

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Robson Giacomeli

**MANEJO DE SOLO E ÁGUA EM SOJA E ARROZ  
EM TERRAS BAIXAS**

Santa Maria, RS  
2019

**Robson Giacomeli**

**MANEJO DE SOLO E ÁGUA EM SOJA E ARROZ  
EM TERRAS BAIXAS**

Tese de doutorado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Reimar Carlesso

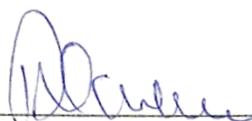
Santa Maria, RS  
2019

**Robson Giacomeli**

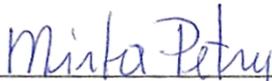
**MANEJO DE SOLO E ÁGUA EM SOJA E ARROZ  
EM TERRAS BAIXAS**

Tese de doutorado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Agrícola**.

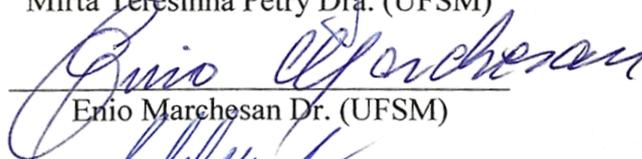
**Aprovado em 11 de março de 2019**



Reimar Carlesso Dr. (UFSM)  
Presidente/Orientador



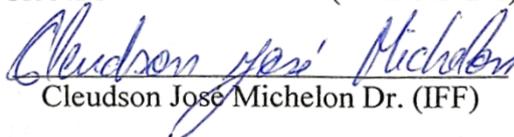
Mirta Teresinha Petry Dra. (UFSM)



Enio Marchesan Dr. (UFSM)



Cleber Maus Alberto Dr. (UNIPAMPA)



Cleudson José Michelin Dr. (IFF)

Santa Maria, RS  
2019

Giacomeli, Robson  
Manejo de solo e água em arroz e soja em terras  
baixas / Robson Giacomeli.- 2019.  
84 p.; 30 cm

Orientador: Reimar Carlesso  
Coorientadora: Mirta Teresinha Petry  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2019

1. Arroz 2. Camalhão 3. Irrigação por aspersão 4.  
Plantio direto 5. Soja I. Carlesso, Reimar II. Teresinha  
Petry, Mirta III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Robson Giacomeli. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte. Endereço: Rua Luiz Joaquim de Sá Brito, s/n, Bairro Promorar, Itaqui, RS, 97.650-000. Fone: +55 55 9.99919-2041; E-mail: robsongiacomeli@yahoo.com.br

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Paulo Renato Giacomeli e Loreci Luci Alves Giacomeli, minha irmã Renata Giacomeli, e a meus tios padrinhos, Nilza Giacomeli Scallon e Eroni Vogelei Escallon que dignamente me apresentaram à importância do caminho da honestidade, a persistência, e não mediram esforços para que pudesse chegar até aqui.*

## AGRADECIMENTOS

O sonho da obtenção do título de Doutor, concretizado com a redação dessa tese, só foi possível graças a pessoas que contribuíram das mais diversas formas antes, durante e após a execução das atividades. De maneira especial, agradeço:

À UFSM, ao programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, aos professores, funcionários, órgãos de fomento à pesquisa.

À UNIPAMPA, que permitiu a continuidade dos meus estudos, com a liberação de horas de trabalho para minha qualificação e a disponibilização da infraestrutura para execução dos experimentos.

Aos professores Reimar Carlesso e Mirta Petry, pela orientação, exemplo profissional, ensinamentos, dedicação, oportunidades, amizade e estrutura disponibilizada.

Aos professores Enio Marchesan, Cleber Maus Alberto e Cleudson José, pelos ensinamentos passados e as colaborações com o trabalho.

À toda minha família, por todo apoio, o incentivo e a compreensão nos momentos de ausência.

À minha companheira, Núbia Pentiado Aires, pela parceria, compreensão, atenção e zelo. Agradeço por ter estado presente nessa jornada, tornando-a mais tranquila.

Aos colegas de pós-graduação Leonardo, Max, Bruno, Geraldo, Marília, Cassiane, Lethícia, Maria Soledad, Marta, Laudenir, Carlos e Maicon pela troca de experiência, amizade e as contribuições com o grupo de pesquisa, nos momentos em que estava ausente da UFSM.

Ao bolsista Fernando Sintra, e aos colegas do Grupo de Pesquisa IRRIGA, Diego, Jessica, Vinicius, Felipe, Cassio, Bernardo, Gabriel, Andressa, Giovana e Mariana, pelos auxílios nas avaliações do experimento e das amostras no laboratório de solos.

Aos amigos do “apê sentinela” Glauber e Anderson que foram minha segunda família em Santa Maria durante esse período.

Aos Amigos, Edgar, Carjone, Luciano, Adriane, Lucas, e Felipe pelo incentivo para dar continuidade aos meus estudos.

Aos colegas de trabalho, e amigos Edgar e Rodrigo que ficaram sobrecarregados, e tornaram possível a continuidade dos meus estudos.

À todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, e não estão aqui citados.

**A todos, meu muito obrigado!**

*Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.*

*(Leonardo da Vinci)*

## RESUMO

# MANEJO DE SOLO E ÁGUA EM SOJA E ARROZ EM TERRAS BAIXAS

AUTOR: Robson Giacomeli

ORIENTADOR: Dr. Reimar Carlesso

As áreas de terras baixas com produção agrícola da metade Sul do Rio Grande do Sul são predominantemente cultivadas com o arroz, irrigado por inundação. Esse método de irrigação utiliza mais água e emite maiores quantidades de gases de efeito estufa, comparado a outros métodos. Além disso, os solos dessas áreas apresentam baixa qualidade física para cultivos aeróbicos que, associada à baixa declividade, acarreta problemas de excesso e déficit hídrico para esses cultivos. Tais características, muitas vezes impedem a rotação do arroz com outras culturas. Diante do exposto, foram conduzidos experimentos com as culturas do arroz e da soja, nas safras agrícolas 2016/17 e 2017/18, que resultaram em dois artigos. O primeiro artigo refere-se a experimentos com a cultura da soja, e teve como objetivo avaliar os efeitos de métodos de irrigação e manejos do solo nas propriedades físicas do solo e no crescimento e a produtividade de grãos da cultura da soja em terras baixas. Dois fatores foram estudados: Sistemas de irrigação e Manejo do solo. Como tratamentos no fator sistemas de irrigação, foram utilizadas as irrigações por aspersão, por faixas e sem irrigação. Para os manejos do solo, os tratamentos foram: preparo convencional do solo, semeadura direta, preparo convencional com camalhão e camalhão em semeadura direta. O segundo artigo, contempla a cultura do arroz e teve como objetivo avaliar métodos alternativos de irrigação e de manejos do solo para cultivo de arroz em terras baixas. Também foram estudados dois fatores, com os tratamentos de irrigação por aspersão, por faixas e inundação, para os sistemas de irrigação, e para os manejos do solo foram o preparo convencional, semeadura direta e camalhão. Nos resultados dos artigos são apresentadas as propriedades físicas do solo (densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade), a necessidade de irrigação, distribuição do sistema radicular, componentes e a produtividade de grãos, produtividade da água total e da água de irrigação. O manejo do solo com preparo convencional aumenta a resistência do solo à penetração mecânica próximo a 0,1 m de profundidade em solos de terras baixas. Em anos de chuvas irregulares, o manejo do solo em semeadura direta sem irrigação resulta em um incremento de produtividade de grãos de soja de 20%, em relação ao manejo convencional não irrigado, e a irrigação, aumenta a produtividade de grãos em 37%. No arroz, a irrigação por aspersão resultou em uma maior produtividade da água de irrigação ( $3,82 \text{ kg m}^{-3}$ ), em relação a irrigação por faixas ( $1,64 \text{ kg m}^{-3}$ ) e inundação ( $1,21 \text{ kg m}^{-3}$ ). Conclui-se que a irrigação por aspersão, pode ser utilizada como alternativa à irrigação por inundação, em semeadura direta, para cultivo de arroz e soja, com maior produtividade da água de irrigação e que o manejo do solo não interfere na produtividade de grãos de arroz quando irrigado por inundação.

