente em altas concentrações, pode haver substituição de Ca^{2+} por Na^+ na membrana plasmática. Isto diminui sobremaneira a sua permeabilidade, favorecendo a liberação de eletrólitos para o meio exterior, principalmente o K^+ (Cramer et al., 1985). Apesar de todos os genótipos avaliados nesse estudo terem apresentado aumento da liberação de eletrólitos com o aumento da salinidade (Figura 7.4), a emergência somente passou a ser negativamente afetada em níveis de salinidade muito elevados (Figura 7.1), o que indica que, apesar de uma eventual desorganização das membranas, a cultura do arroz possui mecanismos de ajuste suficientemente eficientes para garantir a emergência das sementes.

7.4. Conclusões

O nível crítico para a emergência sob salinidade das variedades de arroz irrigado IR72046, BR47, FL478, CSR36 e IR29 são semelhantes e variam de 26 a 28 dS m^{-1} . Já o nível crítico estabelecido para a variedade Nona Bokra é de 20 dS m^{-1} .

O índice de velocidade de emergência diminui com o aumento da salinidade em todos os materiais avaliados, sendo que o efeito da salinidade sobre esse atributo é maior na variedade Nona Bokra.

A salinidade do meio de cultivo e o tempo de exposição a esse estresse diminuem a absorção de água pelas sementes e aumentam a degradação das membranas celulares.

8. CONCLUSÕES GERAIS

As planícies costeiras do Rio Grande do Sul estão aptas a apresentar níveis de salinidade prejudiciais à cultura de arroz irrigado, sendo que os altos teores de sais presentes na Planície Costeira Externa são provenientes do subsolo e na Planície Costeira Interna, da água utilizada para irrigação.

Solos com altos níveis de salinidade pré-existente restringem o uso da água proveniente da Laguna dos Patos, inviabilizando a irrigação mesmo que a água utilizada tenha condutividade elétrica inferior ao nível crítico previamente estabelecido para o arroz, de $2,0 \text{ dS m}^{-1}$, sendo que as maiores restrições de uso da água ocorrem na Planície Costeira Externa à Laguna dos Patos e na porção meridional da Planície Costeira Interna.

Em solos previamente afetados pela salinidade, a aplicação de altas doses de fertilizante potássico junto à linha de semeadura prejudicam o estabelecimento uniforme da cultura, o que pode se refletir em menor rendimento de grãos, dependendo do nível de redução do estande.

A utilização de água de boa qualidade para a irrigação das lavouras de arroz diminui os teores de sais no perfil do solo, independentemente da sua salinidade original, em função da lixiviação e absorção radicular de cátions básicos.

O nível crítico do arroz quanto à salinidade na emergência é muito superior ao estabelecido para as fases subsequentes, podendo chegar a 28 dS m^{-1} , embora o excesso de sais retarde o processo, prejudique a absorção de água e aumente a desorganização das membranas celulares.

9. BIBLIOGRAFIA CITADA

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. 66 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ABREU, J.G.N.; CALLIARI, L.J. Paleocanais na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul: evidências de uma drenagem fluvial pretérita. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 23, p.123-132, 2005.

AHMAD, M.S.A.; JAVED, F.; ASHRAF, M. Iso-osmotic effect of NaCl and PEG on growth, cations and free proline accumulation in callus tissue of two indica rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. **Plant Growth Regulation**, Amsterdam, v.53, p.53-63, 2007.

AKBAR, M.; YABUNO, T. Breeding for saline resistant varieties of rice 1. Variability for salt tolerance among some rice varieties. **Japanese Journal of Breeding**, Tóquio, v.22, p.277-294, 1974.

ALAM, M.Z.; STUCHBURY, T.; NAYLOR, R.E.L.; RASHID, M.A. Water uptake and germination pattern of rice seeds under iso-osmotic solutions of NaCl and Peg, different concentrations of CaCl₂ and combinations of NaCl and CaCl₂. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, Islamabade, v.6, p.1059-1066, 2003.

ANTIQUERA, J.A.F.; CALLIARI, L.J. Características sedimentares da desembocadura da Laguna dos Patos. **Gravel**, Porto Alegre, v.3, p.39-46, 2005.

ASCH, F.; DINGKUHN, M.; DÖRFFLING, K.; MIEZAN, K. Leaf K/Na ratio predicts salinity induced yield loss in irrigated rice. **Euphytica**, Amsterdam, v.113, p.109-118, 2000.

