

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Área de Concentração: Solos



Tese

Irrigação por aspersão em arroz em função da tensão de água no solo

Marília Alves Brito Pinto

Pelotas, 2015

MARÍLIA ALVES BRITO PINTO

**IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO EM ARROZ EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE ÁGUA
NO SOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Doutor em Ciências (área do conhecimento: Solos).

Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Timm

Co-orientador (es): Pesq. Dr. José Maria Barbat Parfitt

Prof. Dr. Lessandro Coll Faria

Pelotas, 2015

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

P659i Pinto, Marília Alves Brito

Irrigação por aspersão em arroz em função da tensão de água no solo / Marília Alves Brito Pinto ; Luís Carlos Timm, orientador ; José Maria Barbat Parfitt, Lessandro Coll Faria, coorientadores. — Pelotas, 2015.

68 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2015.

1. Oriza sativa L. 2. Disponibilidade hídrica. 3. Produtividade. 4. Macronutrientes. 5. Sistema linear móvel. I. Timm, Luís Carlos, orient. II. Parfitt, José Maria Barbat, coorient. III. Faria, Lessandro Coll, coorient. IV. Título.

CDD : 633.18

Marília Alves Brito Pinto

Irrigação por aspersão em arroz em função da tensão de água no solo

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 09 de abril de 2015

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Carlos Timm (Orientador)
Doutor em Irrigação e Drenagem pela Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Eloy Antonio Pauletto
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo

Pesquisadora Dr^a Walkyria Bueno Scivittaro
Doutora em Ciências pela Universidade de São Paulo

Pesquisador Dr. João Batista Beltrão Marques
Doutor em Fitotecnia pela Universidade Federal de Pelotas

**Dedico este trabalho aos meus pais
Jesuíno (*in memoriam*) e Zeli e aos
meus irmãos Saulo e Mariane.**

Agradecimentos

À Deus que iluminou meus passos nessa caminhada.

Ao meu orientador Luís Carlos Timm pela orientação, pelos ensinamentos, oportunidades e amizade.

Ao Co-Orientador José Maria Barbat Parfitt pela orientação e cooperação na realização do trabalho, ensinamentos, oportunidades e amizade.

Ao Co-Orientador Lessandro Coll Faria pela cooperação na realização do trabalho.

À Universidade Federal de Pelotas pela oportunidade de realizar o curso de Pós-Graduação em Agronomia.

À Embrapa Clima Temperado pelo suporte técnico e estrutural para realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa.

À minha família base para eu buscar e alcançar meus objetivos.

À tia Cecília e Seu Pedro que me acolheram e me deram um lar nestes anos.

Aos amigos Séfora Barros, Leandro Neves e Cristiane Nascimento que mesmo longe se fizeram presentes me dando força e incentivo na caminhada.

À Luciana Gomes Castro que me orienta desde a Iniciação Científica, que me ajudou a descobrir e traçar o meu caminho profissional, que esteve sempre ao meu lado mesmo estando a 3000 km de distância, muito obrigada pelos ensinamentos, apoio e pela amizade.

Aos amigos da pós-graduação Alex Monteiro, Antony Winkler, Juliana Brito, Marcos Vale e Vairton Radmann, aprendi muito trabalhando e convivendo com vocês.

À amiga Gláucia Islabão pela atenção e cuidado, pela parceria nos estudos e trabalho, e pelo exemplo de determinação.

Aos amigos Fioravante Santos e Jacira Porto pela parceria no trabalho e nos estudos sempre enriquecida pela boa música e pela visão holística de mundo.

Ao amigo Jacir Chies por me apresentar o lado social da Agronomia, pelas oportunidades de trabalho, pelas discussões que me ensinaram muito e pela alegria do convívio.

À amiga Jaqueline Trombetta pelas horas de trabalho e estudo sempre acompanhadas por discussões científicas e filosóficas.

À amiga Lizete Stumpf pela companhia no trabalho e no estudo, pela compreensão, e amizade sincera nestes anos de convivência.

À amiga Marta Sória por me apresentar o lado ambiental da Agronomia em horas de trabalho e estudo sempre acompanhadas de boas histórias de vida.

À amiga Márcia Klee pelo ensino da língua inglesa e pelas lições de vida.

À amiga Patrícia Dupont por estar sempre presente nos melhores e piores momentos dessa jornada.

À amiga Renata Albert pela parceria no trabalho e nos estudos, sobretudo nas horas de análises químicas, e pelas horas de discussões científicas e psicológicas.

Aos professores Eloy Antonio Pauletto e Rita Damé pelos ensinamentos e amizade.

Aos colegas Guilherme Bretanha, Gabriela Santos e Jordano Ambus, pelo apoio na realização deste estudo.

Aos funcionários da Embrapa Clima Temperado, em especial Mikael Bueno Longaray e Moacir Rodrigues Furtado pela parceria, cooperação e suporte técnico, fundamentais à realização deste trabalho.

Aos funcionários, em especial Paulo, Rosane Guidotti e D. Ana, professores, colegas e amigos do Departamento de Solos/UFPel, que me acolheram tão bem. Aprendi muito com todos vocês nestes anos.

Resumo

PINTO, Marília Alves Brito Pinto. **Irrigação por aspersão em arroz em função da tensão de água no solo**. 2015. 68p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

O arroz é o alimento base para mais de metade da população mundial. As lavouras orizícolas são quase que na totalidade irrigadas por inundação, um sistema com elevada demanda hídrica. No intuito de diminuir o uso da água na lavoura de arroz produtores começaram a utilizar a irrigação por aspersão. No entanto, pouco se sabe a respeito da adaptação da cultura do arroz às condições aeróbicas, sobretudo sobre as necessidades hídricas reais da cultura, uma vez que no sistema de irrigação por inundação essa informação não é necessária. O objetivo deste estudo foi determinar a relação entre a produtividade do arroz e a disponibilidade hídrica no solo bem como o efeito de diferentes tensões de água no solo sobre o desempenho agrônômico da cultura do arroz. O experimento foi conduzido na Embrapa Clima Temperado, Estação Experimental de Terras Baixas (ETB) situado no município do Capão do Leão-RS. Nas safras 2011/2012, 2012/2013 e 2013/ 2014 em uma área irrigada por aspersão foram avaliados os seguintes manejos de irrigação: 10kPa- Irrigação com média da tensão de água no solo de 10 kPa, em todo o ciclo da cultura; 20kPa- Irrigação com média da tensão de água no solo de 20kPa, em todo o ciclo da cultura; 40kPa - Irrigação com a média da tensão de 40kPa, em todo o ciclo da cultura; 40/20kPa - Irrigação com a média da tensão de 40kPa, no período vegetativo, e 20kPa no período reprodutivo e 40/10kPa - Irrigação com a média da tensão de 40kPa, no período vegetativo, e 10 kPa no período reprodutivo. Para monitoramento da tensão de água no solo, em cada tratamento foram instalados sensores Watermark, na profundidade de 10cm. O ponto de instalação dos sensores corresponde ao centro de uma unidade experimental com área de 4m². Em cada unidade experimental foram determinados: a tensão de água no solo, atributos químicos e físicos do solo e as variáveis agrônômicas e de rendimento da cultura do arroz. Os resultados indicam que o aumento da tensão de água no solo diminui a produtividade do arroz irrigado, por aspersão. A tensão de água no solo de 10kPa, que por sua vez corresponde a capacidade de campo deste solo, é o valor adequado para o manejo da irrigação por aspersão na cultura do arroz variedade BRS Pampa, sobretudo no período reprodutivo. A variabilidade espacial da tensão de água no solo tem efeito na distribuição espacial da produtividade do arroz irrigado por aspersão. Quanto mais próximo de 40kPa for a tensão de água no solo menor a estatura das plantas e o número de grãos cheios por panícula. No entanto, esse efeito não foi verificado sobre o número de colmos por metro, sobre a massa de mil grãos, e sobre a esterilidade de espiguetas. A produtividade do arroz apresentou relação positiva com as variáveis microporosidade, fósforo e potássio disponível no solo; relação contrária foi verificada para a macroporosidade e a saturação por alumínio. A relação conjunta da tensão de água e de atributos físicos e químicos do solo determina a variabilidade na produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas no Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: *Oriza sativa* L.; disponibilidade hídrica; desempenho agrônômico; produtividade; macronutrientes; atributos físicos do solo; sistema linear móvel

Abstract

PINTO, Marília Alves Brito Pinto. **Sprinkler irrigation in rice as a function of soil water tension**. 2015. 68p. Thesis (Doctorate Degree em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

Rice is a basic food for more than half of world population. Rice crops are almost totally irrigated by flood, a system with high water demand. In order to decrease water use in rice crops, farmers start to adopt the sprinkler irrigation. However, there is little knowledge concerning the adaptation of rice crop to aerobic conditions, mainly about rice water needs, since this information wasn't necessary in flood irrigation. This work aimed to determine the relationship between rice yield and soil available water and the effect of different soil water tensions on rice crop agronomic performance. A field experiment was conducted at Embrapa Clima Temperado, Estação Experimental Terras Baixas (ETB) located in the municipality of Capão do Leão-RS. In the agricultural harvests 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014 in a sprinkler irrigated area, these irrigation management were evaluated: 10kPa- Irrigation when the average of the soil water tension was 10kPa, during all crop cycle; 20kPa- Irrigation when the average of the soil water tension was 20kPa, during all crop cycle; 40kPa - Irrigation when the average of the soil water tension was 40kPa, during all crop cycle; 40/20kPa - Irrigation in the vegetative stage, when the average of the soil water tension was 40kPa, and irrigation in the reproductive stage when the average of the soil water tension was 20kPa and 40/10kPa Irrigation in the vegetative stage, when the average of the soil water tension was 40kPa, and irrigation in the reproductive stage when the average of the soil water tension was 10kPa. For each treatment Watermark sensors were installed at a depth of 10cm to monitor the soil water tension. The sensor installation point corresponds to the center of an experimental unit whose area was 4m². In each experimental unit, soil water tension, chemical and physical soil attributes and the rice crop agronomic performance and yield were determined. The results showed that increasing soil water tension decreases sprinkler irrigated rice yield. Soil water tension of 10kPa, which corresponds to this soil field capacity, is the appropriate value for sprinkler irrigation management to rice crop, BRS Pampa variety, mainly in the reproductive period. The spatial variability of soil water tension has an effect on spatial distribution of the sprinkler irrigated rice yield. The closer to 40 kPa is the soil water tension smaller the plant height and the number of filled grains per panicle. However, no effect was observed on the number of stems per meter, 1000 grains weight, and spikelet sterility. The rice yield showed a positive relation with the variables microporosity, phosphorus and potassium available in the soil; an opposite behavior was found for macroporosity and aluminum saturation variables. The relationship between soil water tension and physico-chemical soil attributes is crucial to determine the variability of the rice yield irrigated by sprinkler in lowland areas in the Rio Grande do Sul state.

Keywords: *Oriza sativa* L.; available water; agronomic performance; yield; soil macronutrients; soil physical attributes; linear-move irrigation system

Sumário

1 Introdução	9
2 Revisão de literatura	11
2.1 A cultura do arroz	11
2.2 Irrigação da cultura do arroz.....	12
2.2.1 Irrigação do arroz e os atributos químicos e físicos do solo	15
2.3 Relação Solo-Água-Planta-Atmosfera.....	16
2.3.1 Tensão de água no solo e manejo da irrigação.....	17
2.3.2 Sensor Watermark®.....	18
2.3.3 Funções de produção na agricultura irrigada	19
3 Material e métodos.....	20
3.1 Caracterização da área experimental.....	20
3.2 Cultivo	20
3.3 Monitoramento da tensão de água no solo e irrigação.....	23
3.4 Atributos físicos e químicos do solo	26
3.5 Desempenho agrônomo e produtividade da cultura do arroz	26
3.6 Análises estatísticas	27
4 Resultados e discussão.....	29
4.1 Precipitação pluvial, temperatura média e umidade relativa do ar durante o ciclo da cultura do arroz	29
4.2 Tensão de água no solo e produtividade do arroz irrigado por aspersão.....	32
4.3 Tensão de água no solo, variáveis agrônomicas e componentes de rendimento	38
4.4 Produtividade do arroz e variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo.....	41
5 Conclusões.....	55
Referências	56
Apêndices.....	65

1 Introdução

O arroz é o alimento base para mais de metade da população mundial. O Brasil está entre os dez maiores produtores mundiais e a região Sul responde por mais de 60% da produção orizícola nacional, o que torna essa região relevante para a segurança alimentar brasileira. As áreas de produção de arroz são quase que na totalidade irrigadas por inundação, um sistema com elevada demanda hídrica e baixa eficiência. A busca por eficiência no uso da água na agricultura é uma realidade mundial e neste contexto a irrigação do arroz merece atenção.

Na busca por economia no uso da água na lavoura orizícola produtores da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, região onde há menor disponibilidade hídrica quando comparada a região orizícola do Sul do estado, e por conta do relevo mais ondulado o uso de água para irrigação por inundação do arroz é maior, começaram a utilizar a irrigação por aspersão. O uso de água observado, no sistema de pivô central segundo estimativas dos produtores, situa-se em torno de 550 mm por ciclo, enquanto nesse ambiente o sistema de inundação utiliza aproximadamente o dobro dessa quantidade. O aumento da eficiência do uso da água por si só representa uma grande vantagem do sistema, podendo, por exemplo, ser quase triplicada a área irrigada num sistema de produção arroz-soja, utilizando-se o mesmo volume de água que no sistema de irrigação por inundação contínua no arroz. A economia no uso da água deste método foi significativa e o método mostrou-se viável economicamente. Isso tem incentivado a expansão deste método de irrigação para lavouras de outras partes do estado, como, por exemplo, para as áreas de terras baixas da região Sul.

No entanto, com a troca do sistema de irrigação do arroz da inundação para aspersão todo o manejo da cultura sofre modificações, e pouco se sabe a respeito da adaptação da cultura às condições aeróbicas. Embora existam cultivares de arroz desenvolvidas para condições de sequeiro, cultivadas nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, os primeiros estudos conduzidos na região Sul mostraram que a produtividade de cultivares desenvolvidas para irrigação por inundação foi superior mesmo quando irrigadas por aspersão, por isso, um dos principais aspectos a ser considerado no sistema de irrigação por aspersão, é o conhecimento das necessidades hídricas reais da cultura, uma vez que no sistema de irrigação por inundação essa informação não é necessária.

Assim o objetivo principal foi determinar a relação entre a produtividade do arroz e a disponibilidade hídrica no solo bem como o efeito de diferentes tensões de água no solo sobre o desempenho agrônômico da cultura do arroz. Neste contexto os objetivos específicos foram:

- a) Determinar as tensões de água no solo mais adequadas ao desenvolvimento da cultura do arroz nas fases vegetativa e reprodutiva;
- b) Verificar a influência da variabilidade espacial da tensão de água no solo na produtividade do arroz;
- c) Avaliar o efeito da disponibilidade hídrica no solo sobre as características agrônômicas mais importantes para produção do arroz;
- d) Verificar o efeito conjunto da tensão de água no solo e dos atributos físicos e químicos do solo sobre a produtividade do arroz.

2 Revisão de literatura

2.1 A cultura do arroz

A cultura do arroz irrigado foi introduzida no Brasil pelos imigrantes europeus no final do século XIX. As primeiras cultivares (tradicionais) utilizadas no Rio Grande do Sul e Santa Catarina pertencem à subespécie japônica e caracterizavam-se por apresentar plantas de porte alto, com folhas largas e decumbentes, crescimento exuberante, baixa produtividade e ciclo vegetativo médio a longo. As primeiras cultivares de porte baixo (modernas) foram semeadas no Rio Grande do Sul a partir de 1973, mas somente 10 anos após, com o lançamento de genótipos que combinavam alto potencial produtivo e boa qualidade dos grãos, passaram a ocupar áreas expressivas. Diferentemente das anteriores, essas cultivares pertencem à subespécie índica. Apresentam porte baixo, folhas eretas, alta capacidade de perfilhamento, alto potencial produtivo e grãos longo-finos (SOSBAI, 2012).

O arroz se adapta a diferentes condições de solo e clima, sendo a espécie que apresenta maior potencial para o combate à fome no mundo (EMBRAPA, 2005). O arroz contribui aproximadamente com 21%, 14% e 2% do consumo mundial de energia, proteínas e lipídios, respectivamente (KENNEDY e BURLINGAME, 2003). Cerca de 150 milhões de hectares de arroz são plantados anualmente no mundo, produzindo 750 milhões de toneladas, dos quais 75% dessa produção é advinda do sistema de cultivo irrigado (FAO, 2015).

No Brasil o consumo per capita de arroz situa-se em 45 kg/ano (EMBRAPA, 2014). O país é o nono maior produtor mundial (FAO, 2015) e os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina são responsáveis por aproximadamente 70% da produção nacional (IBGE, 2015). As projeções de produção e de consumo de arroz mostram que o Brasil vai colher 14,12 milhões de toneladas de arroz na safra 2019/2020, o que equivale a um aumento anual da produção de 1,15% nos próximos dez anos (MAPA, 2013).

No RS, estima-se que o arroz apresente atualmente um valor bruto de produção de cinco bilhões de reais, o que representaria mais do que 3 % de ICMS e 2,74 % do PIB. Quanto ao aspecto social, a importância do arroz é representada pela possibilidade de ser cultivado tanto em pequenas como em médias e grandes áreas. Esta flexibilidade da cultura permite que a agricultura familiar e a empresarial

se desenvolvam e utilizem o arroz como alternativa para geração de renda e de empregos. Atuam na lavoura de arroz em torno de 37,2 mil trabalhadores, sendo 27% temporários. Na média do Rio Grande do Sul, cada trabalhador atende 27,8ha de arroz cultivado. Na metade sul do Rio Grande do Sul, o arroz irrigado é a principal atividade econômica, chegando a representar mais de 50% do valor bruto da produção para diversos municípios (SOSBAI, 2014).

2.2 Irrigação da cultura do arroz

A média mundial de utilização de água pelos setores agrícola, industrial e doméstico corresponde, respectivamente, a 70%, 22% e 8%, considerando o setor agrícola na média brasileira, esse número cai para 60% (FAO/AQUASTAT, 2015) e no Rio Grande do Sul cresce para 83,5%, pois é o Estado que mais arroz produz no País, utilizando o sistema de cultivo irrigado com inundação contínua elevando seu índice de uso de água na agricultura (NORONHA, 2006).

A quantidade de água realmente requerida pela cultura do arroz irrigado por inundação é aquela usada pelas plantas para crescer e transpirar. Entretanto, uma certa quantidade adicional é perdida como evaporação da superfície solo-água, fluxo lateral e percolação e, eventualmente, por escoamento por cima das taipas. Essas perdas podem ser minimizadas pelo manejo cuidadoso da irrigação, mas não podem ser eliminadas e são, portanto, tratadas como requerimento (STONE, 2006).

O consumo médio de água pela lavoura arroseira no RS é historicamente de $2 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ($17,3 \text{ mm dia}^{-1}$) com uma eficiência de irrigação de 40 a 45% que, em condições adequadas de solo, relevo e manejo da água pode atingir 60% (EMBRAPA, 2005).

No sistema de irrigação por inundação a eficiência do uso da água depende das características físicas do solo e topográficas, de um adequado planejamento no que diz respeito à locação, construção de drenos e canais de irrigação e de cuidados operacionais. Solos com textura mais leve e com maior gradiente de declividade normalmente requerem maior quantidade de água. Da mesma forma, a demanda hídrica é maior em anos com temperaturas elevadas e umidade relativa do ar baixa ou com baixa precipitação. Para suprir a necessidade de água do arroz, no sistema inundado, estima-se que venha sendo utilizado, atualmente, um volume de água médio de 8 a 10 mil $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$, para um período médio de irrigação de 80 a 100

dias (SOSBAI, 2012).

Petrini et al. (2013), em experimentos realizados em Pelotas e Bagé, no Rio Grande do Sul, determinaram o uso de 9.489 e 12.127m³ de água, respectivamente. Conforme registros no distrito da irrigação do arroio do Duro no município de Camaquã–RS, com aproximadamente 40 mil hectares irrigadas o uso da água por hectare é de aproximadamente 10.500m³ (AUD, 2013).