**Palavras chave:** Arroz. Camalhão. Irrigação por aspersão. Plantio direto. Soja.

## ABSTRACT

### SOIL AND WATER MANAGEMENT FOR SOYBEAN AND RICE IN LOWLANDS

AUTHOR: Robson Giacomeli

ADVISER: Dr. Reimar Carlesso

The lowland areas with agricultural production in the southern half of Rio Grande do Sul are predominantly cultivated with rice, flood irrigated. This irrigation method uses more water and emits larger amounts of greenhouse gases compared to other methods. In addition, the soils of these areas present low physical quality for aerobic crops, which associated with the low slope, results in problems with water excess and/or deficit for crops. Such characteristics often prevent the rotation of rice with other crops. Given these challenges, experiments were carried out with rice and soybean crops in the 2016/17 and 2017/18 agricultural seasons, which were summarized in two scientific papers. The first paper refers to the experiments with the soybean crop, and aimed to evaluate the effects of irrigation systems and soil management on soil physical properties and soybean growth and grain yield cultivated in lowlands. Two factors were studied, being irrigation systems and soil management. Between the irrigations systems, it was tested sprinkler irrigation, border irrigation and rainfed. For soil management, the treatments were composed by tillage, no-tillage, tillage with raised-seedbed and no-tillage with raised-seedbed. The second scientific paper addresses rice crop and the objective was to evaluate irrigation systems and soil management for rice cultivated in lowlands. It also had two factors, being the irrigation systems composed by the sprinkler, border and flood irrigation and the soil management composed by conventional tillage, no-tillage and conventional tillage with raised-seedbed. In the results, the variables analyzed were the soil physical properties (bulk density, total porosity, soil resistance to penetration, macroporosity and microporosity), irrigation water requirement, root system distribution, yield components, grain yield, total water productivity and irrigated water productivity. Soil management with conventional tillage increases soil resistance to penetration near 0.1 m depth in lowland soils. In years of uneven rainfall, the soil management in no-tillage without irrigation results in an increase of 20% in soybean grain yield compared to conventional tillage non-irrigated, and irrigation increases grain yield by 37%. For rice, sprinkler irrigation resulted in higher irrigation water productivity ( $3.82 \text{ kg m}^{-3}$ ), compared to border ( $1.64 \text{ kg m}^{-3}$ ) and flood ( $1.21 \text{ kg m}^{-3}$ ). It was concluded that sprinkler irrigation can be used as an alternative to flood irrigation, in no-tillage, for rice and soybean cultivation, with higher irrigation water productivity and that soil management does not interfere with rice grain yield when flood irrigated.

**Keywords:** Rice. Raised seedbed. Sprinkler irrigation. No-tillage. Soybean.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### ARTIGO I

- Figura 1 - Temperatura média do ar, evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e chuva nas safras agrícolas 2016/17 e 2017/18..... 26
- Figura 2 - Instalação dos manejos do solo em preparo convencional e camalhão convencional no ExpI, em 31 de outubro de 2016 e semeadura da cultura da soja no ExpII em 31 de outubro de 2017. Itaqui, RS..... 28
- Figura 3 - Conteúdo de água no solo, chuva e irrigações realizadas nos métodos de irrigação por aspersão, faixas e não irrigado nos manejos de solo com preparo convencional, semeadura direta, Camalhão convencional e Camalhão direto em terras baixas na safra agrícola 2017/18 na camada de 0 - 0,25 m de profundidade. Itaqui, RS..... 36
- Figura 4 - Espaço aéreo no solo, chuva e irrigações realizadas nos métodos de irrigação por aspersão, faixas e não irrigado nos manejos de solo com preparo convencional, semeadura direta, Camalhão convencional e Camalhão direto em terras baixas na safra agrícola 2017/18 na camada de 0 - 0,25 m de profundidade. Itaqui, RS..... 37
- Figura 5 - Temperatura do solo na camada de 0 - 0,05 m de profundidade nos tratamentos com preparo convencional e semeadura direta, nos meses de novembro e dezembro de 2017. Itaqui, RS..... 38
- Figura 6 - Distribuição do sistema radicular da cultura da soja irrigada por aspersão nos manejos do solo convencional, semeadura direta, camalhão com convencional e camalhão direto, irrigada por faixa nos tratamentos com preparo convencional e semeadura direta, e sem irrigação nos tratamentos convencional e semeadura direta no estágio fenológico R5 na safra agrícola 2017/18, em quadriculas de 0,05 x 0,05 m. Itaqui, RS..... 37

### ARTIGO II

- Figura 1 - Temperatura média do ar, evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e chuva diária das safras agrícolas 2016/17 e 2017/18..... 54
- Figura 2 - Conteúdo de água no solo em métodos de irrigação e manejos de solo preparo convencional, semeadura direta e semeadura direta em camalhão cultivado com arroz em terras baixas na safra 2017/18 na camada de 0-0,2 m de profundidade. Itaqui, RS..... 59
- Figura 3 - Distribuição do sistema radicular da cultura do arroz nos manejos do solo em preparo convencional e semeadura direta irrigados por aspersão, no experimento II, em estágio fenológico R6. Itaqui, RS..... 61

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO I

- Tabela 1 - Características físicas e químicas do solo, nas diferentes profundidades, antes da instalação dos experimentos. Itaqui, RS..... 26
- Tabela 2 - Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, em métodos de irrigação e manejos de solo em terras baixas. Itaqui, RS..... 33
- Tabela 3 - Conteúdo de água no potencial -100 kPa e resistência do solo à penetração mecânica nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade em métodos de irrigação e manejos de solo em terras baixas. Itaqui, RS..... 34
- Tabela 4 - Porcentagem de cobertura do solo pelo dossel aos 40 dias após semeadura no experimento I e II (Safrá 2016/17 e 2017/18), e no experimento II, número e massa seca de nódulos por planta, altura de plantas e número de legumes de soja em método de irrigação e manejos do solo em terras baixas. Itaqui, RS..... 41
- Tabela 5 - Produtividade de grãos, massa de mil grãos, produtividade da água e da água de irrigação no experimento I e II (Safrá 2016/17 e 2017/18), e massa seca total e índice de colheita no experimento II, na cultura soja em diferentes métodos de irrigação e manejos do solo em terras baixas. Itaqui, RS..... 42