ASCH, F.; WIMMER, M.A.; DAHAL, K.P.; DAS, U.S. Boron distribution shows sodium distribution in rice leaves to be independent of transpiration. In: CONFERENCE ON INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH FOR DEVELOPMENT, Stuttgart, 2005. **Proceedings...**Stuttgart, 2005. p.11-13.

ASSOCIATION OF OFFICIAL SEED ANALYSIS - AOSA. **Seed vigor testing handbook**. Washington, 1983. 93 p. (Contribution, 32)

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **Water quality for agriculture**. Roma: FAO, 1985. 174p.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability**: a mechanistic approach. 2.ed. Nova York: J.Wiley & Sons, 1995. 414p.

BEWLEY D.J.; BLACK, M. **Seeds**: physiology of development and germination. Nova York: Plenum Press, 1994. 447 p.

BELTRAME, L. F. S.; LOCHPE, B.; ROSA, S. M.; MIRANDA, T. L. G. Lixiviação de íons em planossolo Vacacaí sob condições de alagamento. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.44, p.9-12, 1991.

BLACK, C.A. **Relaciones suelo-planta**. Buenos Aires: Hemisferio Sur, 1975. 444 p.

BOIVIN, P.; FAVRE, F.; HAMMECKE, C.; MAEGHT, J.L.; DELARIVIE`RE, J.; POUSSIN, J.C.; WOPEREIS, M.C.S. Processes driving soil solution chemistry in a flooded rice-cropped vertisol: analysis of long-time monitoring data. **Geoderma**, Amsterdam, v.110, p.87-107, 2002.

BURNETT, W. C.; DULAIIOVA, H. Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements. **Journal of Environmental Radioactivity**, Amsterdam, v.69, p. 21-35, 2003.

CAO, E.G.; CARLOS, F.S.; CARMONA, F.C.; MARTINS, A.P.; ANDRIGHETTI, M.H.; ANGHINONI, I. Evolução da biomassa do arroz irrigado em função do manejo da adubação potássica e de níveis de salinidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 6.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 28., Porto Alegre, 2009. **Anais...**Porto Alegre, 2009. CD-ROM.

CARMONA, F. C.; ANDRIGHETTI, M.; CAO, E.; MARTINS, A.P.; WEBER, E.; ANGHINONI, I. Ocorrência de solos afetados por sais nas planícies costeiras do Rio Grande do Sul In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 6.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 28., Porto Alegre, 2009. **Anais...**Porto Alegre, 2009. CD-ROM.

CARMONA, F. C.; ANGHINONI, I.; HOLZSCHUH, M.; ANDRIGHETTI, M. Cation dynamics in soils with different salinity level growing irrigated rice. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p.1851-1863, 2010.

CARMONA, F.C.; ANGHINONI, I.; WEBER, E. **Salinidade da água e do solo e seus efeitos sobre o arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Instituto Rio Grandense do Arroz, 2011. 54p. (Boletim Técnico).

CARMONA, F. C.; ANGHINONI, I.; MEURER, E.J.; HOLZSCHUH, M.; FRAGA, T. I. Estabelecimento do arroz irrigado e absorção de cátions em função do manejo da adubação potássica e nível de salinidade do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.371-382, 2009.

CARMONA, L.C.; PULVER, E.; CARMONA, F.C. Fertilização antecipada como estratégia de manejo para altas produtividades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., Santa Maria, 2005. **Anais...**Santa Maria, 2005. p.413-414.

CASTELÃO, R.M.; MÖLLER JR, O.O. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. **Atlântica**, Rio Grande, v. 25, p.91-106, 2003.

CASTELLO, J.P.; MÖLLER JR, O.O. Sobre as condições oceanográficas no Rio Grande do Sul. **Atlântica**, Rio Grande, v.2, p.25-35, 1977.

CASTILLO, E.G.; TUONG, T.P.; ISMAIL, A.M.; INUBUSHI, K. Response to salinity in rice: comparative effects of osmotic and ionic stresses. **Plant Production Science**, Tóquio, v.10, p.159-170, 2007.

CASTILHOS, R.M.V. **Suprimento de potássio em solos cultivados com arroz irrigado e sua relação com mineralogia, formas e cinética de liberação**. 1999. 175f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

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.

CHARETTE, M.A.; SHOLKOVITZ, E.R. Trace element cycling in a subterranean estuary: part 2. Geochemistry of the pore water. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Amsterdam, v.70, p.811-826, 2006.

HAZEN, O.; HARTUNG, W.; NEUMANN, P.M. The different effects of PEG 6000 and NaCl on leaf development are associated with differential inhibition of root water transport. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v.18, p.727-735, 1995.