Como exemplo do consumo excessivo de água em lavouras inundadas, o Rio Grande do Sul cultiva anualmente ao redor de um milhão de hectares de arroz sob inundação. Tomando-se como a necessidade de água média estimada por ciclo de arroz de 12.000m³ha⁻¹ (STEINMETZ, 2004), o consumo de água em lavouras de arroz somente no Rio Grande do Sul é de 12 bilhões de metros cúbicos em cada estação de cultivo. Caso apenas 10% desta área fosse convertida da inundação tradicional para pivôs centrais, por exemplo, a economia de água em lavouras de arroz seria de 600 milhões de metros cúbicos em um único ciclo de cultivo (ao redor de três meses de irrigação). Este volume de água economizado em três meses, ao se converter apenas 10% da área sem prejuízos para a produtividade, seria suficiente para abastecer por seis anos a cidade de Porto Alegre, cujo consumo de água é de 99,7 milhões de metros cúbicos por ano.

Estudos têm demonstrado que reduzir a altura da lâmina de água, manter o solo saturado ou inundação intermitente pode economizar 30 a 75% da água de irrigação, sem diminuições substanciais na produtividade, em comparação com a inundação contínua (STONE, 2006).

Marcolin & Macedo (2001) mostraram que é possível obter altos rendimentos de grãos de arroz com o uso de lâmina de 8.000m³ (água captada de mananciais + água de precipitação pluvial), desde que a área da lavoura seja nivelada e que não haja perdas na condução e na distribuição de água da fonte. Marcolin et al. (2011) determinaram o uso da água de quatro lavouras de arroz, em duas safras agrícolas, conduzidas no sistema de pré-germinado, como variando de 9.300 e 11.200m³, no entanto, nesses valores estão incluídas as chuvas ocorridas, já que a água bombeada dos mananciais não superou 6.500m³.

Scivittaro et al. (2010) avaliaram três épocas de supressão da irrigação para o arroz (estádios de grão leitoso, grão pastoso e maturação de colheita) e um sistema de irrigação por inundação intermitente programado, com supressão da irrigação no final da fase vegetativa e, definitivamente, no estágio de grão leitoso,

em duas safras 2007/08 e 2008/09. O sistema de irrigação intermitente e a antecipação de sua supressão para os estádios de grão pastoso e leitoso reduziram, em média, o período de irrigação em 32, 16 e 9 dias, respectivamente, com correspondentes economias de água de 27,9%; 17,6% e 11,6%, relativamente à manutenção da irrigação até a maturação de colheita, sem afetar o rendimento de grãos.

Por conta dos elevados volumes de água utilizados na irrigação por inundação do arroz, em todo o mundo, estudos têm sido conduzidos para avaliar a adaptação da cultura do arroz às condições aeróbicas do solo, bem como a utilização de outros sistemas de irrigação.

Kato & Okami (2011) em um estudo realizado no Japão, avaliaram a morfologia das raízes e as relações hídricas de plantas de arroz de alto rendimento em condições aeróbicas, e concluíram que para que as cultivares mantenham sua produtividade em condições aeróbicas é necessário o melhoramento genético para melhorar a ramificação lateral das raízes e o enraizamento profundo, que foram menores quando o arroz foi cultivado em condições aeróbicas.

Villa et al. (2011) avaliaram o desempenho de 45 híbridos de arroz em condições de estresse hídrico nas Filipinas no intuito de selecionar os melhores materiais para plantio em áreas de várzea propensas à seca. Adekoya et al. (2014) avaliaram a economia do uso da água e arroz irrigado por gotejamento na China, enquanto neste método a lâmina total de irrigação foi de $3000\text{m}^3\text{ ha}^{-1}$, no método convencional irrigado por inundação foram utilizados $11250\text{m}^3\text{ ha}^{-1}$, sendo que as produtividades no sistema de irrigação localizada variaram entre 76 e 95% das obtidas na irrigação por inundação.

Uma alternativa de produção com significativa economia de água no cultivo do arroz, adotada por alguns produtores, é o método de irrigação por aspersão. Na década de 90 a irrigação aspersão começou a ser considerada no cultivo de arroz nos Estados Unidos, no intuito de reduzir o uso da água e oferecer alternativas de cultivo nas áreas onde a irrigação por inundação era predominante (Westcott & Vines, 1986). Vories et al. (2013) avaliaram a produção do arroz irrigado por pivô central em Arkansas (EUA), as lâminas totais de irrigação foram de 356 e 503mm para os anos de 2009 e 2010, respectivamente. Segundo os mesmos autores em lavouras irrigadas por inundação os volumes totais de água utilizados foram de até 1168 (2009) e 1880mm (2010), Kato & Katsura (2014) apresentam dados de 4 áreas

de arroz irrigado por aspersão no Japão, na safra 2009, o uso total de água (irrigação + precipitação pluvial) foi em média de 800mm, e a produtividade média acima de 9,0t ha⁻¹.

2.2.1 Irrigação do arroz e os atributos químicos e físicos do solo

A manutenção de uma lâmina de água sobre a superfície do solo influencia tanto a fisiologia das plantas de arroz, como provoca alterações em atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Em sua maioria, esses efeitos são benéficos à planta de arroz (GOMES et al., 1999).

A alta disponibilidade de água no solo saturado possibilita que a planta de arroz mantenha um potencial de água nas folhas consideravelmente maior do que conseguiria no solo em condições de sequeiro. Isso favorece a taxa fotossintética nas folhas e conseqüentemente a acumulação de massa e a produção de carboidratos. É importante frisar que esse efeito não depende da presença de lâmina sobre a superfície do solo, basta que o solo esteja saturado (GOMES et al., 1985)

A química dos solos alagados é distinta daquela estabelecida sob condições de aerobiose. Alguns nutrientes que não se encontram prontamente disponíveis em solos drenados estão frequentemente disponíveis sob condições de inundação. A disponibilidade de fósforo é garantida pela inundação devido à uma combinação de fatores: a) liberação do fósforo da matéria orgânica; b) redução dos fosfatos férricos (Fe³⁺) a formas mais solúveis (Fe²⁺); c) hidrólise de fosfatos de ferro e de alumínio, causada pelo aumento do pH dos solos ácidos, e d) liberação do fósforo adsorvido nas argilas ou nos hidróxidos de ferro (Fe³⁺) e de alumínio (Al³⁺), por intercâmbio aniônico (PONNAMPERUMA, 1972; 1977; SANCHEZ, 1980). A disponibilidade de potássio também aumenta com o alagamento, como consequência do aumento de sua difusão, através da hidratação contínua e do deslocamento de potássio (K⁺) dos sítios de troca para a solução, pelos cátions NH₄⁺, Fe²⁺ e Mn²⁺ (MACHADO, 1985) e devido à liberação de potássio das frações não-trocável e estrutural (CASTILHOS et al., 1999).

A produção de arroz em sistema irrigado por aspersão requer, porém, atenção especial quanto a alguns atributos químicos e físicos do solo, uma vez que em ambiente aeróbico não ocorrem várias modificações causadas pela inundação

do solo, que beneficiam a cultura do arroz. Isto porquê a inundação eleva o pH de solos ácidos a valores próximos à neutralidade e altera o equilíbrio de alguns elementos e compostos, em resposta a transformações físicas, químicas e biológicas (Sousa et al., 2006; Ranno et al., 2007). Desta forma, alguns nutrientes, que não se encontram em formas prontamente disponíveis em um ambiente bem drenado, tornam-se disponíveis sob condições de submersão (Scivittaro & Machado, 2004). Outros, porém, têm sua disponibilidade reduzida ou ficam mais sujeitos a perdas (Sousa et al., 2006).

Quando o arroz é irrigado por inundação, os atributos físicos do solo não são limitantes ao cultivo, pois o solo encontra-se em forma “fluida”. No entanto, conforme Bamberg et al. (2009), quando solos de arroz são drenados para o cultivo de sequeiro, devido às suas condições físicas naturalmente desfavoráveis, há dificuldade para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

2.3 Relação Solo-Água-Planta-Atmosfera

O suprimento de água para uma cultura resulta de interações que se estabelecem ao longo do Sistema Solo-Planta-Atmosfera. As influências recíprocas entre esses componentes básicos tornam o sistema dinâmico e fortemente interligado, de tal forma que a condição hídrica da cultura dependerá sempre da combinação desses três segmentos (SANTOS; CARLESSO, 1998).

A água é um dos principais constituintes das células das plantas e está envolvida como reagente em processos como fotossíntese e hidrólise, nos processos térmicos atua como regulador de temperatura e sua incompressibilidade é importante na sustentação das plantas (JONES, 1992). As plantas absorvem e perdem água continuamente, um pequeno desequilíbrio nesse fluxo de água pode causar déficits hídricos e mau funcionamento de inúmeros processos celulares. (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A transferência da água da superfície terrestre para a atmosfera, passando do estado líquido ao estado gasoso, processa-se através da evaporação direta e por transpiração das plantas e dos animais (PEREIRA et al., 2000). A transpiração das plantas varia de acordo com as condições climáticas e com a densidade das raízes e sua eficiência como superfície de absorção, o que depende da condutividade hidráulica das raízes e do solo (KRAMER; BOYER, 1995).

A condutividade hidráulica do solo define a facilidade com que a água se move no solo e é dependente da umidade, sendo maior no solo saturado, já que todos os poros estão preenchidos com água e atuam como condutores, quando saturado quanto maiores os poros do solo maior a condutividade (JARRAMILLO, 2002).

Primeiramente as raízes removem a água dos macroporos, onde seu potencial é relativamente alto e a medida que esses poros são esvaziados, as raízes absorverão água de poros progressivamente menores nos quais o potencial mátrico é mais baixo e as forças de atração da água às superfícies sólidas são maiores. Assim, à medida que o solo seca, se tornará progressivamente mais difícil para as plantas remover água do solo a uma taxa suficiente para suprir suas necessidades (BRADY; WEIL, 1999).

O movimento da água do solo para a atmosfera através da planta depende das características físicas do solo. Os solos arenosos apresentam grandes espaços porosos ou canais entre as partículas; solos argilosos apresentam partículas e poros menores que dificultam a drenagem e retêm a água com mais energia. Essas características interferem na capacidade de retenção de água no solo sendo ela maior em solos de textura argilosa e menor em solos de textura arenosa (TAIZ; ZEIGER, 2004).

2.3.1 Tensão de água no solo e manejo da irrigação

A máxima capacidade de retenção de água no solo é denominada capacidade de campo (CC), correspondendo a umidade do solo na qual a drenagem interna praticamente cessa, nessas condições a água está retida pelo solo a tensões entre 10 e 33kPa. A medida que a tensão de água no solo aumenta, a taxa de absorção de água pelas plantas não será adequada para a manutenção de suas necessidades e elas poderão murchar durante o dia. Posteriormente, a planta permanecerá murcha durante à noite e o dia, embora ainda não estejam mortas, as plantas estarão permanentemente murchas. O conteúdo de água no solo neste estágio é chamado de ponto de murcha permanente (PMP) e, na literatura, assume-se que seja a quantidade de água retida pelo solo a uma tensão de 1500kPa (BRADY; WEIL, 1999).

No entanto, para alguns pesquisadores existe um “ponto crítico” entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente e nesta umidade a planta já pode sofrer deficiência de água e redução de crescimento. Esta umidade crítica vai depender tanto de atributos do solo quanto de características das plantas (REICHARDT; TIMM, 2012).

O monitoramento do conteúdo de água no solo é um importante componente do manejo da água para a irrigação. Para monitoramento da água no solo há diversas metodologias, sendo a medida da tensão de água no solo uma das mais utilizadas (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Para cultivo do arroz irrigado por aspersão em áreas de várzea pouco se sabe sobre o manejo da irrigação. Em trabalhos realizados em solos de terra alta Stone et al. (2006) recomendam a instalação de tensiômetros na profundidade de 15cm e 30cm, cuja tensão máxima não pode ultrapassar a 25kPa. No entanto, estes valores podem variar de acordo com a fase da cultura, atributos físicos do solo entre outros, justificando, desta forma, a necessidade de estudos sobre o manejo adequado da água para a cultura do arroz quando irrigada por aspersão.

2.3.2 Sensor Watermark®

O Watermark® é um sensor constituído por uma resistência elétrica utilizada para medir a tensão de água no solo, em função das mudanças na umidade do solo, a tensão varia e com esta o valor da resistência elétrica. Esse sensor consiste de um par de eletrodos altamente resistentes a corrosão. Uma vez instalado no perfil do solo, uma corrente elétrica é paliçada ao sensor a fim de obter o valor de resistência elétrica correlacionado com a tensão de água no solo (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Existe uma dependência entre a estimativa da tensão de água do solo do Watermark® com a temperatura do solo, por isso é necessário o conhecimento da temperatura do solo para se melhorar a acurácia da estimativa da tensão de água no solo (Shock, 2003). Para tal, em cada data logger são conectados sensores Watermark® e um sensor de temperatura do solo.

Segundo Shock & Wang (2011) sensores de matriz granular, como o Watermark®, tem baixo custo, não necessitam de manutenção e são fáceis de ler manualmente ou por meio da automação utilizando data loggers. Normamente não é

necessária a calibração do sensor para cada local e eles são utilizáveis na maioria dos tipos de solo.

2.3.3 Funções de produção na agricultura irrigada

A resposta das culturas com relação ao uso da água é conhecida quando se quantifica o esperado aumento na produtividade em função do aumento da quantidade de água aplicada. Dentro desse contexto, há inúmeros modelos matemáticos aplicados para avaliar essa resposta, alguns deles relacionando evapotranspiração e cultura e outros relacionando água aplicada e cultura (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Quando a evapotranspiração atual é menor que a evapotranspiração máxima, ocorre um déficit de evapotranspiração com consequente redução na produtividade da cultura. Os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento das culturas variam com a espécie e o estágio fenológico que ocorre. Para espécies de hábito de crescimento determinado, isto é, aquelas que após o florescimento não produzem mais folhas, os estádios fenológicos são geralmente dependentes entre si e os efeitos do déficit hídrico são diferentes segundo o estágio que ocorre. Existem estádios que são mais sensíveis ao déficit que outros, no entanto a natureza da dependência entre os estádios, relativamente ao efeito do déficit, ainda não foi claramente explicada (Frizzone et al., 2005).

Segundo Frizzone et al. (2005) modelos aditivos de função de produção (HOWELL; HILLER, 1975; STEWART et al., 1977; SUDAR et al., 1981) são mais apropriados para os casos em que o déficit entre estádios é independente. Já os modelos multiplicativos (JENSEN, 1968; HANKS, 1974; MINHAS et al., 1974; RAO et al., 1988) são mais indicados quando existe dependência entre os efeitos dos déficits hídricos ocorridos em diferentes estádios fenológicos.

O modelo proposto por Jensen (1968) considera que a produtividade pode ser relacionada às condições hídricas das diferentes fases do ciclo fenológico. Neste modelo a produtividade relativa é dada pelo produto dos valores da evapotranspiração relativa em cada fase do ciclo fenológico.

3 Material e Métodos

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, no município de Capão do Leão, Rio Grande do Sul. A área experimental (Figura 1) é irrigada por um sistema mecanizado de aspersão do tipo linear móvel, marca Valley composto de 5 vãos, mais um vão em balanço, equipado com válvulas reguladoras de pressão (10kPa), emissores de água marca Senninger, modelo I-Wob. A área foi dividida em parcelas dispostas em faixas, nas quais foram adotados diferentes manejos da irrigação baseado na tensão de água no solo.



Figura 1- Vista geral da área experimental com sistema mecanizado de aspersão do tipo linear móvel.

O solo da área é um Planossolo Háplico (SANTOS et al., 2006), característico das terras baixas tradicionalmente cultivados com arroz irrigado por inundação.

O clima da região é, segundo a classificação Köppen é "Cfa", ou seja, temperado úmido com verões quentes. A temperatura e precipitação média anual são respectivamente, 17,9°C e 1500mm, respectivamente (EMBRAPA, 2014).

3.2 Cultivo

O experimento foi conduzido nas safras agrícolas 2011/2012 e 2012/2013 e 2013/2014. Em cada ano o cultivo foi realizado em parcelas diferentes, na área irrigada pelo sistema linear móvel, evitando assim o cultivo de arroz sobre arroz. Nas

duas primeiras safras utilizou-se o sistema de cultivo de semeadura direta. Na safra 2013/1014 utilizou-se o sistema de cultivo convencional, pois foi necessário o preparo do solo para controle das plantas daninhas. No período antecedente as safras as áreas foram cultivadas com pastagem de inverno azevém (*Lolium multiflorum*) e cornichão (*Lotus corniculatus*). Para dessecar a área antes da semeadura foi aplicado glifosato na dose de 4l ha⁻¹.

A adubação foi realizada com base na análise química do solo e as recomendações para arroz irrigado por inundação da SOSBAI (SOSBAI, 2010; SOSBAI, 2012), pois não existem recomendações para o cultivo do arroz irrigado por aspersão. Na tabela 1 estão apresentados os resultados das análises químicas do solo para cada safra.

Tabela 1- Resultado das análises químicas do solo utilizadas para recomendação da adubação nas três safras do experimento.

Atributos	Safras		
	2011/2012	2012/2013	2013/2014
pH (H ₂ O)	5,4	5,5	5,8
pH (SMP)	6,3	6,4	6,8
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,0	2,7	1,8
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,1	0,1	0,0
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,0	2,0	2,3
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,8	1,0	0,7
P (mg dm ⁻³)	5,0	6,1	4,2
K (cmol _c dm ⁻³)	0,1	0,1	0,1
Na (cmol _c dm ⁻³)	0,1	0,1	0,1
CTCe (cmol _c dm ⁻³)	3,1	3,3	3,2
CTCpH7 (cmol _c dm ⁻³)	5,0	5,8	5,0
V (%)	60	54,0	64,0
Classe textural	4	4	4
Argila (%)	16	16,0	15,0
MO (%)	1,5	1,5	1,5

CTCe= capacidade de troca de cátions efetiva; CTCpH7= capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V= saturação de bases; MO= matéria orgânica (%).

Em todas as safras utilizou-se a cultivar BRS Pampa. Esta cultivar de arroz originou-se do cruzamento envolvendo os parentais Irga 417 e BRS Jaburu, realizado pela Embrapa. Cultivar de ciclo precoce, em torno de 118 dias, apresenta elevado rendimento potencial de grãos, menor exigência em volume de água de

irrigação, boa tolerância ao acamamento e às doenças predominantes. A BRS Pampa tem plantas do tipo “moderno” de folhas pilosas, altura média de 89 cm, com ampla adaptação no Rio Grande do Sul (MAGALHÃES JÚNIOR, 2011). A densidade de semeadura foi de 100 kg ha⁻¹ com espaçamento de 17,5 cm entrelinhas.

Para o acompanhamento dos estádios de desenvolvimento da cultura, utilizou-se, com referência, a escala de Counce et al. (2000).

Os principais dados referentes ao desenvolvimento da cultura e ao manejo da adubação de cada safra estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2- Atividades do manejo da cultura do arroz irrigado por aspersão nas três safras avaliadas.

	Data	Atividades
Safra 2011/2012	04/11/2011	Semeadura: Adubação de base: 350 kg ha ⁻¹ da fórmula NPK 5-20-20
	18/11/2011	Emergência
	07/12/2011	V4 - Adubação nitrogenada: (85 kg ha ⁻¹ de ureia)
	10/01/2012	R1 - Adubação nitrogenada: (100 kg ha ⁻¹ de ureia)
	28/03/2012	Colheita
Safra 2012/2013	15/10/2012	Semeadura: Adubação de base: 350 kg ha ⁻¹ da fórmula NPK 5-20-20
	06/11/2012	Emergência
	23/11/2012	V4 - Adubação nitrogenada: (130 kg ha ⁻¹ de ureia)
	09/01/2013	R1 - Adubação nitrogenada: (66 kg ha ⁻¹ de ureia)
	25/03/2013	Colheita
Safra 2013/2014	02/11/2013	Semeadura: Adubação de base: 420 kg ha ⁻¹ da fórmula NPK 5-25-25
	18/11/2013	Emergência
	06/12/2013	V4 - Adubação nitrogenada: (130 kg ha ⁻¹ de ureia)
	17/01/2014	R1 - Adubação nitrogenada: (66 kg ha ⁻¹ de ureia)
	26/03/2014	Colheita

Para o controle pré-emergente de plantas daninhas usou-se a tecnologia Permit/Gamit®. O controle pós-emergente de plantas daninhas foi feito conforme as recomendações da SOSBAI (2010), nas duas safras no período entre a semeadura e a emergência foi aplicado clomazona EC 360 (2,0 L ha⁻¹) em conjunto com glifosato (4 L ha⁻¹). Na safra 2011/2012 foram feitas aplicações dos pós-emergentes propanil (8 L ha⁻¹) + quincloraque (0,75 L ha⁻¹) e do cialofope-butílico (1,75 L ha⁻¹) para controle de espécies de folhas largas e estreitas. Na safra 2012/2013 foram utilizados os pós-emergentes cialofope-butílico (1,75 L ha⁻¹), penoxulam (0,25 L ha⁻¹) e metsulfurom-metilico (3,3 g ha⁻¹) para controle de espécies de folhas largas e

estreitas, e ciperáceas. Quanto ao controle de pragas e doenças em nenhuma das safras foi necessária a aplicação de agroquímicos

3.3 Monitoramento da tensão de água no solo e irrigação

Para monitoramento da tensão de água no solo foram utilizados sensores Watermark® (Figura 2a) instalados a 0,10m de profundidade, as leituras horárias de tensão de água no solo, durante todo o ciclo, foram armazenadas em dataloggers (Figura 2b). Em cada datalogger foram conectados os sensores Watermark® e um sensor de temperatura do solo.