### ARTIGO II

- Tabela 1 - Características físicas e químicas do solo da área experimental, nas diferentes profundidades, com amostragem realizada antes da instalação dos experimentos. Itaqui, RS..... 49
- Tabela 2 - Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em dois experimentos com diferentes métodos de irrigação e manejos de solo para cultivo de arroz em terras baixas. Itaqui, RS..... 60
- Tabela 3 - Altura de plantas, rendimento de grãos inteiros, massa de mil grãos de arroz, produtividade de grãos, massa seca total, índice de colheita da parte aérea, produtividade da água da irrigação de arroz em dois experimentos com diferentes métodos de irrigação e manejos do solo. Itaqui, RS..... 64

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	14
2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SOLOS DE TERRAS BAIXAS CULTIVADOS COM ARROZ NO RIO GRANDE DO SUL.....	14
2.2 DESAFIOS PARA A ROTAÇÃO DE CULTURAS NAS TERRAS BAIXAS DO RIO GRANDE DO SUL .....	15
2.3 ESTRESSES HÍDRICOS E SEUS EFEITOS NA SOJA.....	16
2.3.1 Déficit hídrico .....	17
2.3.2 Excesso hídrico .....	17
2.4 UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO .....	18
2.4.1 Irrigação por superfície .....	19
2.4.2 Irrigação por aspersão .....	20
2.5 MANEJO DO SOLO PARA ROTAÇÃO DE CULTURAS EM TERRAS BAIXAS .	20
<b>3 ARTIGO I - Irrigação e manejos do solo para produção de soja</b> .....	22
Resumo .....	22
Introdução .....	23
Material e Métodos .....	24
Resultados e Discussão.....	31
Conclusão.....	45
Referências bibliográficas.....	46
<b>4 ARTIGO II - Métodos de irrigação e manejo do solo para produção de arroz em terras baixas</b> .....	50
Resumo .....	50
Introdução .....	51
Material e Métodos .....	53
Resultados.....	58
Discussão .....	65
Conclusões .....	70
Referências bibliográficas.....	71
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	76
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	78
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	79

## 1 INTRODUÇÃO

As áreas de terras baixas têm como características a reduzida declividade natural e em alguns casos, a sistematização do solo em nível ou com pequeno desnível. Esses solos, quando cultivados, apresentam uma reduzida taxa de infiltração de água, baixa porosidade e macroporosidade, além de uma possível camada compactada próxima à superfície. Essas características favorecem o cultivo de arroz irrigado por inundação. Este método é adotado na maioria das terras baixas cultivadas com arroz no mundo. A irrigação por inundação apresenta como problemas o elevado uso de água e emissão de gases de efeito estufa e pode causar a persistência de agrotóxicos na água.

O arroz é o segundo cereal mais cultivado mundialmente, com área de 161 milhões de hectares, correspondendo a 29% do total dos grãos utilizados na alimentação humana, sendo considerado uma das culturas mais importantes na solução de questões de segurança alimentar. No Estado do Rio Grande do Sul (RS), a produção concentra-se na metade sul, onde predominam planícies aluviais, onde, anualmente, são cultivados um milhão de hectares com arroz, dos 6,5 milhões presentes. Essas áreas são classificadas de acordo com a declividade e altitude, inferiores a 3% e 200 m, respectivamente.

Nos solos de terras baixas, as principais culturas agrícolas utilizadas são o arroz irrigado na primavera-verão e a pastagem com azevém no outono-inverno. Observa-se a estabilização do teto produtivo nas últimas 5 safras, relacionada, principalmente, ao aumento no número de plantas daninhas resistentes ou de difícil controle aos herbicidas. Outros problemas são a falta de rotação de culturas e de práticas conservacionistas do solo, resultando em sua deterioração de qualidade física, química e biológica.

No entanto, as mesmas características físicas do solo que viabilizam a irrigação por inundação, proporcionam frequentes períodos de excesso hídrico, limitando o espaço de aeração do solo, reduzindo a produtividade de culturas não adaptadas a um ambiente anaeróbico no sistema radicular, como a soja. Algumas estratégias de implantação da cultura, como escarificação do solo, semeadura sobre camalhão ou com haste sulcadora na deposição do fertilizante, propiciam produtividades de soja semelhantes as obtidas em terras altas e melhorias nas propriedades físicas do solo.

Outra estratégia para atenuar os efeitos da baixa qualidade física do solo para culturas aeróbicas em caso de déficit hídrico é a utilização da irrigação, que, quando bem manejada, permite uma disponibilidade de água no solo próximo ao ideal para o crescimento de plantas. Com o viés de facilitar a rotação de culturas nas terras baixas e as questões ambientais

envolvidas com a inundação do solo, outros métodos de irrigação devem ser estudados. A irrigação por aspersão ou por faixas, aliado a práticas conservacionistas de manejo do solo, podem ser as principais alternativas, proporcionando melhor eficiência no uso da água para cultura do arroz e reduzindo riscos para os cultivos em rotação.

Sistemas de irrigação sem a manutenção permanente de lâmina de água sobre o solo durante o ciclo da cultura do arroz, como a irrigação por faixas, quando manejado adequadamente, demandam menor uso de água que a inundação. Quando for utilizada a irrigação por sulcos, o sistema possibilita o estabelecimento de culturas sobre camalhões, contribuindo na drenagem da camada superficial do perfil do solo, auxiliando a aeração do solo e viabilizando o cultivo de culturas anuais não adaptadas à ambiente parcial ou plenamente anaeróbico, facilitando a irrigação, quando necessária.

A irrigação por aspersão em sistemas mecanizados, como o pivô central, pode permitir a implementação de um sistema de plantio direto, cultivando também o arroz sem o preparo do solo, realizado na maioria dessas áreas anualmente. Esse método pode apresentar redução de até 75% no uso de água, em comparação com a inundação. Além disso, a adoção do plantio direto proporciona melhorias na qualidade física do solo e, com a irrigação por aspersão, manutenção da produtividade a longo prazo, em relação ao cultivo convencional. Dessa forma, a irrigação por aspersão aliada ao plantio direto pode facilitar também a rotação de culturas em terras baixas.