CHHABRA, R.; ABROL, I.P. Reclaiming effect of rice grown in sodic soils. **Soil Science**, Filadélfia, v.124, p.49-55, 1977.

COSTA, C.S.B.; SEELIGER, U.; KINAS, P.G. The effect of wind velocity and direction on the salinity regime in the lower Patos lagoon estuary. **Ciência e Cultura**, Campinas, v.40, p.909-912. 1988.

COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E. D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C.; ANDRIGHETTI, M. Distribuição de potássio e de raízes no solo e crescimento de

milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.1291-1301, 2009.

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

COUNCE, P.A.; MOLDENHAUER, K.A.K.; MARX, D.B. Rice yield and plant yield variability responses to equidistant spacing. **Crop Science**, Madison, v.29, p.175-179, 1989.

CRAMER, G.R. Differential effects of salinity on leaf elongation kinetics of three grass species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.253, p.233-244, 2003.

CRAMER, G.R.; EPSTEIN, E.; LÄUCHLI, A. Effect of sodium, potassium and calcium on salt stressed barley. II. Elemental analysis. **Physiologia Plantarum**, Hoboken, v.81, p.197-202, 1991.

CRAMER, G.R.; LÄUCHLI, A.; POLITO, V.S. Displacement of Ca^{2+} by Na^+ from plasmalemma of root cells: a primary response to stress? **Plant Physiology**, Waterbury, v.79, p.207-211, 1985.

CUI, H.; TAKEOKA, Y.; WADA, T. Effect of sodium chloride on the panicle and spikelet morphogenesis in rice. **Japanese Journal of Crop Science**, Tóquio, v.64, p.593-600, 1995.

CUSTÓDIO, M.S. **Nebulosidade diurna no Estado do Rio Grande do Sul: climatologia e monitoramento de nuvens por satélite**. 2007. 132f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

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

DEMIR, I.; MAVI, K.; ZCOBAN, M.; OKCU, G. Effect of salt stress on germination and seedling growth in serially harvested aubergine (*Solanum melongena* L.) seeds during development. **Israel Journal of Plant Science**, Jerusalem, v.51, p.125-131, 2003.

DILLENBURG, S.R.; ROY, P.S.; COWELL, P. J.; TOMAZELLI, L.J. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by shoreface translation-barrier model (STM). **Journal of Coastal Research**, Falmouth, v.16, p.71-81, 2000.

DILLENBURG, S.R.; TOMAZELLI, L.J.; MARTINS, L.R.; BARBOZA, E.G. Modificações de longo período da linha de costa das barreiras costeiras do Rio Grande do Sul. **Gravel**, Porto Alegre, v.3, p.9-14, 2005.

DJANAGUIRAMAN, M.; RAMADASS, R.; DEVI, D.D. Effect of salt stress on germination and seedling growth in rice genotypes. **The Madras Agricultural Journal**, Tamil Nadu, v.90, p.50-53, 2003.

EHLER, W. Some effects of salinity on rice. **Botanical Gazette**, Chicago, v.122, p.102-104, 1960.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1995. 101p.

FAGERIA, N. K. Deficiência hídrica em arroz de cerrado e resposta ao fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.15, p.259-265, 1980.

FAGERIA, N.K. Tolerance of rice cultivars to salinity. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, p.281-288, 1991.

FAIRHURST, T.H.; WITT, C.; BURESH, R.J.; DOBERMANN, A. **Rice: A practical guide to nutrient management**. 2.ed. Cingapura: IRRI : IPI : IPNI, 2007. 137 p.

FERNANDES, E. H. L.; MARIÑO-TAPIA, I.; DYER, K. R.; MOLLER, O. O. The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary. **Ocean Dynamics**, Amsterdam, v.54, p.348-359, 2004.

FOLONI, L.L.; RODRIGUES, J.D.; ONO, E.O. Controle do arroz vermelho através do herbicida sulfosate isolado e em mistura com adjuvantes. **Planta Daninha**, Londrina, v.15, p.39-45, 1997.

FRAGA, T.I.; CARMONA, F.C.; ANGHINONI, I.; GENRO JUNIOR, S.A.; MARCOLIN, E. Flooded rice yield as affected by levels of water salinity in different stages of its cycle. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.175-182, 2010.

FRAGA, T.I.; MARCOLIN, E.; MACEDO, V.R.M.; GENRO JR, S.A.; SCHOENFELD, R.; ANGHINONI, I. Salinidade da água da Laguna dos Patos utilizada no arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 5.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 27., Pelotas, 2007. **Anais...**Pelotas, 2007. p.405-407.