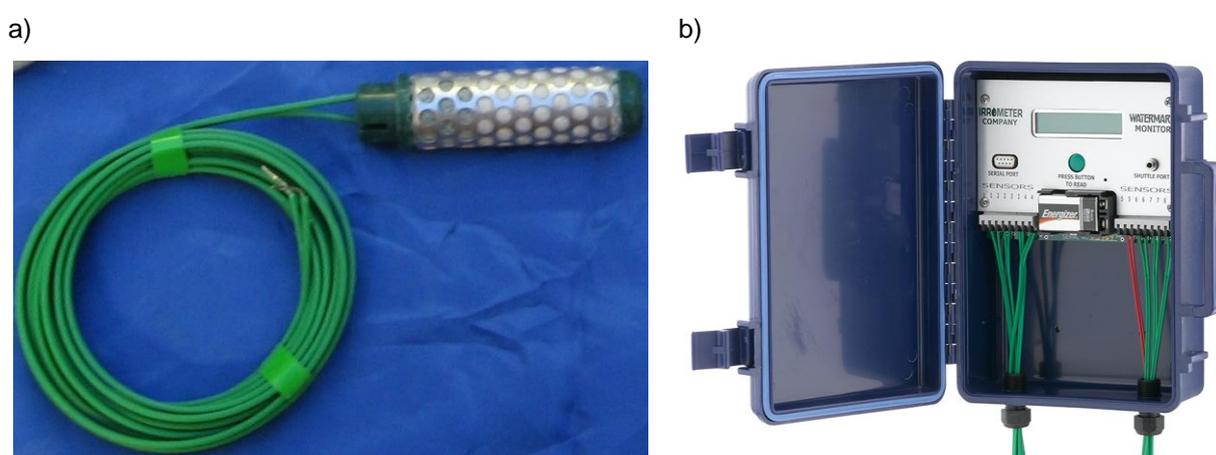


Figura 2 – Sensor Watermark® de monitoramento da tensão de água no solo (a) e datalogger para armazenamento dos dados (b).

Na safra 2011/2012 foram avaliados três manejos de irrigação, cada um foi avaliado em uma faixa com dimensões de 20m de largura e 40m de comprimento. Em cada parcela foram instalados 12 sensores Watermark®, as parcelas correspondem aos seguintes manejos de irrigação:

a) 20 kPa - Irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 20 kPa, durante todo o ciclo da cultura;

b) 40/20 kPa – Irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 40 kPa, durante a fase vegetativa, ou seja da emergência até a diferenciação da panícula (R1) e quando a média da tensão foi de 20 kPa durante a fase reprodutiva, ou seja, a partir de R1;

c) 40 kPa - Irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 40 kPa, durante todo o ciclo da cultura.

A dimensão das parcelas foi diminuída para safra 2012/2013, no intuito de facilitar a aplicação mecanizada dos agroquímicos de maneira uniforme na parcela, para que houvesse um controle eficiente das plantas daninhas, pragas e doenças.

Na safra 2012/2013 foram avaliados 4 manejos de irrigação, cada um foi avaliado em uma parcela com dimensões de 7 m de largura e 40 m de comprimento. Em cada parcela foram instalados 14 sensores Watermark®, as parcelas correspondem aos seguintes manejos de irrigação:

- a) 10kPa – Irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 10 kPa, durante todo o ciclo da cultura;
- b) 20kPa – Irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 20 kPa, durante todo o ciclo da cultura;
- c) 40kPa- Irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 40 kPa, durante todo o ciclo da cultura;
- d) 40/10kPa – Irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 40kPa, durante a fase vegetativa, ou seja da emergência até a diferenciação da panícula (R1) e quando a média da tensão foi de 10kPa durante a fase reprodutiva, ou seja, a partir de R1.

Na safra 2013/2014 foram avaliados 3 manejos de irrigação, o manejo de 20 kPa não foi avaliado porque a área onde foi implantado, possivelmente devido ao preparo convencional do solo, apresentou problemas com a infiltração da água no solo de forma que os dados de tensão de água no solo, produtividade da cultura e lâminas de irrigação não apresentaram concordância.

Cada manejo foi avaliado em uma parcela com dimensões de 4,55m de largura e 36m de comprimento. Em cada parcela foram instalados 14 sensores Watermark®, as parcelas correspondem aos seguintes manejos de irrigação:

- a) 10kPa – Irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 10 kPa, durante todo o ciclo da cultura;
- c) 40kPa – Irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 40 kPa, durante todo o ciclo da cultura;
- d) 40/10kPa- Irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 40kPa, durante a fase vegetativa, ou seja da emergência até a diferenciação da panícula (R1) e quando a média da tensão foi de 10kPa durante a fase reprodutiva, ou seja, a partir do R1.

A dimensão das parcelas foi diminuída a cada safra no intuito de facilitar a aplicação mecanizada dos agroquímicos de maneira uniforme na parcela, para que houvesse um controle eficiente das plantas daninhas, pragas e doenças.

Em cada parcela o ponto de instalação dos sensores corresponde ao centro de uma unidade experimental com área de 4m^2 (Figura 3). Nessas unidades foram coletadas as amostras de solo para análises físicas e químicas e foram determinadas as variáveis agrônômicas e a produtividade da cultura.

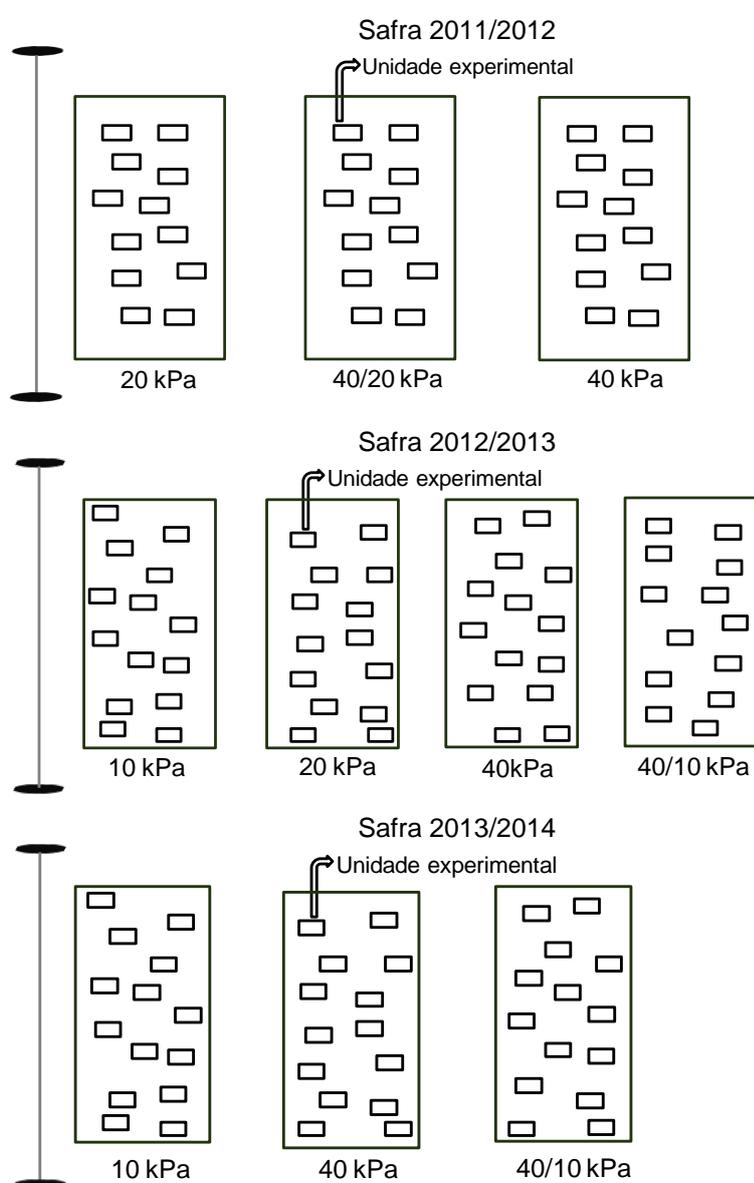


Figura 3 – Tratamentos e unidades experimentais das safras 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014.

Foram utilizados os dados meteorológicos, precipitação pluvial, temperatura do ar e umidade relativa do ar, coletados na Estação Agroclimatológica de Pelotas (Capão do Leão) disponibilizados pelo Laboratório de Agrometeorologia da Embrapa Clima Temperado.

3.4 Atributos físicos e químicos do solo

As amostras de solo foram coletadas em cada unidade experimental numa área próxima ao sensor (30cm de distância).

Para a determinação dos atributos físicos foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada utilizando anéis volumétricos de 3cm de altura por 4,7cm de diâmetro na profundidade de 3 cm, para representar a camada de 0-10cm. Estas amostras foram utilizadas para a determinação da densidade do solo, porosidade total e macro e microporosidade, segundo metodologia descrita em Donagema et al. (2011).

Amostras de solo com estrutura não preservada foram coletadas na camada de 0-10 cm com auxílio de um trado de rosca, para a determinação dos seguintes atributos químicos: pH em água, Al, Ca e Mg trocáveis P disponível, K extraível, segundo métodos descritos em TEDESCO et al. (1995).

3.5 Desempenho agrônomico e produtividade da cultura do arroz

O desempenho da cultura do arroz foi determinado em cada unidade experimental.

A estatura da planta foi medida da superfície do solo até o comprimento final da panícula com o auxílio de uma régua graduada. Em cada unidade experimental mediram-se 10 plantas.

Dentro de cada unidade experimental foi feita a contagem de colmos em 1m².

Para a obtenção das variáveis número de grãos cheios, esterilidade de espiguetas e massa de mil grãos foram retiradas de cada unidade experimental uma subamostra de 25 panículas.

Para cálculo da produtividade da cultura foi colhida a área de 4m² de cada unidade experimental.

3.6 Análises estatísticas

Para aplicação do modelo água-productividade o ciclo da cultura foi dividido em dois períodos L1 – período vegetativo e L2 – período reprodutivo. Em cada unidade experimental foi determinada a tensão média de água no solo em L1 e L2. Foi utilizado o modelo proposto por Jensen (1968) substituindo-se a variável evapotranspiração pela tensão de água no solo. O déficit hídrico relativo no modelo de Jensen é dado pela relação entre a evapotranspiração real (ET) e a evapotranspiração máxima (ET_m), quando utiliza-se a tensão de água no solo que ao contrário da evapotranspiração deve ser mantida em valores mínimos, o déficit hídrico relativo passa a ser representado pela relação entre a tensão mínima de água no solo (T_{mín}) e a tensão de água observada no solo (T_{obs}). A adaptação do modelo de Jensen (1968) está representada abaixo:

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET}{ET_m} \right)^\lambda \quad \rightarrow \quad \frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{T_{mín}}{T_{obs}} \right)^\lambda$$

Onde:

Y = produtividade observada (kg ha⁻¹);

Y_m = produtividade máxima obtido na ausência de déficit hídrico (kg ha⁻¹);

n = número de fases do ciclo fenológico;

λ = expoente que mensura a sensibilidade de cada fase do ciclo fenológico na produtividade relativa.

Para avaliar o efeito da disponibilidade hídrica sobre as variáveis estatura das plantas e de componentes do rendimento foram ajustados modelos de regressão linear simples entre essas variáveis e a tensão de água no solo.

Modelos de regressão linear múltipla tomando como variável dependente a produtividade da cultura e como variáveis independentes os atributos físico-hídricos e químicos foram ajustados, no intuito de determinar quais atributos do solo influenciaram significativamente a produtividade da cultura.

Devido ao fato de que dentro de uma mesma parcela (tratamento) foram observados diferentes valores de tensão de água no solo, mapas de distribuição espacial dos atributos do solo foram gerados para dar suporte ao estudo da relação entre as diferentes tensões de água no solo e os atributos do solo sobre o

comportamento agronômico da cultura do arroz. Para confecção dos mapas utilizou-se o método do inverso do quadrado da distância, com o auxílio do software GS+® (GS+, 2005). Na safra 2011/2012 foram utilizados 36 pontos, na safra 2012/2013 foram utilizados 56 pontos e na safra 2013/2014 utilizou-se 42 pontos. Somente foram gerados mapas dos atributos que, com base no modelo de regressão múltipla, apresentaram efeito significativo sobre a produtividade do arroz.

4 Resultados e Discussão

4.1 Precipitação pluvial, temperatura média e umidade relativa do ar durante o ciclo da cultura do arroz

Na figura 4 é apresentada a distribuição temporal da precipitação pluvial ao longo do ciclo da cultura do arroz durante as safras de 2011/2012 (a), 2012/2013 (b) e 2013/2014 (c).

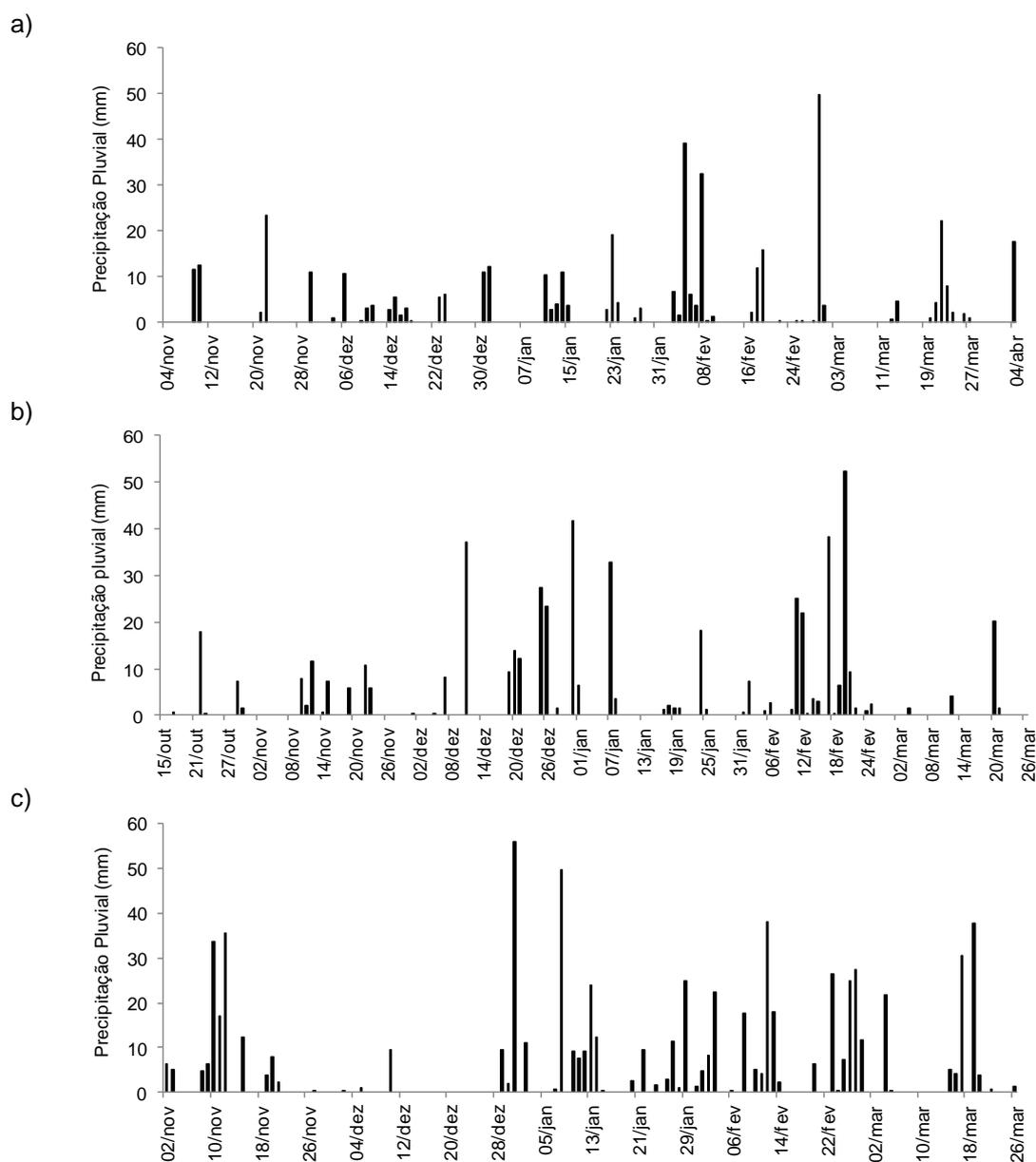


Figura 4 – Distribuição temporal da precipitação pluvial ao longo do ciclo da cultura do arroz irrigado por aspersão nas safras de 2011/2012 (a), 2012/2013 (b) e 2013/2014 (c).

Analisando a figura 4 verifica-se que o padrão de distribuição temporal da precipitação ao longo do ciclo da cultura foi similar nas safras de 2011/2012 (Figura 4a) e 2012/2013 (Figura 4b), no entanto foi diferente do observado para a safra de 2013/2014 (Figura 4c). Também pode ser notado que os volumes totais precipitados e a frequência da precipitação foram maiores nos meses de dezembro e fevereiro na safra 2012/2013 (Figura 4b) quando comparados aos da safra 2011/2012 (Figura 4a). Na safra 2013/2014 (Figura 4c) observa-se um período sem precipitação entre 20/11 e 28/12 não observado nas safras anteriores, no entanto a partir de 28/11 os volumes e a frequência da precipitação foram superiores quando comparados às outras safras.

A distribuição temporal da temperatura média do ar ao longo do ciclo da cultura do arroz nas três safras avaliadas é apresentada na figura 5. Considerando o período após a emergência das três safras, a partir de 18/11 nas três safras a temperatura média do ar varia entre 20 e 30°C e as maiores temperaturas ocorrem a partir de meados de dezembro. A temperatura é um dos elementos climáticos de maior importância para o crescimento, desenvolvimento e produtividade do arroz. Conforme os dados de Yoshida (1981) a faixa de temperatura que ocorreu nas três safras corresponde a faixa de temperatura ótima para todas as fases do ciclo da cultura do arroz. Observa-se na Figura 5b que no período entre 15/10 e 02/11/2012 da safra 2012/2013 a temperatura média do ar foi inferior a 15°C. Isto pode ter influenciado a emergência das plantas que ocorreu em 22 dias, nas outras safras onde as temperaturas foram maiores a emergência ocorreu em aproximadamente 15 dias. A temperatura ótima para germinação situa-se na faixa de 20 a 35°C. Em condições de temperaturas inferiores à 20°C germinação das sementes e/ou emergência das plântulas pode ser retardada em mais de 20 dias (SOSBAI, 2012).