Na fronteira oeste do RS, observa-se a intensificação da instalação de equipamentos de pivô central nos últimos anos para a irrigação de arroz em terras baixas, chegando a aproximadamente 30 equipamentos. Enquanto isso, na região da campanha e zona sul, ampliou-se o cultivo de soja em terras baixas, chegando a 300 mil ha no Estado atualmente, irrigadas por superfície, em alguns casos. Em ambas situações, as irrigações são realizadas sem critérios técnicos, com irrigação diária do arroz, com uso de água excessiva, próximo ao utilizado no sistema de inundação, e causando problemas de excesso e déficit hídrico na soja. Objetivou-se com esse trabalho avaliar a influência de sistemas de irrigação e manejos do solo nas propriedades físicas do solo e no crescimento e produtividade de grãos das culturas da soja (Artigo I) e do arroz (Artigo II), para rotação de culturas em terras baixas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SOLOS DE TERRAS BAIXAS CULTIVADOS COM ARROZ NO RIO GRANDE DO SUL

Os solos aptos para o cultivo de arroz irrigado por inundação no Rio Grande do Sul (RS) compreendem aproximadamente 6,5 milh  es de hectares (MIURA et al., 2015), representando cerca de 20% da área do Estado (MARCHEZAN et al., 2002; GOMES et al., 2006). Nessas áreas, são encontrados solos classificados como Planossolos, Chernossolos, Neossolos, Vertissolos, Plintossolos, Gleissolos, entre outros, que representam respectivamente, 56, 16, 12, 9, 8 e 7% da  rea (PINTO et al., 2004). Esses solos têm como característica comum a presença de horizonte B com acúmulo de argila ou de camadas adensadas próximas a superfície quando cultivados, que os tornam praticamente impermeável (SANTOS et al., 2018). Somando-se a isso, geralmente apresentam pouca declividade, resultando em drenagem natural deficiente ou hidromórfica, as quais lhes confere determinadas características limitantes ao crescimento das culturas. Desta forma, esses solos são cultivados majoritariamente com arroz irrigado no verão e pastagem de azevém no inverno. Essa prática agrícola compreende uma área anual de aproximadamente 1,1 milhão de hectares no Estado (CONAB, 2019).

Em rela o às características físicas, esses solos quando cultivados apresentam baixa porosidade, reduzida macroporosidade, camadas compactadas próximas   superfície, baixa estabilidade de agregados e tendência   forma o de selamento superficial (BEUTLER et al., 2012; GIACOMELI et al., 2017; GUBIANI et al., 2018; SARTORI et al., 2015, 2016). Essas características fazem com que eles apresentem baixa condutividade hidráulica e reduzida velocidade de infiltra o de água, as quais associadas   baixa declividade, dificultam o processo de drenagem natural (GOMES et al., 2006). Desta forma, a ocorrência de períodos prolongados de baixa disponibilidade de oxig nio no solo   potencializada. E, por outro lado, durante períodos de estiagem, os solos de terras baixas apresentam baixa capacidade de armazenamento de água, limitando a disponibilidade de água para culturas não irrigadas. Assim, o intervalo de umidade ideal para o crescimento e desenvolvimento de culturas anuais   reduzido (GUBIANI et al., 2018), diminuindo o potencial produtivo e a viabiliza o de um sistema de rota o de culturas.

## 2.2 DESAFIOS PARA A ROTAÇÃO DE CULTURAS NAS TERRAS BAIXAS DO RIO GRANDE DO SUL

Embora o arroz seja a principal cultura explorada nas áreas da metade Sul do RS, o cultivo da soja tem apresentado crescimento expressivo nos últimos anos nesses solos da Metade Sul. Segundo Knaak & Miranda (2018) a área total de soja nos solos tradicionalmente cultivados com arroz no RS foi de aproximadamente 300.000 hectares na safra de 2017/2018. A cultura do milho também tem sido estudada nessas áreas, pois representa outra opção ao monocultivo do arroz irrigado (GIACOMELI et al., 2016, 2017).

De forma geral, a principal causa do crescente aumento no cultivo de outras culturas alternativas em áreas de arroz irrigado, é o acréscimo do número de plantas daninhas resistentes ou de difícil controle aos herbicidas inibidores da enzima ALS. Dentre elas, destaca-se o arroz daninho (*Oryza sativa*), o capim arroz (*Echinochloa* sp.) e as ciperáceas (*Cyperus* sp.) (GALON et al., 2008; ROSO et al., 2010; SCHAEGLER et al., 2013; MATZENBACHER et al., 2013). Em ambientes com infestação de plantas daninhas de difícil controle, a rotação de culturas é uma das principais alternativas, pois possibilita a redução do banco de sementes no solo (ANDRES et al., 2001).

Além de proporcionar um melhor controle de plantas daninhas, a rotação de culturas com o arroz irrigado pode proporcionar melhorias na adequação e na qualidade do solo (FIN et al., 2018), otimização do uso de máquinas e mão-de-obra, quebra de ciclos de pragas e doenças e diversificação de renda da propriedade (VERNETTI et al., 2009). Por outro lado, a utilização de novos cultivos em áreas tradicionalmente cultivadas com arroz ainda envolve inúmeros desafios. Entre eles, a necessidade de entender melhor as exigências das diferentes culturas em relação ao crescimento das plantas e as limitações impostas pelos mais variados tipos de estresses que atuam nesse ambiente.

Nesse contexto, a compactação do solo é um dos principais limitantes à rotação de culturas, pois possui influência direta no crescimento e na produtividade das culturas, bem como na conservação de água do solo (SICZEK & LIPIEC, 2011). A compactação nos solos agricultáveis é um processo antrópico, proporcionada pela pressão de implementos agrícolas e de animais, alteram a estrutura do solo, acarretando em redução da porosidade total, macroporosidade, aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração (GIACOMELI et al., 2017; GUBIANI et al., 2018; SARTORI et al., 2016). O aumento da densidade do solo agrava problemas relacionados à sua estrutura, como menor porosidade de aeração e baixa infiltração de água (SIX et al., 2004).

A menor porosidade de aeração e altos níveis de resistência do solo à penetração são fatores limitantes ao desenvolvimento de culturas (BENGOUGH et al., 2006; GUBIANI et al., 2018), períodos de alta e baixa disponibilidade hídrica resulta em restrições no crescimento das plantas. Esses possíveis prejuízos ao desenvolvimento das culturas são dependentes do estágio de desenvolvimento e do tempo em que as plantas ficarem submetidas a esses estresses (BENGOUGH et al., 2006).

Ao contrário do que ocorre com a maioria das culturas, os problemas relatados anteriormente, ocasionados pela alteração das características físicas do solo, tem pouco efeito sobre o sistema de cultivo do arroz irrigado utilizado no RS. Como a cultura é adaptada ao ambiente anaeróbico utiliza-se a irrigação por inundação, pois as plantas de arroz possuem a capacidade de desenvolver aerênquimas, que propiciam a oxigenação das raízes (KATO & KATSURA, 2014). Esse tipo de irrigação é caracterizado pela formação de uma lâmina de água sobre o solo, com altura aproximada 0,1 m, a qual é beneficiada pela reduzida drenagem natural e baixa declividade dos solos cultivados com arroz.

A fim de evitar o manejo excessivo do solo e reduzir o uso de água suplementar pela cultura do arroz, métodos de irrigação mais conservacionistas (maior produtividade da água) como a aspersão, podem ser utilizados como alternativa à irrigação por superfície tradicionalmente utilizada. Os autores Sánchez-Llerena et al. (2016), observaram melhorias na qualidade física do solo, em plantio direto sob irrigação por aspersão sem perda de produtividade a partir do terceiro ano em comparação ao cultivo convencional, com redução no uso de água em 75%.

### 2.3 ESTRESSES HÍDRICOS E SEUS EFEITOS NA SOJA

Os estresses hídricos são restritivos ao crescimento das culturas, podendo serem causados pelo excesso ou déficit hídrico. Os efeitos diferentes em cada cultura, cultivar, estágio de desenvolvimento, nível de estresse, e principalmente, da duração do estresse que as plantas forem submetidas.