FRAGA, T.I.; GENRO JUNIOR, S.A.; INDA, A.V.; ANGHINONI, I. 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.

FREIRE, M.B.G.S.; FREIRE, F.J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L (eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.929-954.

FREITAS, U.; NIENCHESKI, L.F.H.; ZARZUR, S.; MANZOLLI, R.P.; VIEIRA, J.P.P.; ROSA, L.C. Influência de um cultivo de camarão sobre o metabolismo bêntico e a qualidade da água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, p.293-301, 2008.

GARCIA, A.; RIZZO, C.A.; UD-DIN, J.; BARTOS, S.L.; SENADHIRA, D; FLOWERS, T.J.; YEO, A.R. Sodium and potassium transport to the xylem are inherited independently in rice, and the mechanisms of sodium:potassium selectivity differs between rice and wheat. **Plant, Cell & Environment**, Hoboken, v.20, p.1167-1174, 1997.

GLENN, E, P.; BROWN, J. J; BLUMWALD, E. Salt tolerance and crop potential of halophytes. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Abingdom, v.18, p.227-255, 1999.

GOMES, E.M.; GHEYI, H.R.; SILVA, E.F.F. Melhorias nas propriedades químicas de um solo salino-sódico e rendimento de arroz, sob diferentes tratamentos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, p.355-36, 2000.

GOMMERS, A.; THIRY, Y.; DELVAUX, B. Rhizospheric mobilization and plant uptake of radiocesium from weathered soils: I. Influence of potassium depletion. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.34, p.2167-2173, 2005.

GRATTAN, S.R. **Irrigation water salinity and crop production**. Berkeley : Farm Water Quality Planning. University of California, Agriculture and Natural Resources, 2002. 9 p.

GRATTAN, S.R.; ZENG, L.; SHANNON, M.C.; ROBERTS, S.R. Rice is more sensitive to salinity than previously thought. **California Agriculture**, Oakland, v.56, p.189-195, 2002.

HAKIM, M.A.; JURAIMI, A.S.; BEGUM, M.; HANAFI, M.M.; ISMAIL, M.R.; SELAMAT, A. Effect of salt stress on germination and early seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.). **African Journal of Biotechnology**, Lagos, v.9, p.1911-1918, 2010.

HAYWARD, H.E.; BERNSTEIN, I. Plant growth relationships on salt affected soils. **Botanical Review**, Chicago, v.24, p.585-635, 1958.

HEGARTY, T.W. The physiology of seed hydration and the relation between water stress and control of germination: a review. **Plant Cell & Environment**, Hoboken, v.1, p.101-119, 1978.

HOAI, N.T.T.; SHIM, I.S.; KOBAYASHI, K.; USUI, K. Accumulation of some nitrogen compounds in response to salt stress and their relationships with salt tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. **Plant Growth Regulation**, Amsterdam, v.41, p.159-164, 2003.

INSTITUTO DE PESQUISAS AGRONÔMICAS - IPAGRO. **Atlas Agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1989. v.3. 125 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS AGRONÔMICAS - IPAGRO. **Observações meteorológicas no Estado do Rio Grande do Sul**. 3.ed. Porto Alegre, 1979. 272p.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ – IRGA. **Dados de safra**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20090508130654.pdf>. Acesso em: 18 jun.2009

INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE - IRRI. 2007. **Rice Doctor**. Disponível em: http://www.knowledgebank.irri.org/RiceDoctor/Fact_Sheets/DeficienciesToxicities/Salinity.htm. Acesso em: 15/02/2007.

INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION - ISTA. **International rules for seed testing**. Seed Science and Technology, 21 (supplement). Zurique, 1993. 288 p.

ISMAIL, A.M.; HALL, A.E.; CLOSE, T.J. Chilling tolerance during emergence of cowpea associated with dehydrin and slow electrolyte leakage. **Crop Science**, Madison, v.37, p.1270-1277, 1997.

JAGADEV, P.N.; JENA, D. Effect of saline irrigation water on germination and seedling growth of rice genotypes. **Orissa Journal of Agricultural Research**, Bhubaneswar, v.6, p.87-90, 1993.

KAMINSKI, J.; BRUNETTO, G.; MOTERLE, D.F.; RHEINHEIMER, D.S. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1003-1010, 2007.

KATEMBE, W.J.; UNGAR, I.A.; MITCHELL, J.P. Effect of Salinity on Germination and Seedling Growth of two *Atriplex* species (Chenopodiaceae). **Annals of Botany**, Oxford, 82: 167-175, 1998.