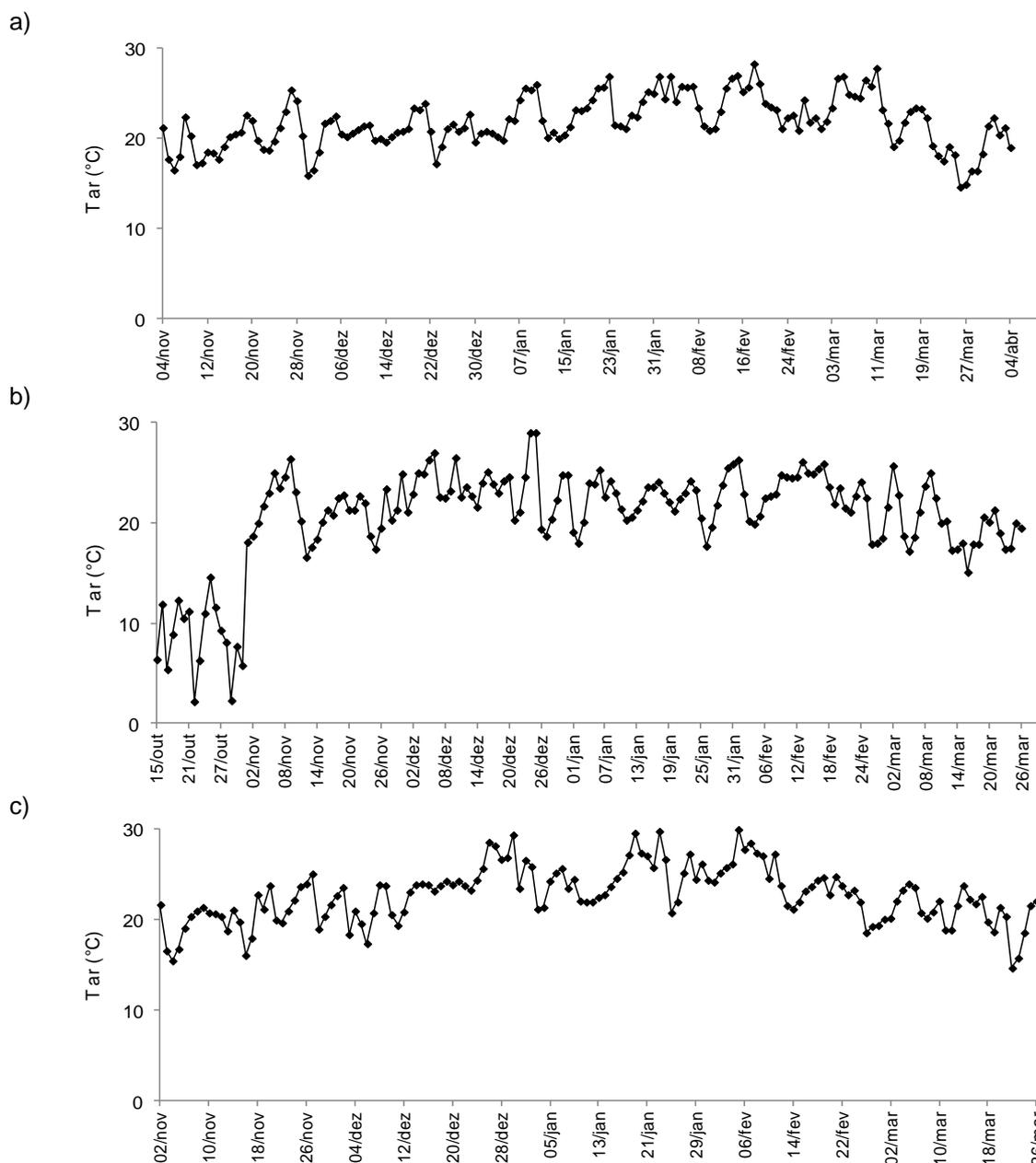


Figura 5 – Distribuição temporal da temperatura média do ar (Tar em °C) ao longo do ciclo da cultura do arroz irrigado por aspersão nas safras 2011/2012 (a), 2012/2013 (b) e 2013/2014 (c).

Na Figura 6 são apresentados os dados da distribuição temporal da umidade relativa do ar (UR) ao longo do ciclo da cultura do arroz, das três safras avaliadas. Nas três safras os valores de UR estiveram entre 70 e 90% durante o ciclo da cultura. Esses valores são considerados altos, portanto a umidade do ar não foi uma variável que interferiu no estresse hídrico, segundo Taiz & Zeiger (2004) a baixa umidade do ar também é um fator que ocasiona o estresse hídrico, em um dia ensolarado, quente e seco, uma folha renoverá até 100% de sua água em apenas uma hora.

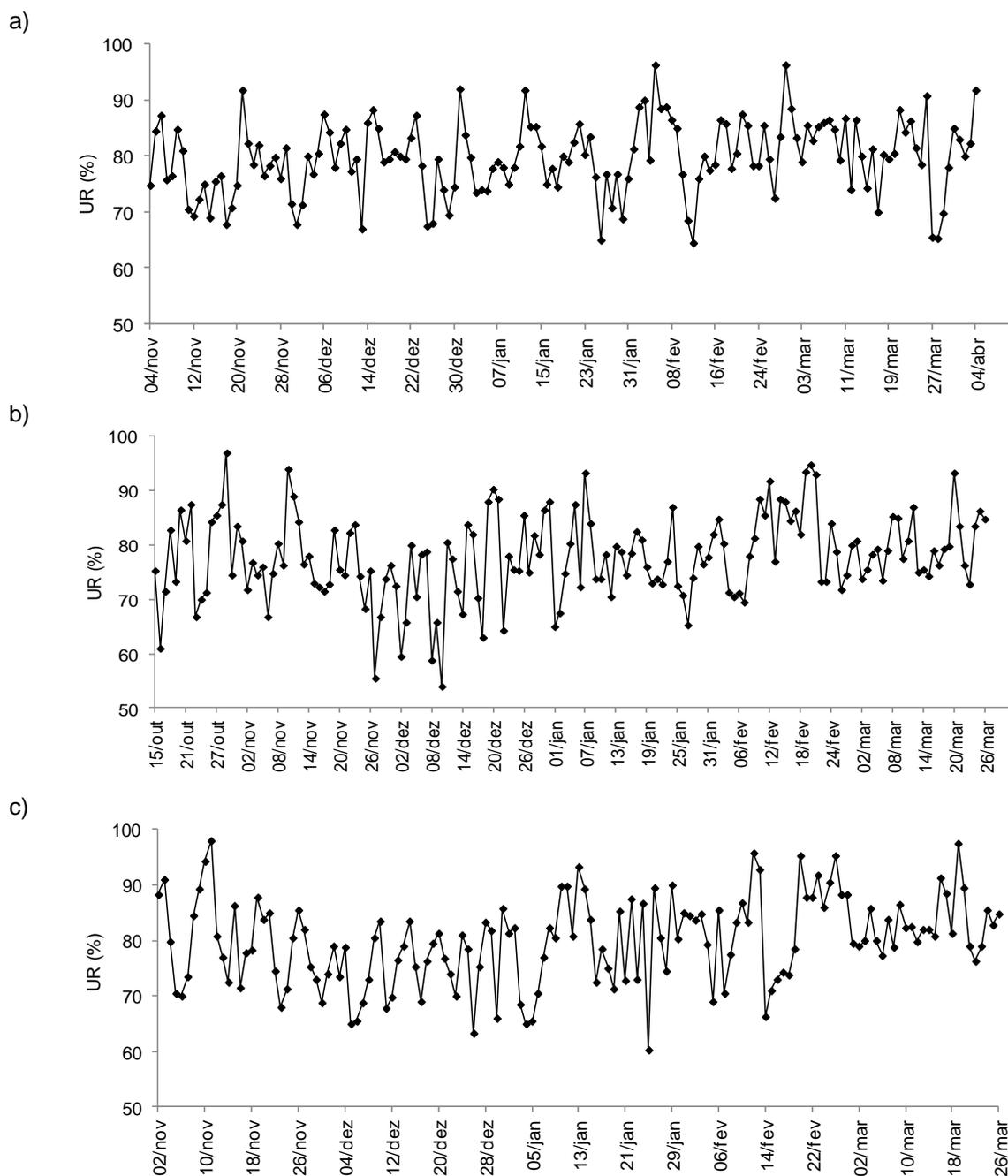


Figura 6 – Distribuição temporal da umidade relativa do ar (UR em %) ao longo do ciclo da cultura do arroz irrigado por aspersão nas safras 2011/2012 (a), 2012/2013 (b) e 2013/2014 (c).

4.2 Tensão de água no solo e produtividade do arroz irrigado por aspersão

Os totais de precipitação pluvial para períodos do ciclo da cultura compreendidos entre a semeadura e emergência, da emergência ao R1 e do R1 a colheita, em cada safra avaliada são apresentados na figura 7. Os volumes totais precipitados, desde a semeadura até a colheita, foram de 409, 429 e 726mm para as safras 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014, respectivamente.

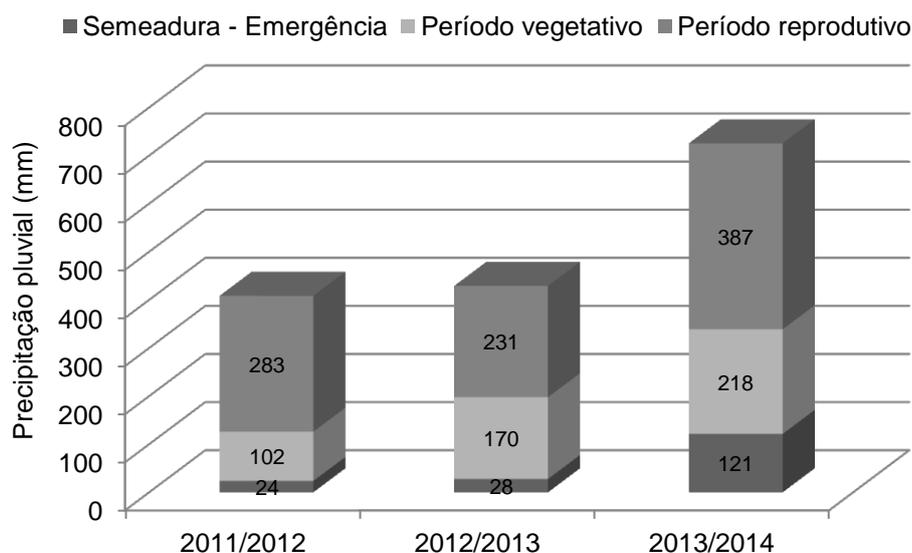


Figura 7 – Volumes totais de precipitação pluviométrica em cada período do ciclo da cultura do arroz: Semeadura-Emergência, Período vegetativo e Período reprodutivo nas safras 2011/2012, 2012/2013 e 2014/2014.

As lâminas totais de irrigação para o período vegetativo e período reprodutivo para as três safras avaliadas são apresentadas na tabela 3. As lâminas diárias aplicadas são apresentadas no apêndice A.

Tabela 3- Lâminas totais de irrigação em cada período do ciclo da cultura do arroz, para os diferentes manejos da irrigação com base na tensão de água no solo nas safras 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014.

		Lâmina de irrigação (mm)			
		Manejo	Período vegetativo	Período reprodutivo	Total
Safra	2011/2012	20 kPa	108	183	291
		40/20 kPa	81	192	273
		40 kPa	72	159	231
Safra	2012/2013	10 kPa	138	396	534
		20 kPa	63	252	315
		40 kPa	30	156	186
		40/10 kPa	30	369	399
Safra	2013/2014	10 kPa	291	192	483
		40 kPa	201	93	294
		40/10 kPa	250	245	495

Nas safras 2011/2012 e 2012/2013 os totais de irrigação + precipitação pluvial nos manejos de 20 kPa foram de 700 e 744mm, respectivamente. Embora os valores sejam próximos, observa-se uma variação do total de irrigação entre as diferentes fases do ciclo da cultura (Tabela 3). Na safra 2012/2013 a demanda foi menor no período vegetativo e maior no período reprodutivo, quando comparada a safra anterior. Isto se deve a distribuição da precipitação pluvial nestes períodos (Figura 7), observa-se que na safra 2012/2013 houve um maior volume de precipitação no período vegetativo e menor precipitação pluvial no período reprodutivo quando comparado à safra 2011/2012.

A lâmina total de água (lâmina de irrigação + precipitação pluvial) na safra 2011/2012 foi de 210mm no período vegetativo e de 466mm no período reprodutivo, enquanto que para a safra 2012/2013 foram de 233 e 483mm, respectivamente. Os totais de precipitação representam quase 50% do uso da água pela cultura, indicando que sistemas e/ou manejos de irrigação que permitam o aproveitamento da precipitação pluvial podem ser uma alternativa na redução do uso da água na orizicultura.

Buss (2012), em estudo realizado na safra 2011/2012, em área experimental próxima e como mesmo solo do presente estudo, utilizou na irrigação de arroz irrigado por inundação volume correspondente a 554,4mm. A comparação deste dado com aqueles apresentados na Figura 8 na mesma safra mostra que, mesmo no tratamento irrigado por aspersão com maior lâmina líquida aplicada, correspondente a tensão de água no solo de 20kPa, houve uma redução de 48% no uso de água. Tais resultados corroboram aqueles obtidos por Kahlow et al. (2007) em estudo realizado no Paquistão, em um solo argiloso, onde manejo baseado na reposição de 100% da evapotranspiração da cultura (ET_c) para arroz irrigado por aspersão com canhão hidráulico, comparativamente ao cultivo irrigado por inundação, proporcionou economia de 45% no uso de água.

Quando se compara as safras 2012/2013 e 2013/2014 onde se realizou os mesmos tratamentos, se observa que os totais de irrigação na safra 2013/2014 foram próximos aos da safra anterior com exceção do manejo de 40kPa onde na safra 2013/2014 foram aplicados 108mm a mais (Tabela 3). No entanto, devido ao alto volume de precipitação pluvial (726mm) ocorrido na safra 2013/2014 (Figura 7) os totais de irrigação deveriam ter sido menores nessa safra. O elevado uso da água na terceira safra pode estar relacionado ao preparo convencional do solo. Após as

primeiras irrigações se observou que estava havendo um elevado escoamento superficial, mesmo com a aplicação da lâmina de irrigação dividida, evitando altas precipitações, as tensões da água no solo não diminuíam de acordo com a aplicação da irrigação.

Na tabela 4, são apresentados os valores do parâmetro λ do modelo proposto por Jensen (1968) para cada fase do ciclo da cultura do arroz.

Tabela 4 – Estimativa dos parâmetros do modelo proposto por Jensen (1968), para cada fase do ciclo fenológico do arroz irrigado por aspersão.

Fase	Parâmetro	Estimativa	Erro	valor t	Pr > t
Safrá 2011/2012					
Vegetativa	$\lambda 1$	0,15	0,0338	4,46	0,0001
Reprodutiva	$\lambda 2$	0,25	0,0353	6,96	<0,0001
Safrá 2012/2013					
Vegetativa	$\lambda 1$	0,16	0,0588	2,73	0,0095
Reprodutiva	$\lambda 2$	0,29	0,0456	6,32	<0,0001
Safrá 2013/2014					
Vegetativa	$\lambda 1$	0,16	0,017	8,91	<0,0001
Reprodutiva	$\lambda 2$	0,03	0,030	1,01	0,3214

Nas safras 2011/2012 e 2012/2013, os parâmetros foram significativos à 0,1% em ambas as fases (Tabela 4), no entanto quanto maior o valor de λ , mais sensível ao déficit hídrico é a fase do ciclo, assim o período reprodutivo é o mais sensível. De acordo com Pinheiro (1999), de modo geral, quando ocorre na fase vegetativa do arroz a deficiência hídrica não reduz severamente a produtividade, no entanto seu efeito é severo quando ocorre durante a fase reprodutiva, especialmente quando ocorre no período da divisão da célula-mãe do pólen (meiose) e o florescimento. O efeito da deficiência hídrica na produtividade dá-se pela interferência nos processos fotossintéticos, transporte de carboidratos, redução do índice de área foliar, inibição da emissão das panículas, esterilidade de espiguetas, etc. Na safra 2013/2014 somente o período vegetativo foi significativamente sensível ao déficit hídrico. O que pode ter ocorrido por que no período reprodutivo houve uma precipitação pluvial de 387mm. Isso pode ser confirmado pelas produtividades médias da cultura que foram de 6324, 5992, e 6099 kg ha⁻¹ para os manejos 10, 40 e 40/10kPa, respectivamente. Na Figura 8 são apresentados os ajustes do modelo água-produtividade proposto

por Jensen (1968) para as safras 2011/2012 (Figura 8a) e 2012/2013 (Figura 8b) e 2013/2014 (Figura 8c).

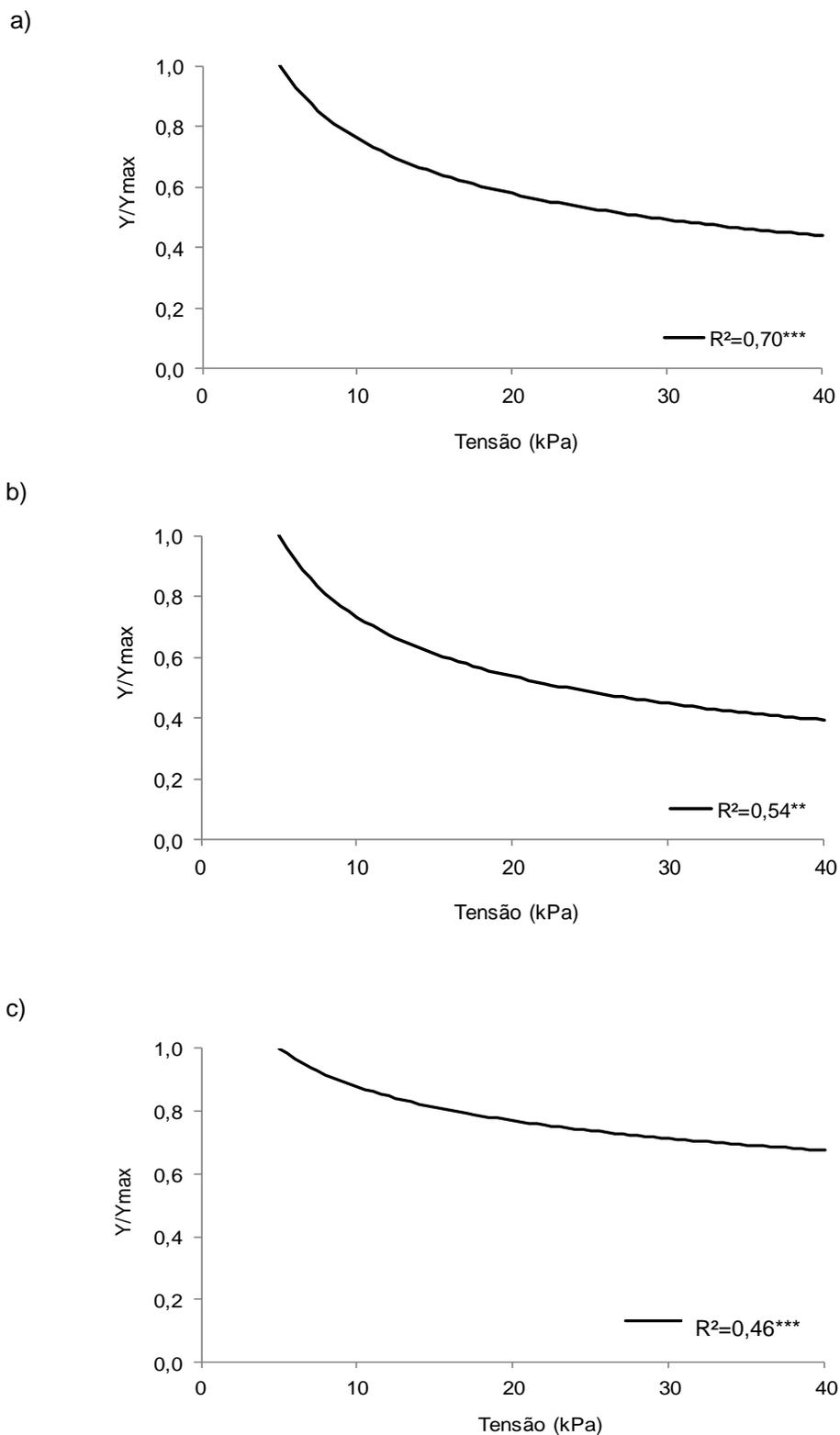


Figura 8 – Relação entre a produtividade da cultura do arroz irrigado por aspersão e a tensão média de água no solo, ajustada pelo modelo de Jensen (1968) para as safras 11/2012 (a), 12/2013 (b) e 2013/2014 (c). *** modelo significativo a 0,1%; ** modelo significativo a 1%.

Na safra 11/2012 o coeficiente de relação (R^2) de 0,7 indica que mesmo dentre todos os fatores agronômicos que interferem na produtividade de uma cultura, tais como fertilidade do solo, controle de pragas, doenças e plantas daninhas, qualidade de sementes, época de semeadura, entre outras, a disponibilidade hídrica afetou em 70% a produtividade do arroz irrigado. Na safra 2012/2013, embora significativa a relação entre a tensão de água no solo e a produtividade do arroz irrigado foi menor ($R^2 = 0,54$) que o obtido na safra 2011/2012. Isso pode ter ocorrido, conforme mencionado anteriormente, devido aos vários fatores que interferem na produtividade da cultura.