### **2.3.1 Déficit hídrico**

O déficit hídrico é um dos fatores ambientais mais limitantes para rotação de culturas em áreas cultivadas com arroz irrigado (MASTRODOMENICO et al., 2013). Essa limitação ocorre devido a importância da água em praticamente todos os processos bioquímicos e fisiológicos das plantas, além de representar cerca de 90% da sua massa fresca (TAIZ & ZEIGER, 2013, KING et al., 2014). Além disso, a redução do conteúdo de água no solo pode potencializar alguns problemas relacionados ao solo. Dentre eles, a resistência do solo à penetração, que pode restringir o desenvolvimento radicular quando em níveis elevados (REICHERT et al., 2009; COLLARES et al., 2011).

Em condições de estresse hídrico, as plantas apresentam uma série de mudanças morfológicas, bioquímicas e fisiológicas que refletem negativamente no crescimento e na produtividade de grãos (SOUZA et al., 2013). Entre as alterações morfológicas, destacam-se a redução da área foliar e o aceleração da abscisão e senescência das folhas, desencadeada pelo aumento da síntese de etileno (CATUCHI et al., 2011). Com relação às respostas fisiológicas, o estresse hídrico caracteriza-se, entre outras alterações, pela redução do turgor celular, o qual diminui a condutância estomática e a expansão das células, restringindo a fotossíntese e o crescimento das plantas (TAIZ & ZEIGER, 2013).

No caso da soja, o déficit hídrico afeta também a fixação biológica de nitrogênio. Estudos afirmam que a fixação biológica é o processo metabólico mais sensível a deficiência de água em plantas de soja (SERRAJ et al., 1999; KING et al., 2014). Em condições de baixa disponibilidade de água no solo, a atividade da enzima nitrato redutase é reduzida em função da desidratação do nódulo e os danos causados no tecido nodular (TINT et al., 2011). Além disso, sob estresse hídrico, há redução no fluxo de fotoassimilados com acúmulo de compostos nitrogenados e ureídos nas folhas, inibindo a retroalimentação do processo de fixação biológica (PURCELL et al., 2004).

### **2.3.2 Excesso hídrico**

O excesso hídrico é um fenômeno comum em áreas compactadas ou com deficiência de drenagem natural, como os solos presentes nas terras baixas. Nesta situação, há redução das trocas gasosas entre o sistema radicular das plantas e os espaços porosos do solo, uma vez que a taxa de difusão do oxigênio é 10.000 vezes menor no meio aquoso em relação ao solo seco

(ARMSTRONG et al., 1994). Dessa forma, a baixa disponibilidade de oxigênio, sob condições de excesso hídrico (hipóxia), inviabiliza a respiração das raízes (LANZA et al., 2013).

Na cultura da soja, a hipóxia reduz a taxa de ATP/ADP, o que indica restrição da fosforilação oxidativa (DENNIS et al., 2000). Concomitantemente, ocorre a inibição do sistema de transporte de íons, o qual é responsável pela criação do potencial hídrico através da endoderme, inviabilizando a absorção de água e nutrientes pelas raízes (SAIRAM et al., 2008). Em detrimento do rendimento energético, as plantas de soja alteram o metabolismo aeróbio para a via anaeróbica, utilizando a glicólise e a fermentação para produzir substratos alternativos como o etanol e o lactato (FANTE et al., 2010).

O alagamento do solo afeta significativamente a fixação biológica de nitrogênio (YUN et al., 2008). A deficiência de oxigênio no solo provoca diminuição no conteúdo de leghemoglobina nos nódulos, reduzindo a atividade da enzima nitrato redutase, a qual tem importância fundamental na fixação do N<sub>2</sub> atmosférico (OLIVEIRA et al., 2013). Como consequência, o nitrogênio que é fixado nos nódulos e convertido para NH<sup>3+</sup> deixando de ser transportado para a parte aérea via xilema, limitando a disponibilidade de N para a formação de proteínas e outros compostos essenciais (FAGAN et al., 2007).

## 2.4 UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

A utilização das terras baixas com outras culturas, além do arroz, geralmente é limitada pela necessidade de irrigação, devido à baixa disponibilidade hídrica no solo. Sendo ocasionada pela reduzida capacidade de armazenamento de água no solo (SARTORI et al., 2016), potencializada pelos problemas físicos do solo relatados anteriormente. Em geral, nessa região do Estado do RS, existe um boa quantidade de água disponível de mananciais hídricos tais como rios, lagoas ou barragens, que atualmente são utilizados para a irrigação do arroz. Além da disponibilidade hídrica, a estrutura existente para irrigação pode reduzir os gastos com custo de instalação de sistemas de irrigação. Desta forma, são necessários estudos com diferentes métodos e sistemas de irrigação que melhor se adequam as culturas tradicionais de sequeiro em rotação ao arroz irrigado por inundação, com melhor produtividade da água.

Os principais métodos irrigação segundo Bernardo (2006) são a irrigação por aspersão, por superfície e irrigação localizada. Dentre os métodos, destacam-se diversas variações de sistemas. Entre os métodos mais utilizados estão a irrigação por aspersão e superfície. Os principais sistemas de irrigação por aspersão são a irrigação convencional e sistemas

mecanizados (pivô central, auto propelido e deslocamento linear). Para a irrigação por superfície os sistemas mais utilizados são a inundação, sulcos e faixas.

#### **2.4.1 Irrigação por superfície**

Em geral, para a introdução de culturas tradicionalmente de sequeiro em solos cultivados com arroz, os sistemas de irrigação por superfície apresentam menor custo por unidade de área, devido ao produtor nessas áreas poder utilizar o mesmo sistema de condução de água utilizado para o arroz irrigado, além de menor gasto energético, em comparação com os sistemas de irrigação pressurizados. No RS, a irrigação de culturas anuais de verão em rotação com o arroz ainda é pouco difundida e realizada principalmente através do sistema de faixas, com a inundação intermitente dos quadros ou talhões. Nos Estados Unidos, sistemas alternativos de irrigação têm sido adotados para reduzir o volume de água aplicado na soja e aumentar a uniformidade de distribuição da lâmina na lavoura (HEATHERLY & SPURLOCK, 2000).

Segundo Bernardo et al. (2006), geralmente as terras baixas cultivadas com arroz, por causa de sua posição quanto à fonte de água, textura, estrutura e sua superfície ser mais plana e uniforme, são irrigados por sistemas de irrigação por superfície. Nestes sistemas, a água é conduzida por gravidade diretamente sobre a superfície do solo até o ponto de aplicação, exigindo, portanto, áreas sistematizadas e com pequena declividade, de acordo com o tipo de irrigação, com baixa produtividade da água (FANGUEIRO et al., 2017; SÁNCHEZ-LLERENA et al., 2016).

A irrigação por sulco é um sistema por superfície que consiste na condução contínua da água em pequenos canais ou sulcos, situados paralelamente às fileiras das plantas. Uma certa vazão de água é aplicada em cada sulco, durante um determinado tempo, permitindo a infiltração da lâmina necessária de irrigação para umedecer a profundidade do solo ocupada pelo sistema radicular das plantas (BERNARDO & MANTOVANI & PARETTI, 2006).