KAWASAKI, T.; AKIBA, T.; MORITSUGU, M. Effects of high concentrations of sodium chloride and polyethylene glycol on the growth and ion absorption in plants. I. Water culture experiments in a greenhouse. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.75, p.75-85. 1983.

KHAN, M.S.A.; HAMID, A.; KARIM, M.A. Effect of sodium chloride on germination and seedling characters of different types of rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Agronomy and Crop Science**, Hoboken, v.179, p.163-169, 1997.

KHATUN, S.; FLOWERS, T.J. The estimation of pollen viability in rice. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.46, p.151-154, 1995.

KHATUN, S.; RIZZO, C.A.; FLOWERS, T.J. Genotypic variation in the effect of salinity on fertility on rice. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.173, p.239-250, 1995.

KJERFVE, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: WOLFE, DA (ed.). **Estuarine variability**. Nova York: Academic Press, 1986. p.63-81.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, p.395-401, 1995.

LÄUCHLI, A.; EPSTEIN, E. Plant responses to saline and sodic conditions. In: TANJI, K.K. (Ed). **Agricultural salinity assessment and management**. Local(cidade) : ASCE, 1990. p.113-137. ASCE manuals and reports on engineering practice, v.71.

LEE, K.S.; SENADHIRA, D.; LEE, K.S. Salinity tolerance in japonica rice (*Oryza sativa* L.). **SABRAO Journal**, Los Baños, v.28, p.11-17, 1996.

LEOPOLD, A.C.; WILLING, R.P. Evidence of toxicity effects of salt on membranes. In: STAPLES, R.C.; TOENNIESSEN, G.H (Eds.). **Salinity tolerance in plants**. Nova York: J. Wiley & Sons, 1984. p.67-76.

LEVITT, J. **Responses of plants to environmental stress**. 2.ed. New York : Academic Press, 1980. v.2.

LIMA, M.G.S.; LOPES, N.F.; MORAES, D.M.; ABREU, C.M. Qualidade fisiológica de sementes de arroz submetidas a estresse salino. **Revista Brasileira de Sementes**, Pelotas, v.27, p.54-61, 2005.

LOPES, M.C.B.; ROSSO, A.F.; LOPES, S.I.G.; CARMONA, P.S.; LEITES, A.; ULBRICH, A.; LOUZANO, L.C. IRGA 422CL: a nova cultivar desenvolvida pelo programa de melhoramento genético do Instituto Rio Grandense do Arroz para o sistema de produção Clearfield. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 3.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ ARROZ IRRIGADO, 25., 2003, Balneário Camboriú. **Anais...** Itajaí, 2003. p. 03-05.

LOPES, S. I. G.; VOLKWEISS, S. J.; TEDESCO, M. J. A acumulação de matéria seca e absorção de nutrientes pela cultura de arroz irrigado. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.46, p.3-7, 1993.

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, p.273-278, 1994.

MAAS, E.V.; HOFFMAN, G.J. Crop salt tolerance - Current assessment. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Nova York, v.103, p.115-134, 1977.

MACHADO, M.O. Efeitos de calcário e de nitrogênio na produtividade de três safras sucessivas de arroz irrigado. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 12., 1983, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1983. p.124-128.

MACHADO, M.O.; TERRES, A. L. da S.; RIBEIRO, A. S.; GONÇALVES, A. R. Identificação de genótipos de arroz, tolerantes à salinidade da água de irrigação: do início da diferenciação da panícula à maturidade – 1986/87 a 1990/91. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 19., 1991, Balneário Camboriú. **Anais...** Itajaí, 1991. p.165-168.

MACHADO, S.L.O.; MARCHEZAN, E.; RIGHES, A.A.; CARLESSO, R.; VILLA, S.C.C.; CAMARGO, E.R. Consumo de água e perdas de nutrientes e de sedimentos na água de drenagem inicial do arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, p.65-71, 2006.

MACHADO, M.O.; TERRES, A.L. Tolerância de genótipos à salinidade do solo - safra 1994/1995. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 21., 1995, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1995. p. 48-50.

MACHADO, C. S.; NIENCHESKI, L. F. H. ; ATTISANO, K. K. A Lagoa dos Patos como recarga de um aquífero freático costeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 3., 2008, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, 2008. p. 673-684.

MANSOUR, M.M.F. Changes in growth, osmotic potential and cell permeability of wheat cultivars under salt stress. **Biologia Plantarum**, Amsterdam, v.36, p.429-434, 1994.