Nas safras 2011/2012 e 2012/2013, observa-se que ocorreu um decréscimo mais acentuado da produtividade até a tensão de 15kPa, no entanto a partir dessa tensão a diminuição da produtividade em função do aumento da tensão de água no solo foi menor, mantendo-se em torno de 50% da produtividade máxima (Figura 8a e 8b). Assim a tensão de água no solo, na irrigação por aspersão na cultura do arroz, deve ser mantida o mais próxima da saturação, desde que não ocorram perdas por escoamento superficial durante a aplicação da lâmina de água.

Isso porque a BRS Pampa é uma cultivar desenvolvida para o cultivo com irrigação por inundação, e portanto, quanto mais próximo da condição de saturação o solo estiver mais favorável ao desenvolvimento deste cultivar estará o ambiente. Zain et al. (2014) realizaram um estudo na Malásia comparando o desempenho de uma cultivar de arroz desenvolvida para irrigação por inundação nos sistemas inundado, saturado e aeróbico neste último as plantas ficaram sem irrigação por períodos de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias. Os autores observaram que a produtividade foi a mesma nos tratamentos irrigados por inundação e na condição de saturação do solo. No entanto a quedas de produtividade foram de 15% para o período de 5 dias, 70% para o período de 15 dias e superiores a 90% a partir dos 20 dias sem irrigação.

O modelo da safra 2013/2014 (Figura 8c) foi apresentado no intuito de esclarecer que os fatores solo e precipitação pluvial certamente influenciaram tanto os dados de tensão de água no solo quanto de produtividade da cultura, de maneira mais acentuada que os manejos de irrigação que deveriam ser avaliados. Devido a isso, os dados dessa safra só foram avaliados até este momento.

4.3 Tensão de água no solo, variáveis agronômicas e componentes de rendimento

Observa-se nas Figuras 9a e 9b que a estatura das plantas de arroz diminuiu significativamente com o aumento da tensão média de água no solo e ambas as safras. Arf et al. (2001) em trabalho realizado com arroz de sequeiro irrigado por aspersão, observaram diminuição significativa na estatura das plantas quando irrigadas com lâminas de água menores.

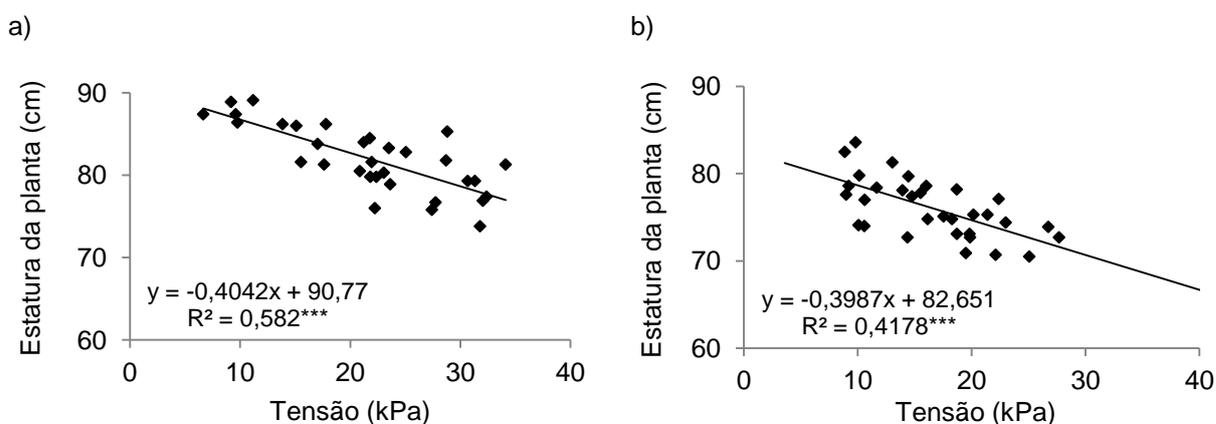


Figura 9– Valores médios de estatura da planta de arroz irrigada por aspersão em função da tensão de água no solo para as safras 2011/2012 (a) e 2012/2013 (b).

Em condições de déficit hídrico, normalmente as plantas diminuem seu crescimento vegetativo. O crescimento celular é o processo mais sensível à baixa disponibilidade de água no solo (KRAMÉ; BOYER, 1995), a divisão e expansão celular são diretamente inibidas pelo estresse hídrico (ZHU, 2002). De acordo com Jones (1992), o déficit hídrico afeta ainda a fotossíntese e a absorção de íons o que reflete na redução da taxa de crescimento, sendo esta redução uma característica adaptativa para a sobrevivência da planta.

Não houve efeito significativo da tensão média de água no solo sobre o número de colmos por metro quadrado em ambas as safras (Figura 10a e 10b), no entanto, existiu a tendência de diminuição do número de colmos com o aumento da tensão de água no solo. Artigiani et al. (2012) também não observaram efeito da disponibilidade hídrica sobre o número de colmos de arroz quando cultivado em sequeiro e irrigado por aspersão.

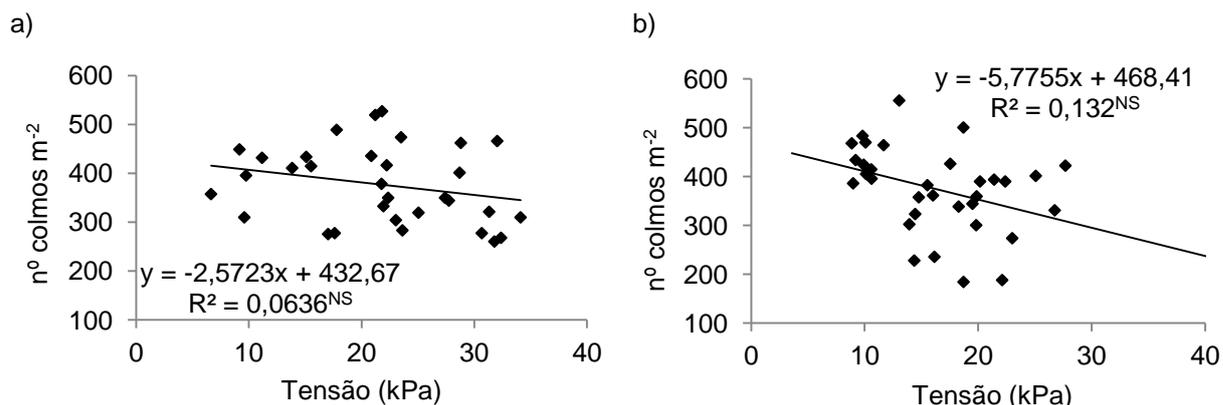


Figura 10 – Número médio de colmos por metro linear do arroz irrigado por aspersão em função da tensão de água no solo para as safras 2011/2012 (a) e 2012/2013 (b).

É importante salientar que em ambas as safras o número médio de colmos por metro quadrado esteve em torno de 400, considerando que houvesse uma panícula por colmo, ainda assim seria um valor baixo já que segundo SOSBAI (2014) para a expressão do máximo potencial produtivo de cultivares de arroz irrigado por inundação são necessárias mais de 600 panículas/m². Isto pode indicar a necessidade de uma maior densidade de sementeira para o arroz irrigado por aspersão.

A variável massa de mil grãos não foi significativamente influenciado pela tensão média de água no solo em ambas as safras (Figuras 11a e 11b). Isto pode ter ocorrido porque esta variável é característica do melhoramento genético da cultivar, sendo pouco influenciada pelas condições ambientais. De acordo com YOSHIDA (1981), esta variável está relacionada ao caráter varietal e é bastante estável.

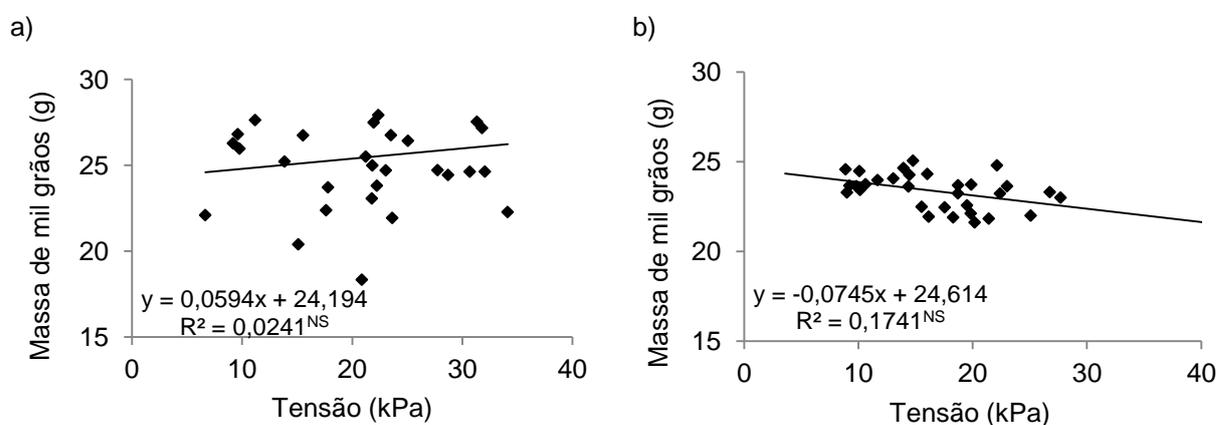


Figura 11– Massa de mil grãos do arroz irrigado por aspersão em função da tensão de água no solo para as safras 2011/2012 (a) e 2012/2013 (b).

Não se observou efeito da tensão de água no solo sobre a esterilidade de espiguetas (Figuras 12c e 12d). Ginigaddara & Ranamukhaarachchi (2009) em estudo realizado na Tailândia, avaliaram os componentes de rendimento da cultura do arroz em diferentes manejos de água: inundado; 2 semanas com irrigação e 2 semanas sem irrigação; 1 semana com irrigação e 3 semanas sem irrigação. Os autores também não observaram efeito do estresse hídrico sobre as variáveis massa de mil grãos e esterilidade de espiguetas.

Dentre os componentes de rendimento somente o número de grãos cheios por panícula mostrou-se sensível ao déficit hídrico (Figuras 12a e 12b).

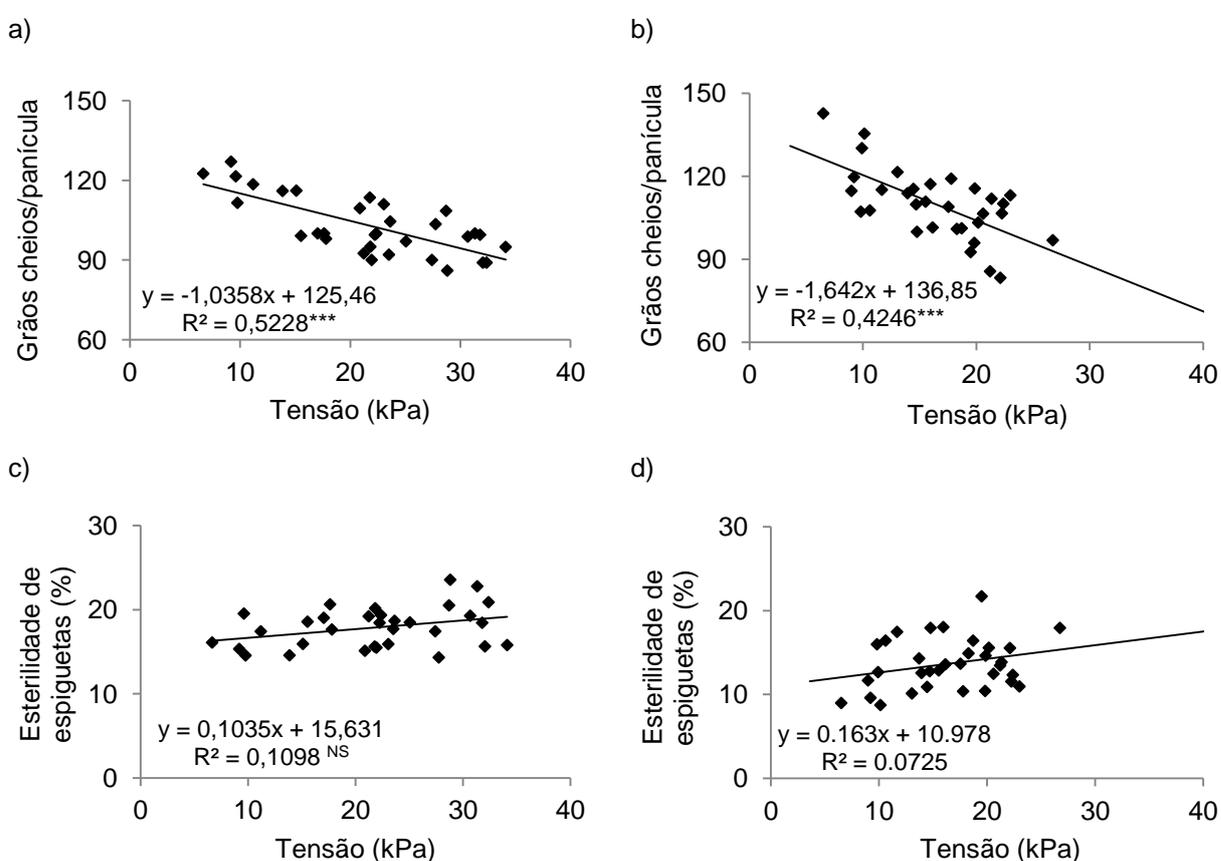


Figura 12 – Número médio de grãos cheios por panícula do arroz irrigado por aspersão em função da tensão de água no solo para as safras 11/2012 (a) e 12/2013 (b) e esterilidade de espiguetas do arroz irrigado por aspersão em função da tensão de água no solo para as safras 11/2012 (c) e 12/2013 (d).

Patel et al. (2010) em um estudo realizado na Índia, avaliaram componentes de rendimento do arroz cultivado em condições aeróbicas e de inundação e observaram que entre os componentes do rendimento avaliados, o número de espiguetas por panícula foi menor em condições aeróbicas e foi o mais importante fator responsável pela diferença de rendimento do arroz em condições aeróbicas e de inundação. Segundo Pinheiro (1999) o estresse hídrico afeta os processos

relacionados ao desenvolvimento reprodutivo, resultando em esterilidade e dessecamento das espiguetas, o que diminui o número de grãos cheios por panícula. Embora não tenha sido observado efeito significativo da tensão de água no solo sobre a esterilidade de espiguetas, observou-se que existe a tendência do aumento da esterilidade das espiguetas em função do aumento da tensão de água no solo (Figuras 12c e 12d).

4.4 Produtividade do arroz e variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo

Com base nos valores médios, máximos e mínimos dos atributos do solo para cada tratamento nas safras 2011/2012 e 2012/2013 (Tabela 5) observa-se que de maneira geral, houve uma variação nos valores dos atributos tanto dentro de cada tratamento quanto entre os tratamentos.

Considerando que os tratamentos culturais foram os mesmos para todos os tratamentos, tal variação pode ser atribuída a variabilidade espacial natural dos atributos do solo e principalmente ao manejo prévio desta área. Por tratar-se de uma área com anos de cultivo, a variabilidade espacial dos atributos físicos pode ser resultado das sucessivas operações mecanizadas para preparo e adubação do solo, plantio e aplicações de agroquímicos, a variabilidade observada é atribuída tanto à variabilidade natural do solo utilizado, quanto às distintas adubações e extração de nutrientes associadas aos sucessivos cultivos, com demandas nutricionais distintas. Isso reforça a importância do estudo pontual da relação entre os atributos do solo e a produtividade da cultura. Segundo Tesfahunegn et al. (2011), informações científicas sobre a variabilidade e distribuição espacial de atributos do solo são essenciais a tomada de decisões sustentáveis relativas ao manejo do solo e das culturas.

De acordo com classificação proposta pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC (CQFS RS/SC, 2004) para solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, na safra 2011/2012 os valores de pH_{água} determinados foram baixos, nas áreas com manejos da irrigação 20kPa e 40/20kPa, e médio, na área com manejo 40kPa; os teores de Mg, P e K e os valores de saturação por bases (V%) e por alumínio (m%) foram baixos nas áreas relativas aos três manejos de irrigação avaliados. Por sua vez, o teor de Ca é interpretado como médio nas áreas

relativas aos três manejos avaliados. Os valores de CTC_{pH7} foram médios em todos manejos avaliados. (Tabela 5).

Tabela 5 – Valores médios, máximos e mínimos dos atributos físicos e químicos do solo nos diferentes manejos de irrigação para cultura do arroz irrigado por aspersão nas safras 2011/2012 e 2012/2013.

Atributos	Safrá 2011/2012								
	(20 kPa)			(40 kPa)			40/20 kPa)		
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
Ds (kg dm ⁻³)	1,6	1,8	1,5	1,7	1,9	1,5	1,6	1,7	1,5
Ma (%)	4,2	6,1	2,0	3,8	9,8	1,2	4,6	9,1	2,2
Mi (%)	40,2	45,5	36,2	39,8	41,4	36,6	41,2	45,6	37,0
Pt (%)	45,7	47,8	42,2	43,7	50,3	39,6	45,5	49,1	42,3
pH (H ₂ O)	5,3	5,5	5,1	5,5	5,6	5,3	5,4	5,6	5,1
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,5	2,8	2,3	2,4	2,6	2,1	2,7	2,9	2,2
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,2	0,3	0,1
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,7	3,2	2,3	2,6	3,2	2,3	2,6	3,0	2,1
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,4	0,5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5	0,3
P (mg dm ⁻³)	6,8	8,2	5,2	6,2	7,6	4,2	8,5	12,1	6,0
K (cmol _c dm ⁻³)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,04	0,1	0,1	0,1
Na (cmol _c dm ⁻³)	45,2	59,0	38,4	46,7	57,2	35,6	70,7	97,5	48,7
SB (cmol _c dm ⁻³)	3,3	3,9	2,9	3,3	3,9	2,8	3,4	4,0	2,9
CTCe (cmol _c dm ⁻³)	3,5	4,0	3,1	2,8	3,6	3,0	3,6	4,3	3,0
CTC _{pH7} (cmol _c dm ⁻³)	5,8	6,2	5,3	5,6	6,1	5,1	6,0	6,4	5,5
V (%)	56,8	63,3	51,0	58,1	65,3	54,5	55,6	63,0	50,0
m (%)	5,4	7,5	2,4	3,2	6,0	0,0	6,2	7,9	3,9

Atributos	Safrá 2012/2013											
	(10 kPa)			(20 kPa)			(40kPa)			(40/10 kPa)		
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
Ds (kg dm ⁻³)	1,7	1,8	1,5	1,6	1,7	1,5	1,6	1,8	1,5	1,6	1,7	1,5
Ma (%)	11,2	15,4	7,8	11,9	18,5	9,8	9,0	12,3	4,0	8,4	12,8	2,6
Mi (%)	31,4	34,5	28,9	32,7	36,0	29,5	34,5	41,5	30,0	36,4	38,4	32,5
Pt (%)	42,6	46,5	39,3	44,5	48,5	41,0	43,4	52,4	37,5	44,8	49,6	37,7
pH (H ₂ O)	5,9	6,2	5,7	5,5	5,9	5,1	5,4	5,9	5,0	5,8	6,2	5,2
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,2	2,7	1,7	2,8	3,2	2,4	3,1	3,8	2,8	2,9	3,7	2,1
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,2	0,3	0,2	0,5	0,7	0,2	0,5	0,9	0,2	0,3	0,6	0,1
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,2	2,6	1,8	1,8	2,3	1,5	2,0	2,5	1,4	2,5	3,2	1,7
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,0	1,4	0,9	0,7	0,9	0,5	0,8	1,1	0,5	1,1	1,5	0,8
P (mg dm ⁻³)	12,5	28,7	5,4	16,3	35,0	7,2	25,7	42,8	13,1	15,1	20,3	11,1
K (cmol _c dm ⁻³)	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,08	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Na (cmol _c dm ⁻³)	24,4	32,4	15,2	24,6	40,4	13,1	27,7	38,4	17,2	37,2	50,6	29,3
SB (cmol _c dm ⁻³)	3,4	4,3	2,9	2,7	3,4	2,3	3,1	3,9	2,2	3,9	5,0	2,7
CTCe (cmol _c dm ⁻³)	3,7	4,5	3,1	3,2	3,9	2,7	3,6	4,1	3,0	4,2	5,2	3,2
CTC _{pH7} (cmol _c dm ⁻³)	5,7	6,0	5,1	5,5	5,8	5,2	6,2	6,6	5,5	6,8	7,9	5,7
V (%)	60,5	70,8	51,6	49,4	58,5	42,5	49,1	58,0	39,0	56,5	69,9	43,0
m (%)	6,8	8,8	4,1	15,9	24,0	7,2	14,8	28,6	6,0	8,4	15,3	1,9

Ds=densidade do solo; Ma= macroporosidade; Mi= microporosidade; Pt = porosidade total; SB= soma de bases; CTCe= capacidade de troca de cátions efetiva; CTC_{pH7}= capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V= saturação de bases; m= saturação por alumínio (%).