A irrigação por sulcos pode proporcionar redução de até 30% no volume de água aplicado quando comparado ao sistema de faixas com inundação intermitente (FAHONG et al., 2004). Além da economia de água, esse sistema apresenta baixo custo inicial de implantação e baixa demanda de energia, facilidade de operação após a implantação, maior demanda de mão de obra e menor interferência da ação do vento (KOECH et al., 2014).

### 2.4.2 Irrigação por aspersão

Apesar de normalmente mais onerosa que a irrigação por superfície, é menos dependente da mobilização do solo, demanda mais energia, apresenta menor uso de água e pode ser uma alternativa para viabilizar a rotação de culturas em áreas tradicionalmente cultivadas com arroz, com implantação de plantio direto. Sánchez-Ilerena et al. (2016) avaliando o uso de água e produtividade de arroz irrigado por aspersão observaram redução de 75% no uso de água em comparação ao método de irrigação por superfície (tradicional) onde o solo é inundado e saturado. Além disso, os mesmos autores observaram melhorias na qualidade física do solo, quando foi utilizado o sistema plantio direto com irrigação por aspersão, sem perda de produtividade, a partir do terceiro ano de cultivo, em relação ao cultivo convencional.

Outra característica da irrigação por aspersão é a menor necessidade de mão de obra para a aplicação da lâmina de irrigação, principalmente quando é utilizado o sistema pivô central. Porém, em áreas com má drenagem podem ocorrer limitações a movimentação do pivô, requerendo acessórios adicionais no equipamento de irrigação ou a elevação do caminho (rastros) das torres do pivô central. Além disso, esse sistema requer a necessidade de áreas sem obstáculos e uniformes, podendo em muitos casos inviabilizar a adoção do método em algumas propriedades.

## 2.5 MANEJO DO SOLO PARA ROTAÇÃO DE CULTURAS EM TERRAS BAIXAS

Diferentes sistemas de manejo do solo podem causar modificações estruturais resultando em maior ou menor compactação do solo, que poderá interferir na densidade do solo, na porosidade, na infiltração de água no solo e no desenvolvimento radicular das culturas cultivadas em terras baixas (BONETTI et al., 2019; GIACOMELI et al., 2016; SARTORI et al., 2015).

Nas áreas cultivadas com arroz irrigado, muitas vezes sistematizadas em reduzido gradiente ou cota zero, o sistema de drenagem superficial com a utilização de drenos de pequena profundidade no interior dos talhões, não é suficiente para retirar o excesso de água da superfície do solo ou mesmo da camada superficial do solo (SILVA et al., 2008). Nesse contexto, a semeadura sobre camalhão é uma alternativa para auxiliar na drenagem superficial da água, viabilizando o desenvolvimento de culturas de sequeiro em áreas tradicionalmente cultivadas com arroz irrigado (FIORIN et al., 2009).

Além da drenagem, a implantação da lavoura com o sistema sulco/camalhão permite a irrigação da cultura durante períodos de déficit hídrico, evitando perdas de produtividade (GUBIANI et al., 2018; SARTORI et al., 2015). Além da provável maior uniformidade de irrigação, pois os sulcos uniformizam o avanço da água na área cultivada (MAASS et al., 2013; RODRIGUES et al., 2013), quando comparado a irrigação por faixas.

Nas áreas cultivadas com arroz sem sistematização, para adequar o solo para semeadura e irrigação, adota-se o preparo convencional do solo com a utilização de grades na profundidade de até 0,10 m e posterior aplainamento do solo. Essa técnica de preparo do solo tende a reduzir a densidade do solo na camada mais superficial (BEUTLER et al., 2012), propiciando a descompactação até a profundidade de 0,07 m (MUNARETO et al., 2010), porém, esse manejo ao longo dos anos favorece a compactação na camada inferior ao preparo do solo (BAMBERG et al., 2009).

Sistemas de plantio direto podem favorecer o acúmulo de maior quantidade de material orgânico na superfície e na camada bem superficial do solo, que favorece a atividade biológica e ciclos de umedecimento e secagem, sendo esses processos favoráveis a agregação do solo (SIX et al., 2004). O aumento da atividade biológica, junto com a decomposição das raízes das culturas anteriores, favorece o incremento de bioporos e manutenção de agregados (BEUTLER et al., 2014). A grande vantagem desse tipo de poros é a sua maior continuidade no interior do perfil do solo, favorecendo a dinâmica da água. Outra vantagem desse sistema é a longo prazo, pois melhora a disponibilidade hídrica no solo (OLIBONE & ENCIDE-OLIBONE & ROSOLEM, 2010) e o desenvolvimento radicular das culturas (WILLIAMS & WEIL, 2004).

Além disso, a ausência de preparo do solo pode melhorar a utilização dos nutrientes ciclados das culturas anteriores. Esse processo acarreta em perdas, já que na fase inicial a planta tem menor demanda de absorção de nutrientes, podendo ocorrer perdas até o momento de maior demanda nutricional da cultura. No trabalho conduzido por Verneti et al. (2009), em áreas de terras baixas no município de Pelotas os autores verificaram incremento de produtividade de grãos de milho em semeadura direta, quando comparado com o preparo convencional antes da semeadura.

### 3 ARTIGO I - *Irrigação e manejos do solo para produção de soja em terras baixas*<sup>1</sup>

#### **Resumo**

As terras baixas cultivadas com arroz, apresentam normalmente reduzida taxa de infiltração de água, baixa macroporosidade, e elevada densidade do solo próximo a superfície, dificultando rotação com a soja. O objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos de métodos de irrigação e manejos do solo nas propriedades físicas do solo e no crescimento e a produtividade de grãos da cultura da soja em terras baixas. Dois experimentos foram instalados com a soja, conduzidos nos anos 2016/17 e 2017/18, em Itaqui, RS, Brasil. Foi corrigida acidez e escarificado o solo a 0,3 m. O delineamento foi de blocos ao acaso, em esquema bi-fatorial (3x4) com três repetições. No fator principal foram avaliados os métodos de irrigação por aspersão, faixas e sem irrigação. O segundo fator foram quatro manejos do solo: preparo convencional; semeadura direta; camalhão convencional e; camalhão com semeadura direta. Os experimentos foram no mesmo local e sem preparo do solo nos tratamentos diretos após a escarificação. Nos convencionais foi realizada próximo da semeadura a gradagem a 0,1 m e o aplainamento do solo. Os camalhões foram construídos no dia da escarificação (Camlhão direto) e no do preparo convencional com altura de 0,15 m e 1,0 m entre sulcos. As irrigações foram aplicadas sempre que a umidade no solo atingia 50% da água disponível ( $0,193 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) na profundidade de 0,25m. Avaliaram-se as propriedades físicas do solo, a produtividade de grãos e a produtividade da água. Os resultados indicam que em terras baixas: o preparo convencional aumenta a resistência à penetração na camada próximo a superfície do solo; em anos com distribuição irregular das chuvas e sem a utilização da irrigação, o manejo do solo em semeadura direta resulta em um incremento de 20% na produtividade de grãos de soja, em relação ao manejo convencional; a

---

<sup>1</sup> Redigido conforme as normas para submissão de artigos à revista Scientia Agricola®

irrigação aumenta 37% a produtividade de grãos de soja e; a irrigação por aspersão apresenta melhor produtividade da água de irrigação de soja em terras baixas.