MARCOLIN, E.; ANGHINONI, I.; MACEDO, V. M.; GENRO JUNIOR, S. A.; VEZZANI, F. M. Salinidade da água na cultura do arroz no Rio Grande do Sul. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.53, p.27-38, 2005.

MARCOLIN, E.; MACEDO, V.R.M. Cultivares de arroz e a salinidade da água de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 2.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 24., Porto Alegre, 2001. **Anais...** Porto Alegre, 2001. p.229-231.

MARCOLIN, E.; MACEDO, V. R. M. Consumo de água em três sistemas de cultivo de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11., Fortaleza, 2001. **Anais...** Fortaleza, 2001. p. 59-63.

MARCOLIN, E; MACEDO, V. R. M.; GENRO JUNIOR, S. A. Volume e eficiência de uso de água para a cultura de arroz em função de época de início de irrigação por inundação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 5.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 27., Pelotas, 2007. **Anais...**Pelotas, 2007. v.1. p. 474-476.

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

MARTINS, L.R.; URIEN, C.M.; CORRÊA, I.C.S.; MARTINS, I.R. Late Quaternary processes along the Rio Grande do Sul Continental Shelf (Southern Brazil). **Notas Técnicas**, Porto Alegre, v.9, p.62-68, 1996.

McNEAL, B.L.; PEARSON, G.A.; BOWER, C.A. Effect of rice culture on the reclamation of sodic soils. **Agronomy Journal**, Madison, v.58, p.238-240, 1966.

MEDEANIC, S.; DILLENBURG, S.R. The early Holocene paleoenvironment history of the Tramandaí Lagoon (RS-Brazil). **REQUI/I CQPLI** , 5, Lisboa, 2001. **Actas...**Lisboa, 2001. p.402-405.

MELO, P.C.S.; ANUNCIÇÃO FILHO, C.J.; OLIVEIRA, F.J.; BASTOS, G.Q.; TABOSA, J.N.; SANTOS, V.F.; MELO, M.R.C.S. Seleção de genótipos de arroz tolerantes a salinidade na fase de germinação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, p.58-64, 2006.

MELO, P.C.S.; ANUNCIÇÃO FILHO, C.J.; TABOSA, J.N.; OLIVEIRA, F.J.; BASTOS, G.Q.; SANTOS, V.F.; MELO, M.R.C.S. Seleção de genótipos de arroz tolerantes a salinidade durante a fase vegetativa. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.35, p.361-365, 2004.

MINOLTA CAMERA Co., Ltda. **Manual for chlorophyll meter SPAD 502**. Osaka: Minolta. Radiometric Instruments Divisions, 1989. 22 p.

MÖLLER JR., O.O.; CASTAING, P.; SALOMON, J.C.; LAZURE, P. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. **Estuaries**, [s.l.], v.24, p.297-311, 2001.

MÖLLER JR., O.O.; LORENZZETTI, J.A.; STECH, J.L.; MATA, M.M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. **Continental Shelf Research**, Amsterdam, v.16, p.335-351, 1996.

MONTEITH, J.L. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Journal of Agricultural Meteorology**, Tóquio, v.68, p.213-220, 1994.

MOTA, F.S. Disponibilidade de radiação solar e risco de frio no período reprodutivo do arroz irrigado em diferentes regiões do Rio Grande do Sul. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.48, p.8-10, 1995.

MOTA, F. S.; ALVES, E. G. P.; BECKER, C. T. Informação climática para planejamento da necessidade de água para irrigação do arroz no Rio Grande do Sul. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.43, p.3-6, 1990.

NGUYEN, H.T.T.; SUNG, S.I.; KOBAYASHI, K.; USUI, K. Regulation of ammonium accumulation during salt stress in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. **Plant Production Science**, Tóquio, v.8, p.397-404, 2005.

NIENCHESKI, L.F.H.; WINDOM, H.L.; MOORE, W.S.; JAHNKE, R.A. Submarine groundwater discharge of nutrients to the ocean along a coastal lagoon barrier, Southern Brazil. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v.106, p.546-561, 2007.

OBATA, T.; KITAMOTO, H.K.; NAKAMURA, A.; FUKUDA, A.; TANAKA, Y. Rice shaker potassium channel OsKAT1 confers tolerance to salinity stress on yeast and rice cells. **Plant Physiology**, Waterbury, v.144, p.1978-1985, 2007.

OLIVEIRA, C. F. **Censo da Lavoura de Arroz Irrigado do Rio Grande do Sul - safra 2004/05**. Porto Alegre: Dipapel Indústria Gráfica, 2006. v. 1. 122 p.