Conforme preconizado pela CQFS RS/SC (2004), na safra 2012/2013 os valores de pH_{água} do solo foram médios nas áreas relativas aos quatro manejos de irrigação adotados na safra 2012/2013; o teor de Ca foi baixo, no manejo 20kPa, e médio, nos demais manejos; os valores de Mg foram altos, no manejo com tensões de 40/10kPa, e médio nos demais três manejos da irrigação (tensões 10kPa, 20kPa e 40kPa); o teor de P foi baixo, na área com manejo de irrigação 10kPa, e médio, nos demais manejos; os valores de K foram baixos, no manejo de irrigação 40/10kPa, e médio, nos demais manejos; os valores de saturação por bases foram baixos em todas as áreas e os de saturação por alumínio foram baixos, nos manejos de irrigação com tensões de 10kPa e 40/10kPa, e médios, nos manejos 20kPa e 40kPa. Os valores de CTC_{pH7} foram médios em todos manejos avaliados. (Tabela 5).

Em ambas as safras os valores médios de densidade do solo em todas as áreas estiveram muito próximos ao limite crítico adequado ao desenvolvimento radicular que, de acordo com Reichert et al. (2003), para solos franco-arenosos, varia entre 1,70 a 1,80 kg dm⁻³ (Tabela 5).

Na safra 2011/2012, a macroporosidade apresentou valor médio inferior 0,10 m³ m⁻³ (Tabela 5), considerado limite inferior para a porosidade de aeração, abaixo do qual a difusão de oxigênio torna-se limitante ao crescimento e desenvolvimento das raízes (Godoy et al., 2015). Neste estudo, por trabalhar-se com uma cultura adaptada ao cultivo em condições anaeróbicas esta condição não se mostrou restritiva.

Na tabela 6 estão apresentados os modelos de estimativa da produtividade do arroz irrigado por aspersão em função dos atributos químicos e físicos hídricos do solo para as safras 2011/2012 e 2012/2013.

Tabela 6 - Modelos de regressão linear múltipla para estimativa do rendimento do arroz irrigado por aspersão em função da tensão de água e dos atributos químicos e físicos-hídricos do solo.

Modelo	R ²	Valor p
¹ P = 13020,5 - (140,1τ ^{***}) - (173,8Ma*) + (192,7P [†]) + (46,3K [†]) - (923,2 CTC _{pH7} [†]) - (139,8m ^{NS})	0,79	<0,001
² P = 4347,9 - (60,9m*) + (112,8Mi*) - (166,5 τ ^{***})	0,66	<0,001

¹Safra 2011/2012; ²Safra 2012/2013. P= produtividade (kg ha⁻¹); τ = tensão de água de solo (kPa); Ma= macroporosidade (%); P= fósforo (mg dm⁻³); K= potássio (mg dm⁻³); CTC_{pH7}= capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (cmolc dm⁻³); m= saturação por alumínio (%), Mi=microporosidade (%). *** Parâmetro significativo a 0,1%; * Parâmetro significativo a 5%; †Parâmetro significativo a 10%; NS Parâmetro não significativo.

Conforme o modelo ajustado aos dados da safra 2011/12 quanto maior a tensão de água solo, a porcentagem de macroporos e a CTC, menor será a produtividade do arroz (Tabela 6). Mesmo dentro de um mesmo manejo de irrigação existiu uma variabilidade da tensão de água no solo (Figura 13). Por exemplo, no T1 onde a irrigação era feita quando a média da tensão de água no solo chegava a 20 kPa, a tensão variou entre 7 e 24kPa e esta variação também se deu na produtividade que, no mesmo tratamento, variou entre 5000 e 8800 kg ha⁻¹ (Figura 14).

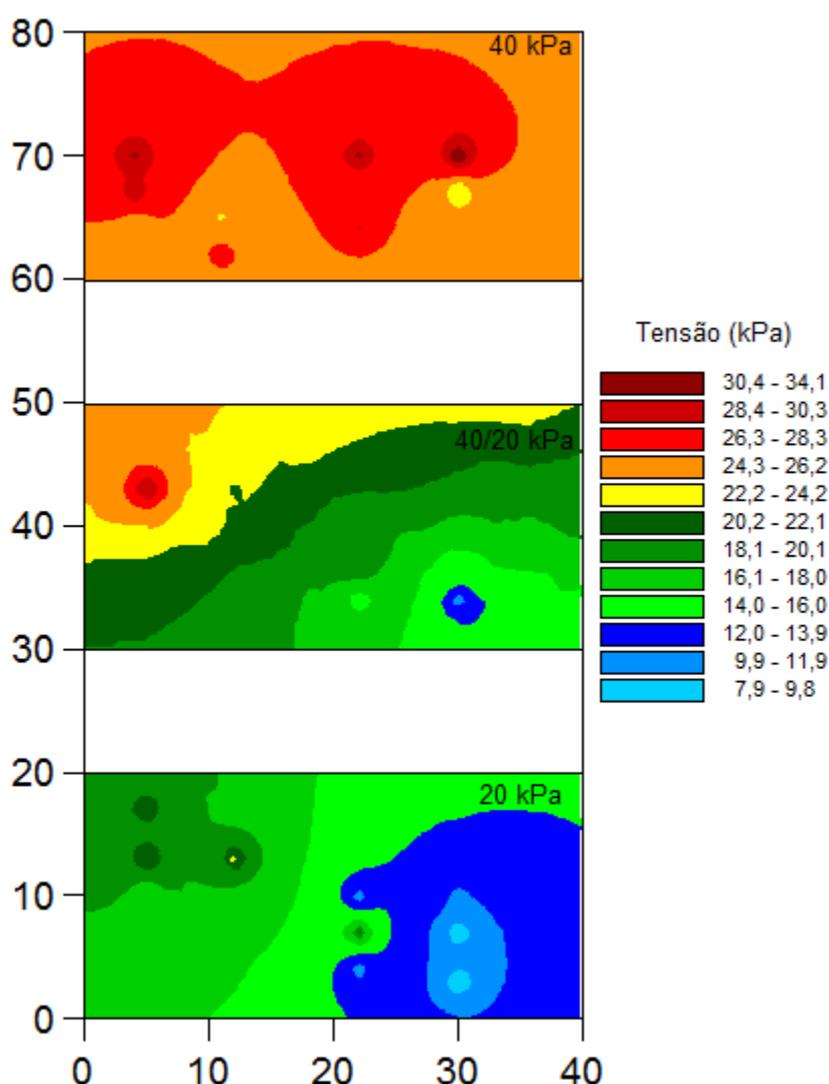


Figura 13 – Mapa de distribuição espacial da tensão de água no solo (Tensão em kPa) em diferentes manejos da irrigação na safra 2011/2012.

Isso reforça a importância da tensão de água no solo sobre a produtividade do arroz irrigado por aspersão. Crusciol et al. (2003) em dois anos de avaliação

observaram aumentos lineares da produtividade de grãos na cultura do arroz em função do aumento da disponibilidade hídrica.

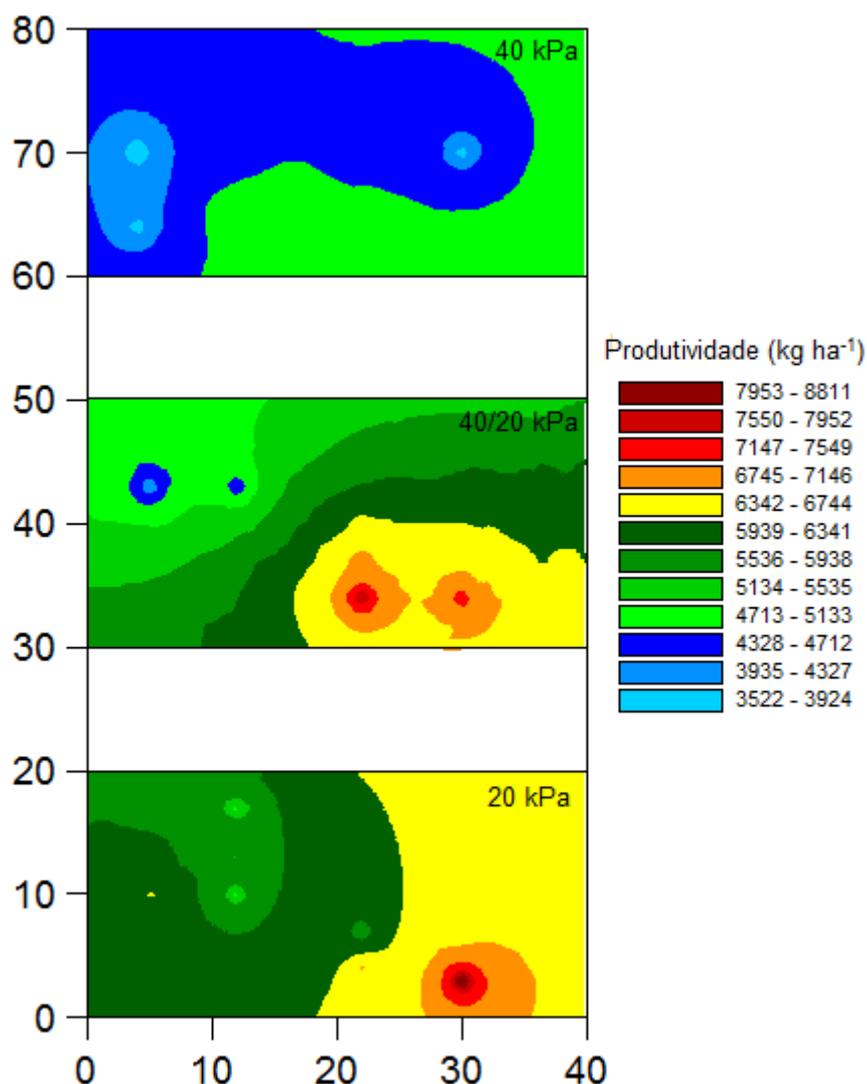


Figura 14 – Mapa de distribuição espacial da produtividade do arroz irrigado por aspersão em diferentes manejos da irrigação na safra 2011/2012.

A relação negativa da macroporosidade com a produtividade pode se dever ao fato de que quanto maior a porcentagem de macroporos maior a infiltração e menor a retenção de água no solo já que esta ocorre nos microporos. Com base na variabilidade espacial da macroporosidade do solo (Figura 15), da tensão de água no solo (Figura 14) e do rendimento da cultura (Figura 14) pode se observar que, dentro de cada manejo de irrigação, as áreas com maior macroporosidade apresentam maiores tensões de água no solo e conseqüentemente menor

produtividade. Assim, a relação negativa com a macroporosidade está diretamente ligada à disponibilidade de água para as plantas.

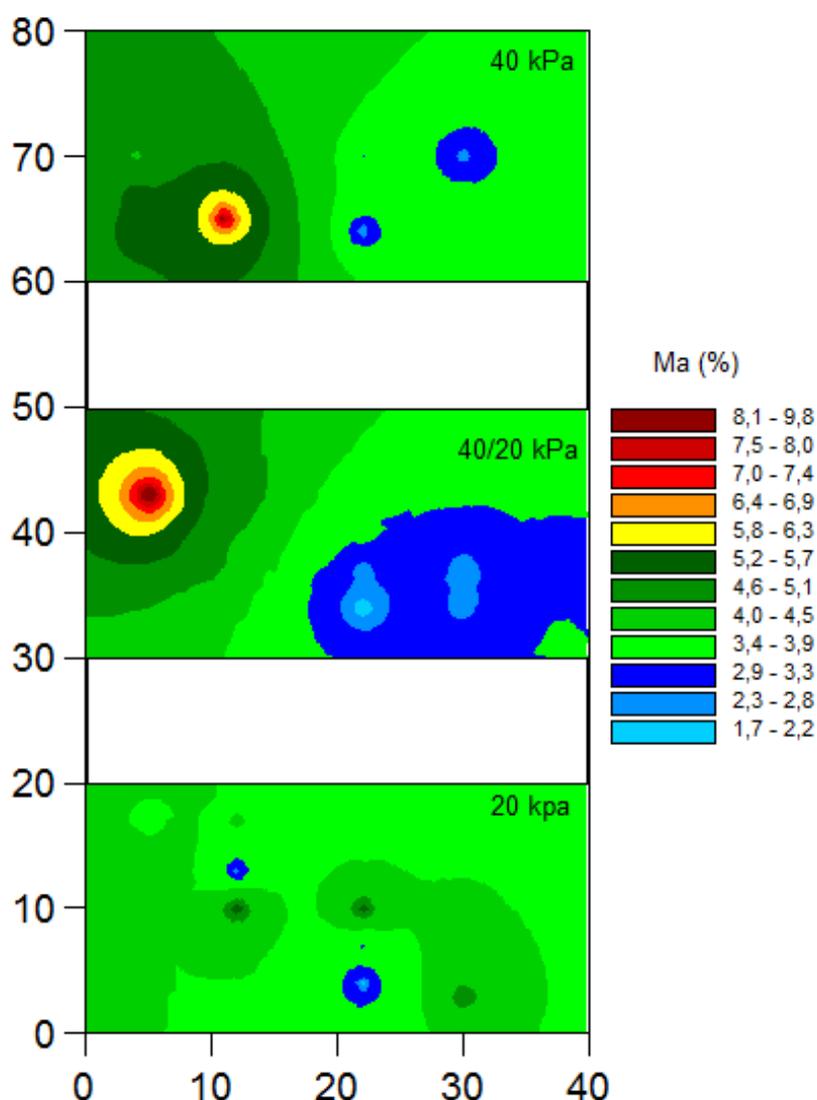


Figura 15 – Mapa de distribuição espacial da macroporosidade do solo (Ma em %) em diferentes manejos da irrigação na safra 2011/2012.

O efeito inverso da CTC sobre a produtividade do arroz foi distinto do que normalmente ocorre (Liu et al., 2014; Godoy et al., 2015). Atribui-se o efeito observado à variabilidade espacial de tal atributo. Na Figura 16, observa-se que os maiores valores de CTC ocorreram na área relativa ao manejo de irrigação baseado na tensão de 40 kPa, que condicionou menor produtividade ao arroz, devido à menor disponibilidade hídrica para a cultura.

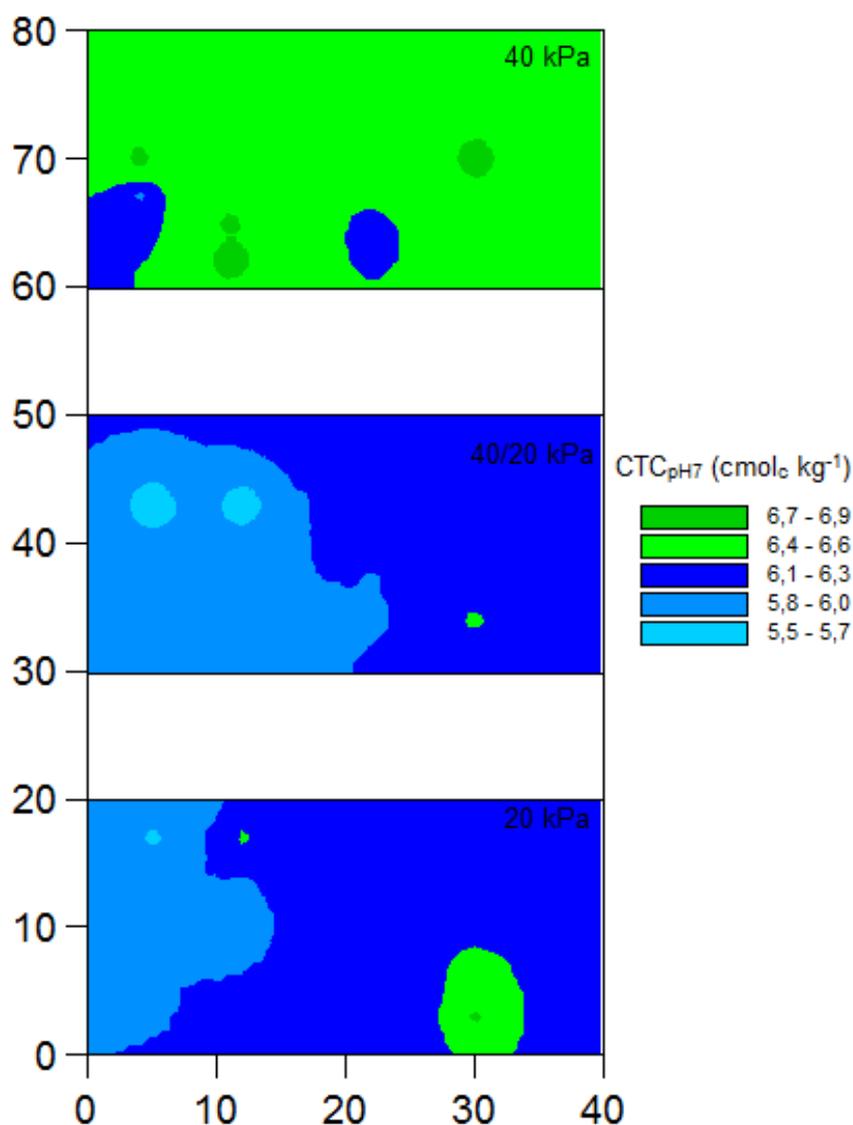


Figura 16 – Mapa de distribuição espacial da capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC_{pH7} em Cmol_c kg⁻¹) em diferentes manejos da irrigação na safra 2011/2012.

Conforme o modelo ajustado na safra 2011/2012, os atributos P e K apresentaram relação positiva com a produtividade (Tabela 7). Com base na variabilidade espacial destes atributos dentro de cada manejo de irrigação as áreas com maiores teores de P (Figura 17) e de K (Figura 18) apresentaram também os maiores produtividades.

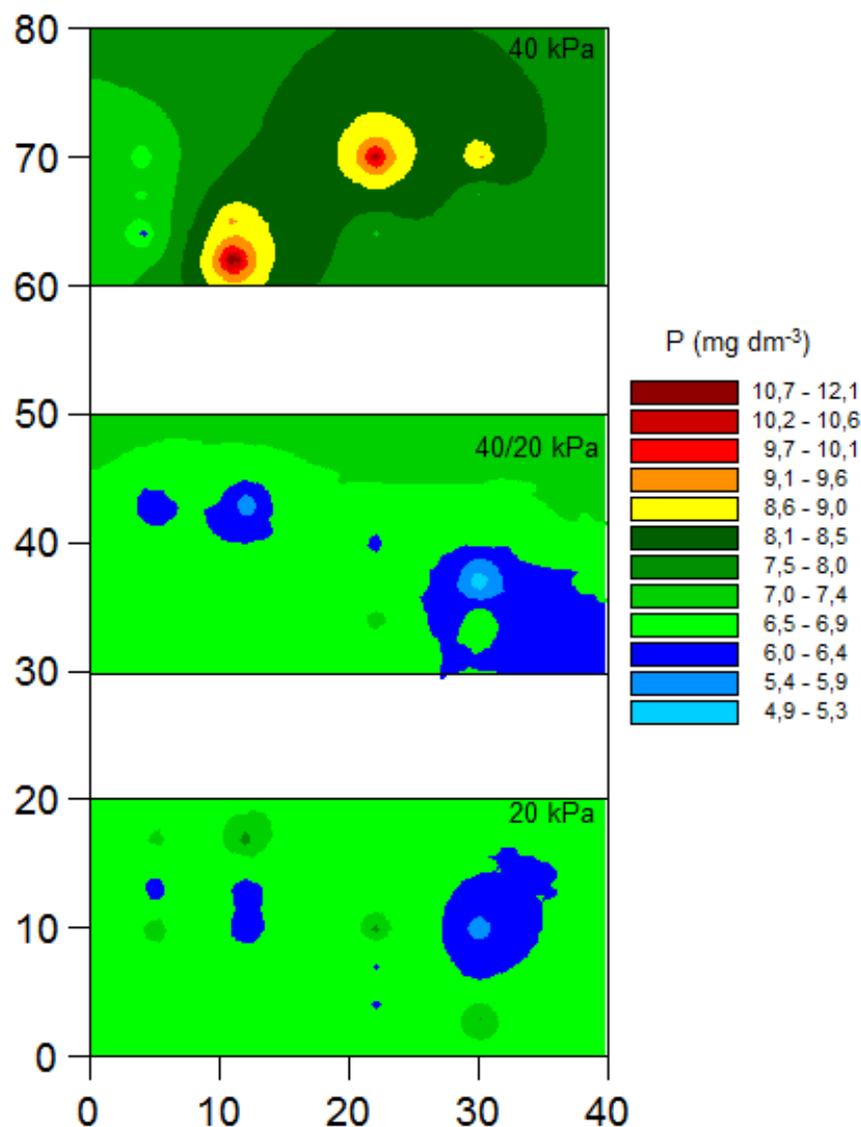


Figura 17 – Mapa de distribuição espacial dos teores de fósforo no solo (P em mg dm^{-3}) em diferentes manejos da irrigação na safra 2011/2012.