**Palavras chave:** camalhão, irrigação por aspersão, plantio direto, produtividade da água.

## **Introdução**

As terras baixas caracterizam-se por apresentar reduzida taxa de infiltração de água, baixa macroporosidade do solo, além de apresentarem camadas adensadas próximas à superfície (Sartori et al., 2016; Denardin et al., 2019). Essas características favorecem a utilização da irrigação por inundação em 75 % das áreas cultivadas com arroz no mundo (Nie et al., 2012). Na metade Sul do Estado do Rio Grande do Sul (RS) as terras baixas constituem aproximadamente 6,5 milhões de hectares (Miura et al., 2015), onde anualmente o arroz é cultivado em aproximadamente um milhão de hectares (Conab, 2019).

Nas áreas de produção orizícolas do RS, ocorreu estabilização da produtividade de grãos de arroz. Dentre as causas, está o aumento de plantas daninhas resistentes aos principais mecanismos de ação dos herbicidas disponíveis para a cultura do arroz (Rao et al., 2007). Dessa forma, para melhor controle de plantas daninhas a rotação com a cultura da soja tem sido utilizada em terras baixas (Sartori et al., 2015; Fin et al., 2018).

No entanto, as mesmas características físicas do solo que favorecem a irrigação por inundação, proporcionam frequentes períodos de excesso hídrico, limitando o espaço de aeração do solo e reduzindo a produtividade da soja em terras baixas (Gubiani et al., 2018). Algumas estratégias de implantação da cultura, como escarificação do solo, semeadura sobre camalhão ou utilização de haste sulcadora na deposição do fertilizante (Sartori et al., 2015, 2016), tem propiciado produtividades de soja semelhantes às obtidas em terras altas.

Outra estratégia para atenuar os efeitos da baixa qualidade física desses solos, é a utilização da irrigação por diferentes métodos, os quais possibilitam disponibilidade de água no solo próximo ao ideal para a soja. O método de irrigação por superfície em faixas é uma alternativa de baixo investimento para essas áreas, pois as mesmas estruturas disponíveis para a irrigação do arroz podem ser utilizadas. Entretanto, para aumentar a aeração da camada superficial do solo, muitas vezes é recomendado o cultivo sobre camalhões (Gubiani et al., 2018).

A utilização da irrigação por aspersão por pivô central, pode viabilizar o plantio direto em terras baixas, cultivando também outras culturas anuais de grãos em rotação com o arroz. Além disso, o método de irrigação por aspersão demanda menor mão de obra e reduz a quantidade de água necessária em relação aos métodos por superfície (Sánchez-Llerena et al., 2016). O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos de métodos de irrigação e manejos do solo nas propriedades físicas do solo e no crescimento e produtividade de grãos da cultura da soja em terras baixas.

## **Material e Métodos**

Dois experimentos foram conduzidos com a cultura da soja, em área experimental da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), sendo o experimento I (ExpI) no ano agrícola 2016/17 e o experimento II (ExpII) no ano agrícola 2017/18. A área está situada no município de Itaqui, na região oeste do Rio Grande do Sul (29°09' S, 56°33' W e altitude de 74 m). Segundo a classificação de Köppen, o clima é caracterizado como subtropical úmido (Cfa), sem estação seca definida e precipitação (chuva) média anual de 1.616 mm (Alvares et al., 2013). Os dados meteorológicos (Figura 1) foram obtidos de estação meteorológica automática (Modelo Vantage Pro2, Davis,USA), localizada a 400 m dos experimentos. O solo é

classificado como Plintossolo Háplico (Santos et al. 2018), com a caracterização química e física apresentada na Tabela 1.

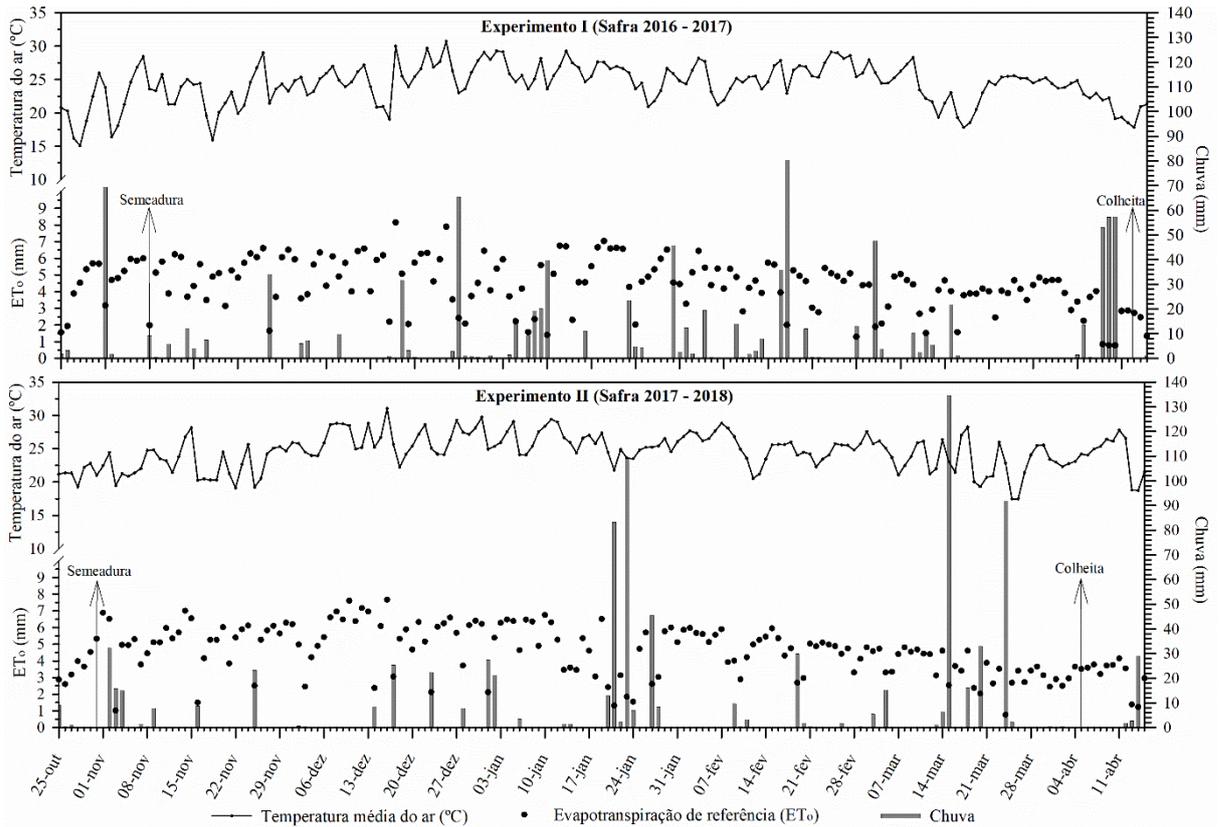
Com o objetivo de iniciar um sistema de plantio direto, entre os meses de abril e junho de 2016, realizou-se a uniformização da área, com duas gradagens e aplainamento do solo. No mês de agosto aplicou-se 3500 kg de calcário, com PRNT de 60 % para a correção da acidez do solo para pH 6,0. Após a calagem, no dia 10 de agosto foi escarificado o solo na profundidade de 0,3 m, com de hastes espaçadas em 0,35 m, sendo no mesmo dia semeada a cultura da aveia preta. Em 2017, semeou-se a aveia no mês de junho com o auxílio de semeadora com espaçamento entre linhas de 0,17 m.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 3 x 4, com três repetições e parcelas subdivididas no fator A, com área de 160 m<sup>2</sup> e 40 m<sup>2</sup> para o fator D. O fator A foi constituído de três métodos de irrigação: irrigação por aspersão; irrigação por faixas e; sem irrigação. O fator D foi composto pelos manejos do solo: preparo convencional (Convencional); semeadura direta (Direto); Camalhão convencional e; camalhão com semeadura direta (Camlhão direto).