OOKAWA, T.; NARUOKA, Y.; YAMAZAKI, T.; SUGA, J.; HIRASAWA, T. A comparison of the accumulation and partitioning of nitrogen in plants between two rice cultivars, Akenohoshi and Nipponbare, at the ripening stage. **Plant Production Science**, Tóquio, v.6, p.172-178, 2003.

OSTER, J.D.; HOFFMAN, G.J.; ROBINSON, F.E.. Management alternatives: crop, water and soil. **California Agriculture**, Oakland, v.36, p.29-32, 1984.

PEARSON, G.A. Factors influencing salinity of submerged soils and growth of Caloro rice. **Soil Science**, Filadélfia, v.87, p.198-206, 1959.

PEREIRA, R.; SCHÄFER, A.E.; WÜRDIG, N.L. Aplicabilidade de métodos de sensoriamento remoto na avaliação e monitoramento do estado trófico de lagoas costeiras do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis, 2007. **Anais...Florianópolis**, 2007. p.3513-3520.

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. **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa, 2004. p.75-96.

PONNAMPERUMA, F.N. **Some aspects of the physical chemistry of paddy soils**. In: PROCEEDINGS OF SYMPOSIUM ON PADDY SOIL. Pequim: Science Press, 1981. p.59-94.

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

PULVER, E.; CARMONA, L.C.; CARMONA, F.C. Tratamento de sementes como estratégia de manejo para altas produtividades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., Santa Maria, 2005. **Anais...**Santa Maria, 2005. v.2. p.129-131.

QADAR, A. Potassium status of the rice shoot as Index for salt tolerance. **Indian Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v.3, p.388-393, 1988.

QUEENSLAND NATURAL RESOURCES, MINES AND ENERGY (QNRNE) - **Water for profit**: Ensuring an acceptable level of salts in crop zone. Brisbane, 2004. 3 p.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, US : Department of Agriculture, 1954. 160 p.

RODRIGUES, L.N.; FERNANDES, P.D.; GHEYI, H.R.; NERY, A.R.; CORREIA, K.G. Produção de arroz em condições de salinidade a partir de mudas formadas com e sem estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, p.95-100, 2005.

RODRIGUES, L.N.; FERNANDES, P.D.; GHEYI, H.R.; VIANA, S.B.A. Germinação e formação de mudas de arroz irrigado sob estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, p.397-403. 2002.

ROSOLEM, C. A.; GARCIA, R.A.; FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J. C. Lixiviação de K no solo de acordo com suas doses aplicadas sobre palha de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.813-819, 2006.

RUIZ, H.A.; SAMPAIO, R.A.; OLIVEIRA, M.; VENEGAS, V.H.A. Características químicas de solos salino-sódicos submetidos a parcelamento da lâmina de lixiviação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, p.1119-1126, 2004.

SANTOS, A.B.; FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, p.12-16, 2002.

SCHOENFELD, R.; MARCOLIN, E.; GENRO JR, S.A.; MACEDO, V.R.M.; ANGHINONI, I. Crescimento do arroz em função da salinidade da água de irrigação e da solução dos solos em torno da Laguna dos Patos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 5.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 27., Pelotas, 2007. **Anais...**Pelotas, 2007. p.414-415.

SHANNON, M.C.; RHODES, J.D.; DRAPER, J.H.; SCARDACI, S.C.; SPYRES, M.D. Assessment of salt tolerance in rice cultivars in response to salinity problems in California. **Crop Science**, Madison, v.38, p.394-398, 1998.

SHONJANI, S. **Salt sensitivity of rice, maize, sugar beet, and cotton during germination and early vegetative growth**. 2002. 157 f. Tese (Doutorado) - Institute of Plant Nutrition, Faculty of Agricultural and Nutritional Sciences Justus Liebig, University Giessen, Giessen, 2002.

SILVA, E.I.L. Quality of irrigation water in Sri Lanka – status and trends. **Asian Journal of Water, Environment and Pollution**, Amsterdam, v.1, p.5-12, 2004.

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.

SINGH, M.P.; SINGH, D.K.; RAI, M. Assessment of growth, physiological and biochemical parameters and activities of antioxidative enzymes in salinity tolerant and sensitive basmati rice varieties. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Hoboken, v.193, p.398-412, 2007.

SLATON, N.A.; DUNN, D.; PUGH, B. Potassium nutrition of flood-irrigated rice. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v.88, p.20-22, 2004.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 6 ed. Ames: Iowa State University. 1967. 593 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.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI. **Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Santa Maria, 2005. 159 p.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI. **Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Porto Alegre, 2010. 188 p.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Emater/RS : UFRGS, 2002. 107 p.