O fósforo é necessário para perfilhamento, portanto a eficiência produtiva parcial de fósforo em grãos é maior nas fases de crescimento inicial. Quanto ao potássio o arroz requer grandes quantidades até que a fase reprodutiva esteja completa, 20% do potássio absorvido é translocado para panículas e o restante permanece nas partes vegetativas (YOSHIDA, 1981). O potencial de resposta do arroz à fertilização potássica é bastante elevado, tendo-se observado incrementos médios na produtividade de até $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (ANGHINONI et al. 2013). Liu et al. (2014) avaliaram 560 lavouras de arroz no sul da China e determinaram a variabilidade espacial de atributos químicos do solo e da produtividade do arroz para essa região. Os autores também observaram as maiores produtividades da cultura nas áreas com maiores teores de P e K.

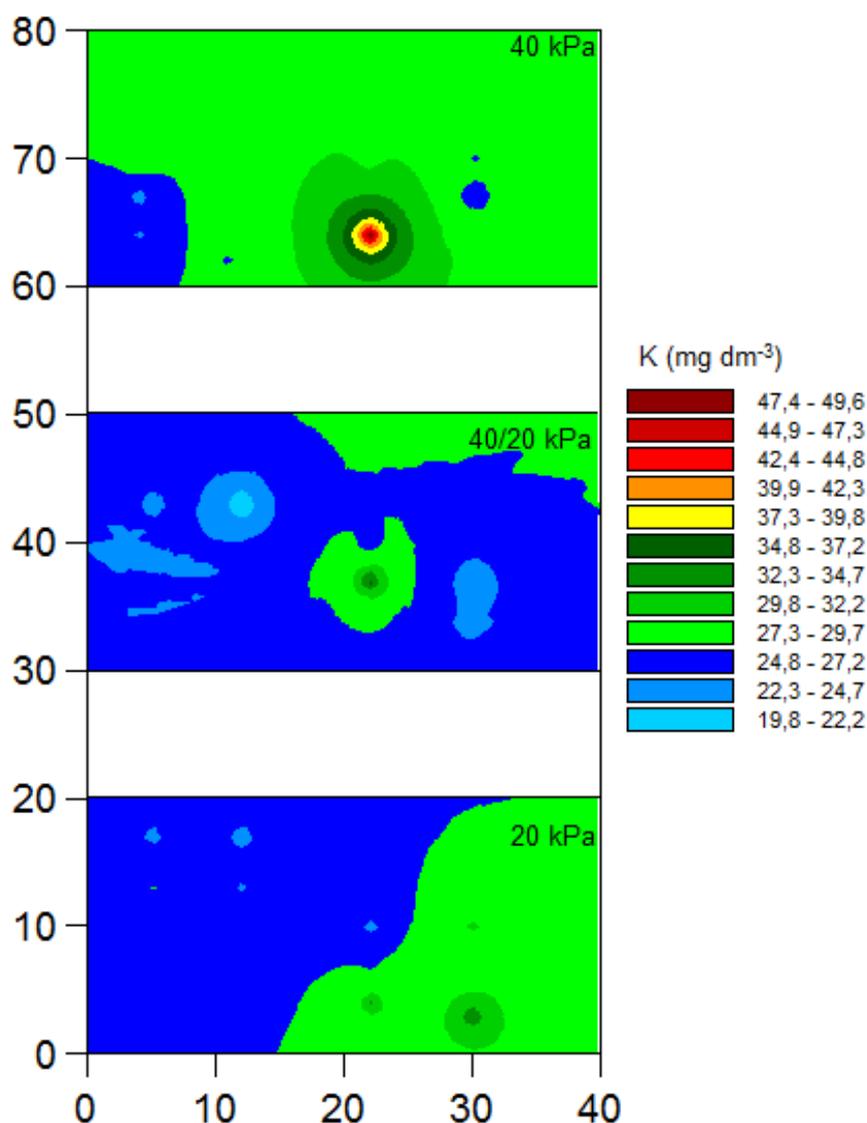


Figura 18 – Mapa de distribuição dos teores de potássio no solo (K em mg dm^{-3}) em diferentes manejos da irrigação na safra 2011/2012.

Na safra 2012/2013, conforme o modelo ajustado, os parâmetros saturação por alumínio e tensão de água no solo apresentaram efeito negativo sobre a produtividade do arroz sendo o efeito da microporosidade positivo (Tabela 7).

Assim como na safra 2011/2012 observa-se uma variabilidade espacial da tensão de água no solo em cada manejo de irrigação (Figura 19), por exemplo, no T1 onde a irrigação era feita quando a média da tensão de água no solo era de 10 kPa, a tensão média variou entre 7,6 e 17,7kPa e esta variabilidade refletiu-se diretamente na produtividade que no T1 variou em média entre 4500 e 7525 kg ha^{-1} (Figura 20).

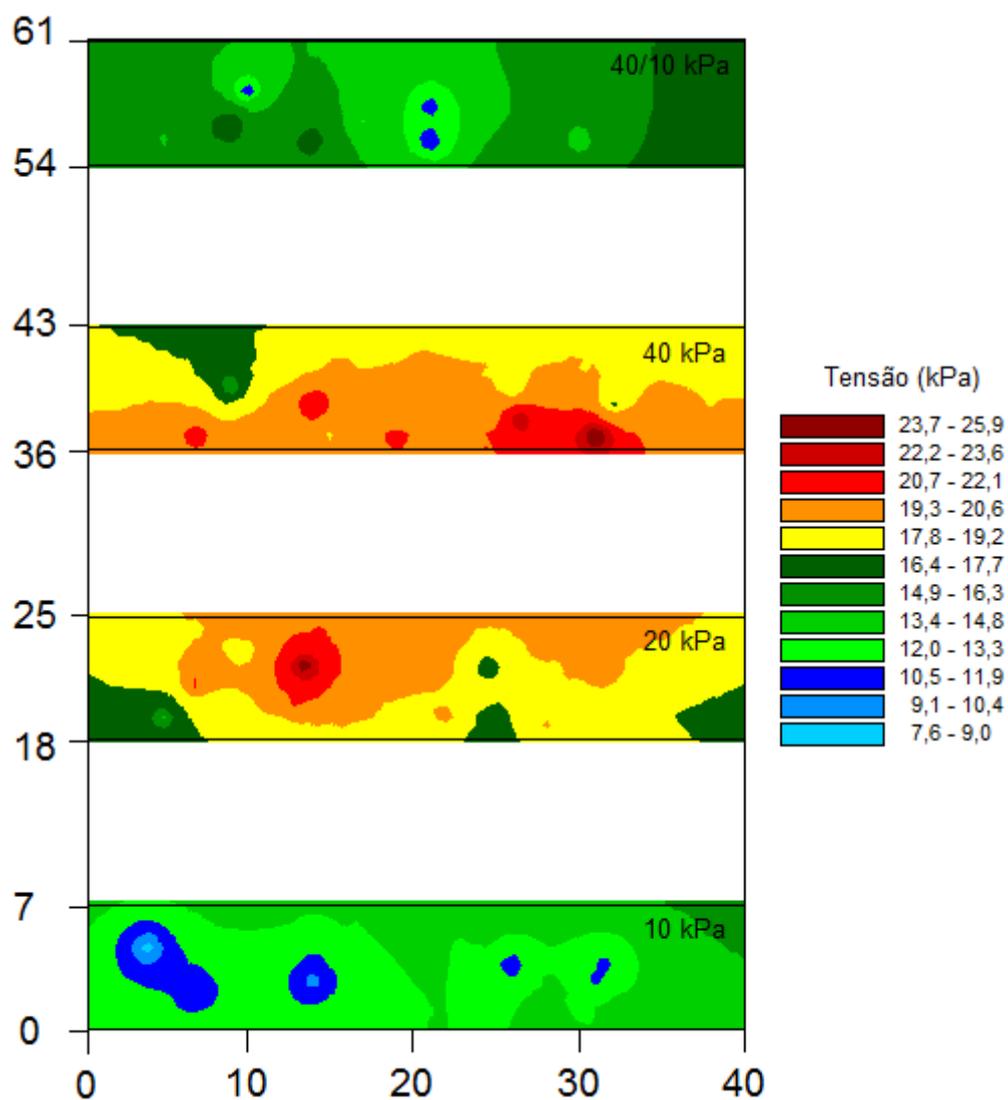


Figura 19 – Mapa de distribuição espacial da tensão de água no solo (Tensão em kPa) em diferentes manejos da irrigação na safra 2012/2013.

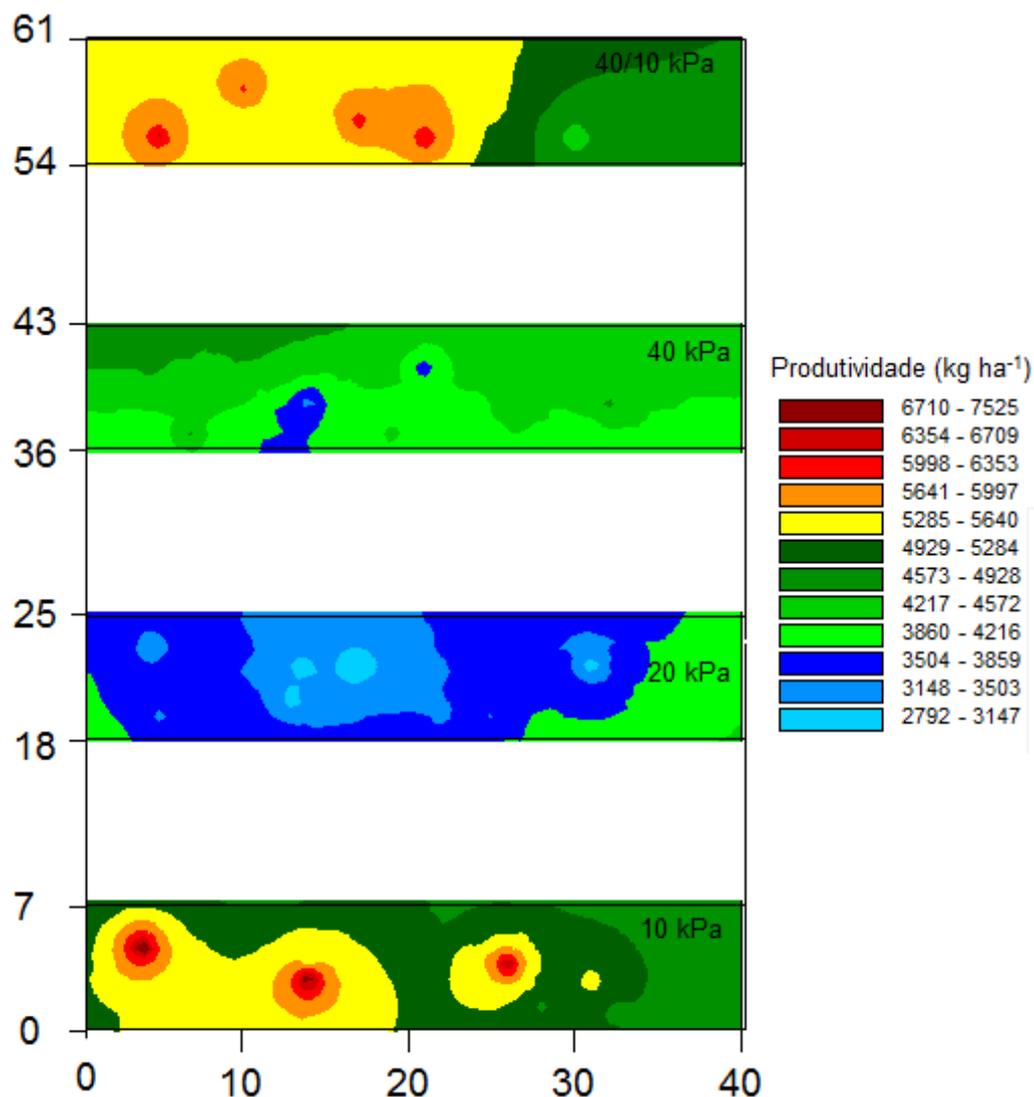


Figura 20 – Mapa de distribuição espacial da produtividade do arroz irrigado por aspersão em diferentes manejos da irrigação na safra 2012/2013.

Quanto à variabilidade da microporosidade do solo (Figura 21), observa-se que, dentro de cada manejo, quanto maior a porcentagem de microporos maior a produtividade da cultura (Figura 19). O que pode ter ocorrido devido ao fato de que nestas áreas há uma maior retenção de água no solo.

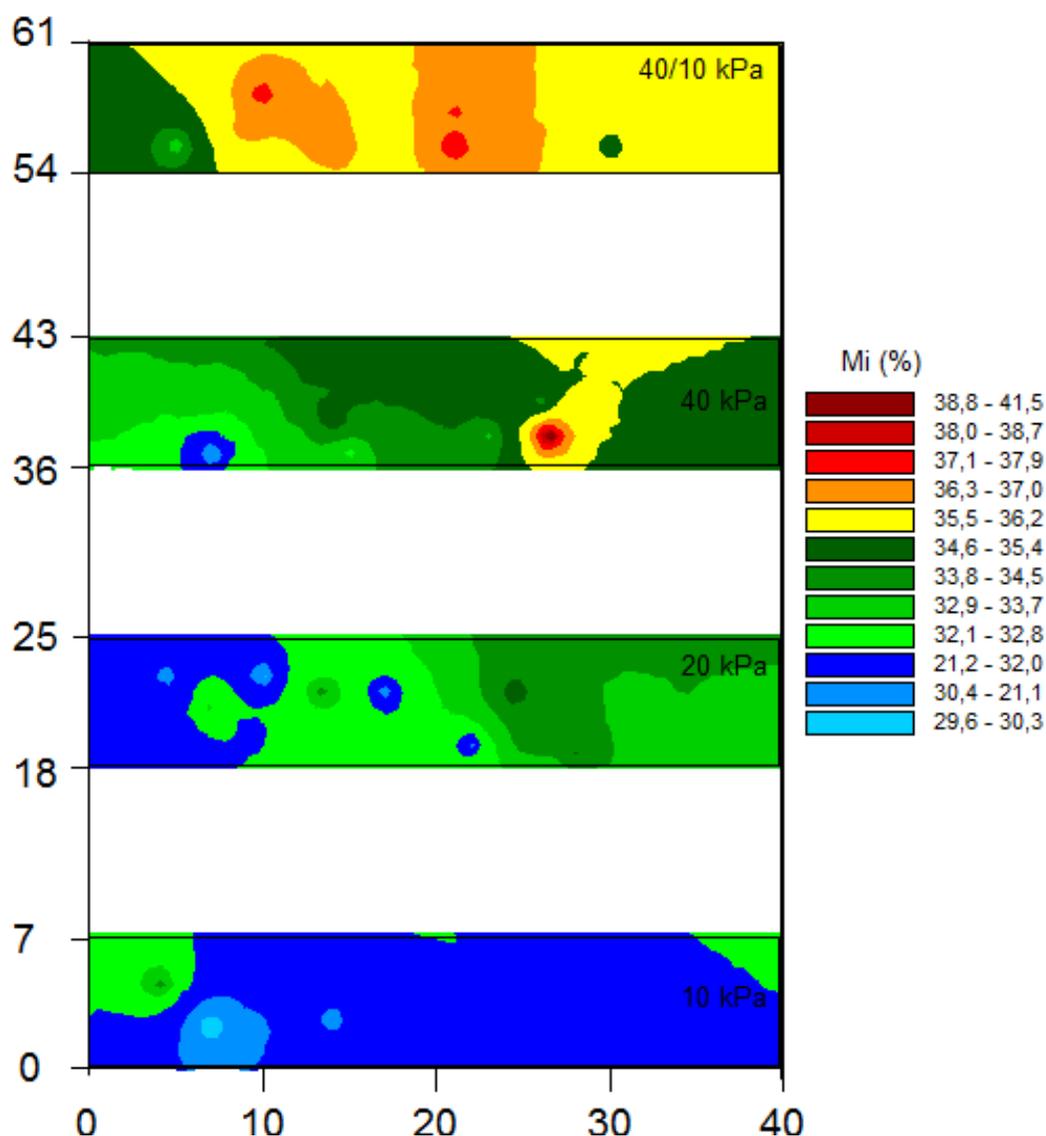


Figura 21 – Mapa de distribuição espacial da microporosidade do solo (Mi em %) em diferentes manejos da irrigação na safra 2012/2013.

A saturação por alumínio como esperado, apresentou efeito negativo sobre a produtividade da cultura e este atributo também apresentou variabilidade espacial dentro de cada tratamento (Figura 22). Segundo Fageria & Zimmermann (1979) o excesso de alumínio inibe a formação normal da raiz, o limitado crescimento das raízes restringe a absorção de nutriente e água, o que pode afetar consideravelmente o rendimento, em solos com baixa fertilidade e seco. Durigon et al. (2009) avaliaram a variabilidade espacial da saturação por alumínio e do rendimento numa lavoura de arroz irrigado por inundação no Rio Grande do Sul e também observaram uma correlação negativa e significativa entre este atributo e produtividade do arroz.

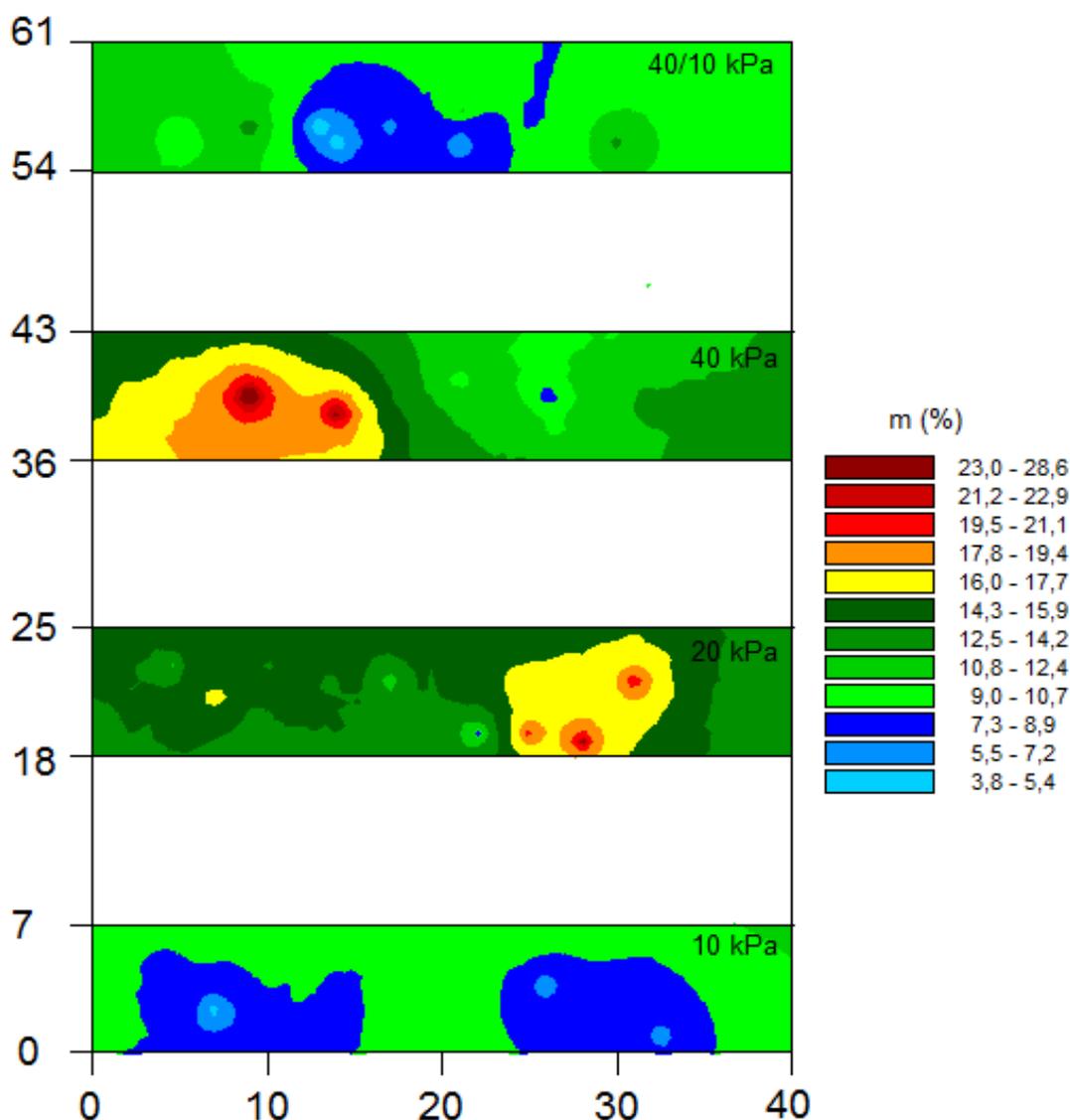


Figura 22 – Mapa de distribuição espacial da saturação por alumínio no solo (m em %) em diferentes manejos da irrigação na safra 2012/2013.