STULP, V.; MATUELA, J.; CARMONA, L.; FERRUGEM, G. Dimensionamento econômico de tratores para a lavoura de arroz irrigado. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v.35, p.45-61,1997.

SULTANA, N.; IKEDA, T.; ITOH, R. Effect of NaCl salinity on photosynthesis and dry matter accumulation in developing rice grains. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v.42, p.211-220, 1999.

SWAROWSKY, A.; RIGHES, A.A.; MARCHEZAN, E.; RHODEN, A.C.; GUBIANI, E.I. Concentração de nutrientes na solução do solo, sob diferentes manejos do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, p.344-351, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 3.ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. 798p.

TEDESCO, J. M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEM, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

TEO, Y.H.; BEYROUTI, C.A.; NORMAN, R.J.; GBUR, E.E. Nutrient uptake relationship to root characteristics of rice. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.171, p.297-302, 1995.

TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. **Annals of Botany**, Oxford, v.91, p.503-527, 2003.

TOLDO JR, E.E.; AYUP-ZOUAIN, R.N.; CORRÊA, I.C.S.; DILLENBURG, S.R. Barra falsa: hipótese de um paleocanal holocênico de comunicação entre a Laguna dos Patos e o Oceano Atlântico. **Pesquisas**, Porto Alegre, v.18, p.99-103, 1991.

TOLDO JR., E. E.; DILLENBURG, S. R.; CORRÊA, I. C. S.; ALMEIDA, L. E. S. B. Holocene Sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Coastal Research**, Falmouth, v.16, p.816-822, 2000.

TRAVESSAS, F.A. **Estratigrafia e evolução no Holoceno Superior da barreira costeira entre Tramandaí e Cidreira (RS)**. 2003. 38f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

UNGAR, I.A. **Ecophysiology of Vascular Halophytes**. Boca Raton: CRC Press, 1991. 108 p.

UNITED NATIONS FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **20 things to know about the impact of salt water on agricultural land in Aceh Province**. Disponível em: <http://www.fao.org/ag/tsunami/docs/saltwater-guide.pdf>. Acesso em: 02 jan.2008.

VAZ, A.C.; MÖLLER JR, O.O.; ALMEIDA, T.L. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. **Atlântica**, Rio Grande, v.28, p.13-23. 2006.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J. Geologia costeira do Rio Grande do Sul. **Notas Técnicas**, Porto Alegre, v.8, p.1-45, 1995.

VITTI, G.C.; HOLANDA, J.S.; CERQUEIRA LUZ, P.H.; HERNANDEZ, F.B.T.; BOARETTO, A.E.; PENTEADO, S.R. Fertirrigação, condições e manejo. In: FERTILIZANTES: insumo básico para agricultura e combate à fome. REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21., Petrolina, 1995. **Anais...**Petrolina, 1995. p.195-271.

ZENG, L.; POSS, J.A.; WILSON, C.; DRAZ, A.S.E; GREGORIO, G.B.; GRIEVE, C.M. Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by physiological characters. **Euphytica**, Amsterdam, v.129, p.281-292, 2003.

ZENG, L.; SHANNON, M.C. Salinity effects on seedling growth and yield components of rice. **Crop Science**, Madison, v.40, p.996-1003, 2000.

ZENG, L.; SHANNON, M.C.; LESCH, S.M. Timing of salinity stress affects rice growth and yield components. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.48, p.191-206, 2001.

ZHOU, G.; MA, B.L., LI, J.; FENG, C.; LU, J.; QIN, P. Determining salinity threshold level for castor bean emergence and stand establishment. **Crop Science**, Madison, v.50, p.2030-2036, 2010.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of some physical properties of the soil. In: HILL, D. (ed.) **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319-344.

WELFARE, K.; FLOWERS, T.J.; TAYLOR, G.; YEO, R. Additive and antagonistic effects of ozone and salinity on the growth, ion contents and gas exchange of five varieties of rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental Pollution**, Amsterdam, v.92, p.257-256, 1996.

WESCHENFELDER J.; MEDEANIC, S.; CORRÊA, I.C.S.; ALIOTTA, S. Holocene paleoinlet of the Bojuru region, Lagoa dos Patos, southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, Falmouth, v.24, p.99-109, 2008.

WINDOM, H.; NIENCHESKI, F. Biogeochemical processes in a freshwater-seawater mixing zone in permeable sediments along the coast of Southern Brazil. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v.83, p.121-130, 2003.

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