De maneira geral houve efeito conjunto da tensão de água no solo com os atributos químicos sobre a produtividade do arroz, posto que a água é meio de absorção dos nutrientes pelas plantas. Resultados semelhantes foram obtidos por Crusciol et al. (2013) que observaram que a redução na água disponível diminuiu o teor de nutrientes e a produtividade do arroz. Segundo Sands & Mulligan (1990), a adubação é mais efetiva quando as plantas não estão sob déficit hídrico; por sua vez, a irrigação é mais efetiva quando não há limitação nutricional no meio de cultivo. Quanto aos atributos físicos, determinou-se efeito significativo sobre a produtividade do arroz daqueles ligados diretamente à retenção de água e, conseqüentemente, à tensão de água no solo.

As maiores produtividades de arroz ocorreram nas áreas onde as tensões de água no solo foram inferiores a 10kPa, principalmente no período reprodutivo. Este resultado difere daquele obtido por Stone et al. (2006), que estabeleceram a tensão de 25kPa para a irrigação por aspersão de arroz de terras altas. Ressalta-se, porém, que o solo utilizado neste estudo é representativo de vastas extensões das terras baixas tradicionalmente cultivadas com arroz irrigado na região Sul do Brasil. Estes resultados reforçam a importância do manejo adequado da irrigação baseado na tensão ideal de água no solo, com reflexos diretos sobre a produtividade do arroz irrigado por aspersão.

5 Conclusões

- a) O aumento da tensão de água no solo diminui a produtividade do arroz irrigado, por aspersão.
- b) A tensão de água no solo de 10kPa, que por sua vez corresponde a capacidade de campo deste solo, é o valor adequado para o manejo da irrigação por aspersão na cultura do arroz variedade BRS Pampa, sobretudo no período reprodutivo.
- c) A variabilidade espacial da tensão de água no solo tem efeito na distribuição espacial da produtividade do arroz irrigado por aspersão dentro de um determinado manejo de irrigação.
- d) Quanto mais próximo de 40kPa for a tensão de água no solo menor a estatura das plantas e o número de grãos cheios por panícula. No entanto, esse efeito não foi verificado sobre o número de colmos por metro, sobre a massa de mil grãos, e sobre a esterilidade de espiguetas.
- e) Quanto maior for a microporosidade e os teores de fósforo e potássio e menores a macroporosidade e saturação por alumínio do solo maior a produtividade do arroz irrigado por aspersão em terras baixas no Rio Grande do Sul.

Referências

- ADEKOYA, M. A.; ZAOCHANG, L.; VERED, E.; LIGUO, Z.; DEYAN, K.; JIANYING, Q.; RUIFANG, M.; XINQIAO, Y.; GUOLAN, L.; LIN, C.; LIJUN, L. Agronomic and Ecological Evaluation on Growing Water-Saving and Drought-Resistant Rice (*Oryza sativa* L.) Through Drip Irrigation. **Journal of Agricultural Science**, v. 6, n. 5, p.110-119, 2014.
- ANGHINONI, I.; CARMONA, C. F.; GENRO JR., A. S.; BOENI, M. Adubação potássica em arroz irrigado conforme a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.11, p.1481-1488, 2013.
- ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F.; SÁ, M.E.; CRUSCIOL, C.A.C. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 6, p. 871-879, 2001.
- ARTIGIANI, A. C. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; ARF, O.; ALVAREZ, R.C.F.; NASCENTE, A.S. Produtividade e qualidade industrial do arroz de terras altas em função da disponibilidade hídrica e adubação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, n.3, p.340-349, 2012.
- ASSOCIAÇÃO DOS USUÁRIOS DO PERÍMETRO DE IRRIGAÇÃO DO ARROIO DURO – AUD. O Perímetro. Disponível em: <http://www.aud.org.br/o_perimetro.htm> Acessado em: 10 de abril de 2014.
- BAMBERG, A. L.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; TIMM, L. C.; PINTO, L. F. S.; LIMA, A. C. R.; SILVA, T. R. Densidade de um planossolo sob sistema de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1079-1086, 2009.
- BERNIER, J.; KUMAR, A.; RAMAIAH, V.; SPANER, D.; ATLIN, G. A Large-Effect QTL for Grain Yield under Reproductive-Stage Drought Stress in Upland Rice. **Crop Science**, v. 47, p. 507–518, 2007.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elements of the Nature and Properties of Soils**. New Jersey: P. Hall, 1999. 559p.
- BUSS, Gerson Lübke. **Emissões de Metano e Óxido Nitroso em Cultivo de Arroz Irrigado por Aspersão, Alagamento Contínuo e Intermitente**. 2012. 85f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

CARVALHO, D.F.; OLIVEIRA, L.F.C. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. Viçosa-MG: UFV, 2012. 240p.

CASTILHOS, R..M.V.; MEURER, E.J.; PINTO, L.F.S. Minerais fontes de potássio em dois planossolos do RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 22., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.330-333.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO- CQFSRS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo regional Sul, 2004. 394p.

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

CRUSCIOL, C. A. C.; ARF, O.; SORATTO, R. P.; MACHADO, J. R. Influência de lâminas de água e adubação mineral na nutrição e produtividade de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 647-654, 2003.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ARF, O. Root distribution, nutrient uptake, and yield of two upland rice cultivars under two water regimes. **Agronomy Journal**, v.105, p.237-247, 2013.

DONAGEMMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

DURIGON, R.; SCHLOSSER, J.F.; RUSSINI, A.; DORNELLES, M.E.C.; PINHEIRO, E.D. Correlações entre atributos químicos do solo e atributos da cultura e da produtividade de arroz irrigado determinadas com técnicas de manejo localizado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.9, p.2629-2633, 2009.

EMBRAPA – Embrapa Clima Temperado. **Cultivo de arroz irrigado no Brasil**. Sistemas de Produção 3, ISSN 1806-9207 versão eletrônica. 2005. Disponível em <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/cap01.htm>>. Acesso em 15 mai. 2014.

EMBRAPA – EMBRAPA CLIMA TEMPERADO: **Laboratório de Agrometeorologia**. Disponível em: <http://www.cpact.embrapa.br/agromet/>. Acesso em: 14 jun. 2014.

EMBRAPA – Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fok5vmke02wyiv80bhgp5prthjx4.html>>. Acesso em 15 jan. 2015.

FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Seleção de cultivares de arroz para tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.14, n.2, p.141-147, 1979.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>> Acesso em 28 jan. 2015.

FAO/AQUASTAT – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>>. Acesso em 20 jan. 2015.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. Funções de produção água-cultura. In: FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. (Ed.). **Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento**. Brasília: Embrapa, 2005. p. 283-314.

GINIGADDARA G.A.S.; RANAMUKHAARACHCHI, S.L. Effect of conventional, SRI and modified water management on growth, yield and water productivity of direct-seeded and transplanted rice in central Thailand. **Australian Journal of Crop Science**, v.3, n.5, p. 278-286, 2009.

GODOY, S. G. de; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. de B.; COBUCCI, T.; LACERDA, M. C. Correlação entre produtividade do arroz no sistema semeadura direta e atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.119-125, 2015.

GOMES, A.S.da; VAHL, L.C.; PAULETTO, E.A.; PORTO, V.H.F. da; GONZALES, B.D. Manejo de água em arroz irrigado. In: **Fundamentos para a cultura do arroz irrigado**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 251-276.

GOMES, A.S. da; PAULETTO, E.A.; PETRINI, J.A.; SOUSA, R.O. Manejo da água em arroz irrigado: implicações e recomendações técnicas. In: GOMES, A. da S.; PAULETTO, E.A. ed. **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.163-200.

GS+ for Windows. 2005. Gamma Design Software: Version 7.0.24.Plainwell, MI

HANKS, R.J. Model for predicting plant yield as influenced by water use. **Agronomy Journal**, v.66, p. 660-665, 1974.

HOWELL, T. A.; HILER, E. A. Optimization of water use efficiency under high frequency irrigation - I. Evapotranspiration and Yield Relationship. **Transactions of the ASAE**, v. 18, p. 873-878, 1975.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://serieestatisticas.ibge.gov.br/>>. Acesso em 15 jan. 2015.

JARRAMILLO, D.F.J. **Introducción a la Ciencia del Suelo**. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2002. 613p.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKY, T.T. (Ed.). **Water deficits and plants growth**. New York: Academic Press, 1968. p. 1-22.

JONES, H.G. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2 ed. 1992. 428 p.

KAHLLOWN M.A.; RAOOF A; ZUBAIR M; KEMPER W.D. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. **Agricultural Water Management**, v.87, p.292–298, 2007.

KATO, Y.; KATSURA, K. Rice Adaptation to Aerobic Soils: Physiological Considerations and Implications for Agronomy. **Plant Production Science**, v. 17, n.1,p.1-12, 2014.

KATO, Y.; OKAMI, M. Root morphology, hydraulic conductivity and plant water relations of high-yielding rice grown under aerobic conditions. **Annals of Botany**, v.108, p. 575-583, 2011.

KENNEDY, G.; BURLINGAME, B. Analysis of food composition data on rice from a plant genetic resources perspective. **Food Chemistry**. v. 80, p. 589-596, 2003.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. San diego: Academic press, 1995. 495p.

LIU, Z.; ZHOU, W.; SHEN, J.; HE, P.; LEI, Q.; LIANG, G. A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields in South China. **Geoderma**, v. 235, p. 39-47, 2014.

MACHADO, M.O. Caracterização e adubação do solo. In: **Fundamentos para a cultura do arroz irrigado**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p.129-179.

MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. BRS Pampa: cultivar de arroz agulhinha incrementa produtividade no Sul. **A Lavoura**. v.114, p.44-45, 2011.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Projeções do Agronegócio. Brasil 2012/2013 a 2022-2023 – Projeções de longo prazo. Brasília, DF. Jun de 2013. <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/projecoes%20-20versao%20atualizada.pdf>. Acesso em: 13 set. 2014.

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, 2001, Fortaleza, CE. **Anais...** V2. Fortaleza: ABID, 2001. p. 59-63.

MINHAS, B. S.; PARIKH, K. S.; SRINIVASAN, T. N. Towards the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. **Water Resources Research**, v. 10, p. 383-393, 1974.

NORONHA, C. L. Com boa gestão, não faltará água. Tempo das Águas, Rio Grande do Sul, 13 p. 2006. Disponível em: <http://www.lasercom.jor.br/tempo_aguas/01_gestao.htm>. Acesso em: 27 mar. 2011.

PATEL, D. P.; DAS, A.; MUNDA, G. C.; GHOSH, P. K.; BORDOLOI, J. S.; KUMAR, M. Evaluation of yield and physiological attributes of high-yielding rice varieties under aerobic and flood-irrigated management practices in mid-hills ecosystem. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 9, p. 1269-1276, 2010.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Meteorologia Agrícola**. 3 ed. Piracicaba, 2000.

PETRINI, J. A; AZAMBUJA, I. YH. V; MAGALHAES JUNIOR, A. M. de;FAGUNDES, R. R. R; WINKLER, A. S; KUHN, R. Estratégias de irrigação para redução do uso da água em arroz irrigado. In: Congresso Brasileiro de arroz irrigado, 8, 2013, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria SOSBAI, 2013. 2 pp 1180-1183.

PINHEIRO, B. da S. Características morfológicas da planta relacionada à produtividade. In: VIEIRA, N.R. de A.; SANTOS, A.B. dos; SANT'ANA, E.P. (eds.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. p.116-147.

PONNAMPERUMA, F.N. **Physico-chemical properties of submerged soils in relation to fertility**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1977. 32p. (Research Paper Series, 5)

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

RANNO, S. K.; SILVA, L. S.; MALLMANN, F. J. K. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Agrocência**, v.13, p.47-54, 2007.

RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, v.13, p. 25-32, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2ª Ed. Barueri, SP: Manole, 2012. 500p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. & BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

SANCHEZ S., L.F. Aspectos sobre suelos y fertilización del arroz de riego com énfasis en Colombia. **Arroz**, v.29, n.309, p.22-31, 1980.

SANDS, R.; MULLIGAN, D.R. Water and nutrient dynamics and tree growth. **Forest Ecology and Management**, v.30, p.91-111, 1990.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.3, p.287-294, 1998.

SHOCK, C.C., E.B.G. FEIBERT, AND L.D. SAUNDERS. Umatilla Russet and Russet Legend potato yield and quality response to irrigation. **HortScience**, v. 38, p.1117–1121, 2003.

SHOCK, C.C.; WANG, F.X. Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. **HortScience**, v. 46, p. 178–185, 2011.

SILVA, C. A. S.; PARFITT, J. M. B. **Drenagem superficial para diversificação do uso dos solos de várzea do Rio Grande do Sul**. Circular Técnica 40, Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS. 2004. 10p.

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

SCIVITTARO, W. B.; STEINMETZ, S.; SEVERO, A. C. M. **Demanda hídrica e eficiência de uso da água pelo arroz: influência do período de supressão da irrigação**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2010 (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Porto Alegre, RS: SOSBAI, 2010.188p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Itajaí, SC: SOSBAI, 2012.179p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Santa Maria, RS: SOSBAI, 2014.192p.

SOUSA, R. O.; CAMARGO, F. A. de O.; VAHL, L. C. Solos alagados: reações de redox. In: MEURER, E. J. (Org.). **Fundamentos de química do solo**. 3 ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006, p. 185-211.

STEINMETZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JUNIOR, A.M. (Eds.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 45-74.

STEWART, J. I.; HAGAN, R. M.; PRUITT, W.O.; HEANKS, R.J.; RILEY, J.P.; DANIELSON, R.E.; FRANKLIN, W.T.; JACSON, E.B. **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil**. Utah Water Reserch Laboratoty. Publ, No. PRWW 15 1 - 1, Utah State University, Logan. 1977. 191p.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; SILVEIRA, P.M. **Cultivo do arroz de terras altas no Estado do Mato Grosso**. Sistemas de Produção 7, Embrapa Arroz e Feijão, Setembro de 2006.

SUDAR, R.A.; SAXTON, K.E.; SPOMER, R.G. A predictive model of water stress in corn and soybeans. **Transactions of ASAE**, v. 24, p. 97-102, 1981.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 722p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A. ; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Departamento de Solos-UFRGS, 1995. 174 p.

TESFAHUNEGN, G.B., TAMENE, L., VLEK, P.L.G. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. **Soil Tillage Research**, v.117, p.124–139, 2011.

VILLA, E.J.; HENRY, A.; XIE, F.; SERRAJ, R. Hybrid rice performance in environments of increasing drought severity. **Field Crops Research**, v.125, p.14–24, 2011.

VORIES,E. D.; STEVENS, W. E. TACKER, P. L.; GRIFFIN, T. W.; COUNCE, P. A. Rice production with center pivot irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, v.29, n.1, p.51-60, 2013.

WESTCOTT, M.P.; VINES, K.W.A. Comparison of sprinkler and flood irrigation for rice. **Agronomy Journal**, v.78, n.4, p.637-640, 1986.

YOSHIDA, S. Growth and development of the rice plant. In: **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños : International Rice Research Institute, p. 1-63, 1981.

ZAIN, N.A.M.; ISMAIL, M.R.; MAHMOOD, A.P.M.; ISLAM, M.R. Impact of cyclic water stress on growth, physiological responses and yield of rice (*Oryza sativa* L.) grown in tropical environment. **Ciência Rural**, v.44, n.12, p.2136-2141, 2014.

ZHU, J.K. Salt and drought stress signal transduction in plants. **Annual Review of Plant Biology**. n. 53, p. 247–73, 2002.

Apêndices

Apêndice A: Lâminas diárias de irrigação (mm) aplicadas em cada tratamento nas safras 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014.

Data	Irrigação (mm)									
	2011/2012			2012/2013				2012/2013		
	20 kPa	40 kPa	40/20 kPa	10 kPa	20 kPa	40 kPa	40/10 kPa	10 kPa	40 kPa	40/10 kPa
14/11										
15/11										
16/11										
17/11				6	3	3	3			
18/11										
19/11										
20/11				6						
21/11										
22/11										
23/11										
24/11										
25/11										
26/11				6						
27/11										
28/11	6	6	6					3	3	3
29/11								6		6
30/11								6		
1/12								6		6
2/12				6				9		9
3/12				9	9	9	9			
4/12								9		
5/12	6	6	6						9	9
6/12				6	6			9	9	
7/12										9
8/12								9		
9/12								9	9	9
10/12				6						
11/12										
12/12								9	9	9
13/12				6	3	3	3	9	9	9
14/12	6	6	6	6				9	9	9
15/12				6	6					9
16/12				6	6			9	9	9
17/12								9	9	9
18/12	6			6	6	6	6	9	9	9
19/12	3	6	6					9		9
20/12	6	6	6					9	9	9
21/12	9							9	9	9
22/12	6	6	6					9	9	9
23/12								9	9	9
24/12				6				9	9	9
25/12				6				9	9	9
26/12								9	9	9
27/12	9		9					9	9	9
28/12	9	9						9	9	9

29/12								9	9	9
30/12	9	9	9	9				9	9	9
31/12				9				9		9
1/1										
2/1										
3/1				9						
4/1				6	6			9		
5/1	12			9	9			9		
6/1								9	9	
7/1	3	9	9	9	9	9	9	9	9	9
8/1	9	6	9							9
9/1										
10/1	9	3	9	9				9		
11/1	9	9								
12/1		9								
13/1				9	9	9	9			
14/1				9	9		9			
15/1				9	9		9			
16/1				9	9	9	9			
17/1	9			9		9	9	9		9
18/1	9	3	9					9		9
19/1		9	9					9	9	9
20/1	3	9	3					9	9	9
21/1	9		3	12	12	12	12	9	9	9
22/1	3	9	9	15	15	9	15			
23/1	9	9	9	15	12		12			
24/1										
25/1								9	9	9
26/1	9		9					9		9
27/1	9	9	9	12	9		9			9
28/1				9		9				9
29/1	9	9	3	9	9		9			
30/1				9	9	9	9			
31/1							9			
1/2	9	3	3	9	9	9	9			
2/2			9							
3/2		9								
4/2				9			9			
5/2										9
6/2				12	12		12	9		9
7/2				12	12	12	12	9		9
8/2				9	9		9	9	9	9
9/2										9
10/2				12	6	6	12	9		
11/2				12	6		9			
12/2			9							
13/2	9									
14/2	9	9	9							
15/2		9	9	9						
16/2	9	9					9	9		9
17/2	9	9	9	9			9	9	9	9
18/2								9		9
19/2				6	6			3	3	3