As parcelas dos experimentos foram no mesmo local (Figura 2), onde nos tratamentos com semeadura direta não foi realizada nenhuma prática de preparo do solo após à escarificação (Direto) e construção do Camalhão direto. Para os preparos convencionais, realizaram-se duas gradagens e aplainamento do solo em 31/10/2016 e 5/10/2017, para o ExpI e ExpII, respectivamente, e no tratamento Camalhão convencional, foi construído nas mesmas datas. Os camalhões no momento da semeadura tinham aproximadamente altura de 0,15 m em relação ao nível do solo e largura de 1,0 m entre sulcos.

Em 8 de novembro de 2016 e 31 de outubro de 2017 foi semeada a cultivar de soja Brasmax 63164RSF IPRO, na densidade de 30 e 24 sementes por m<sup>2</sup>, respectivamente. Utilizou-se semeadora com haste sulcadora, depositando o fertilizante a profundidade de 0,13

m e espaçamento entre linhas de 0,5 m. No Direto e Camalhão direto as quantidades de palha de aveia na superfície do solo foram de 2450 e 4500 kg ha<sup>-1</sup>, em 2016 e 2017, respectivamente. Seguiram-se as recomendações de adubação e tratos culturais para expectativa de produtividade de grãos de 6 Mg ha<sup>-1</sup> (Salvadori et al., 2016).



**Figura 1** - Temperatura média do ar, evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) e chuva nas safras agrícolas 2016/17 e 2017/18.

**Tabela 1** - Características físicas e químicas do solo, nas diferentes profundidades, antes da instalação dos experimentos. Itaquí, RS.

..... Propriedades físicas ....										
Camada do solo (m)	Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )	Dp	Porosidade			CC	PMP	Textura		
			Total	Micro	Macro			Areia	Silte	Argila
			(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )			(g kg <sup>-1</sup> )				
0,0 - 0,1	1,49	2,60	0,42	0,30	0,12	0,283	0,089	585	237	179
0,1 - 0,2	1,78	2,58	0,32	0,30	0,02	0,285	0,110	570	225	204
0,2 - 0,3	1,74	2,56	0,33	0,30	0,03	0,284	0,110	526	199	275
0,3 - 0,4	1,60	2,58	0,38	0,34	0,04	0,319	0,148	501	157	342
0,4 - 0,5	1,54	2,62	0,41	0,33	0,08	0,310	0,181	460	157	383

..... Propriedades químicas na camada de 0,0 - 0,2 m ....							
Saturação (%)		H+Al	CTC <sub>efetiva</sub>	CTC <sub>pH 7</sub>	Al	Mg	Ca
por Bases	por Al	(cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )					
56,4	5,1	2,8	3,9	6,5	0,2	0,9	2,7
pH (H <sub>2</sub> O 1:1)	K	P-Mehlich	S	MO	Cu	Zn	B
5,3	36,0	3,6	19,4	18,0	2,9	0,8	0,3

Dp = Densidade de partícula, Total = Porosidade total; Micro = Microporosidade; Macro = Macroporosidade; CC = Capacidade de campo equivalente ao ponto de -10 kPa da curva de retenção de água no solo; PMP = Ponto de murcha permanente, equivalente ao ponto de -1500 kPa da curva de retenção de água no solo obtido pela técnica psicométrica (Modelo WP4, Decagon Devices, EUA).

A necessidade de irrigação foi monitorada pela combinação da estimativa da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), mediante a multiplicação da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) pelo método de Penman-Monteith, com os coeficientes de cultura simples ( $K_c$ ) ( $ET_c = ET_o K_c$ ), conforme Allen et al. (1998) e do monitoramento do conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta$ ), com sensores que utilizam a técnica de capacitância/frequência de domínio no tempo (FDR). No ExpI o  $\theta$  foi avaliado com o auxílio de um FDR portátil (modelo Hydrosense<sup>TM</sup>, Campbell Scientific, EUA), enquanto no ExpII foram instalados sensores a campo e monitorado ao menos em três vezes por semana o  $\theta$  (CS-616, Campbell Scientific, EUA). No ExpII avaliou-se a temperatura do solo a 0 - 0,05 m (108-T, Campbell Scientific, EUA) nos tratamentos Convencional e Direto, em 15 dias nos meses de novembro e dezembro entre as 14 e 17 horas.



**Figura 2** - Instalação dos manejos do solo em preparo convencional e camalhão convencional no ExpI, em 31 de outubro de 2016 (A) e semeadura da cultura da soja no ExpII em 31 de outubro de 2017 (B). Itaquí, RS.

Para as irrigações considerou-se a média do conteúdo de água na camada de 0 - 0,25 m, nos tratamentos do fator manejo do solo, correspondendo a 50 % da água disponível no solo

( $AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$ ), sempre que o  $\theta$  atingia valores de  $0,193 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Para realizar as irrigações no por faixas, 16 registros foram utilizados, distribuídos a cada metro no início das parcelas. Com o auxílio desses registros, manteve-se uma vazão média de  $0,1 \text{ L s}^{-1}$  no tempo de irrigação fixado em 1 h e 40 min, calculando-se o uso pela área irrigada ( $160 \text{ m}^2$ ). A eficiência de irrigação foi considerada em 50 %, de forma que, estimou-se uma lâmina de irrigação de 30 mm para cada evento de irrigação.

Para a irrigação por aspersão, utilizou-se um sistema convencional com dois aspersores setoriais (Modelo Pingo Setorial 4 mm, Fabrimar, BRA), em rotação de  $180^\circ$ , com 100 % de sobreposição na área útil da parcela. O coeficiente de uniformidade de Christiansen (Christiansen, 1942), foi determinado com o auxílio de pluviômetros (copos) medidores de diâmetro de 0,08 m e espaçados a um metro, mantendo-se a mesma pressão de serviço na linha principal em todas irrigações (35 Psi). Lâminas líquida de aproximadamente 12 mm ( $\pm 4$ ) foram aplicadas uma taxa de  $6 \text{ mm h}^{-1}$ . O coeficiente de uniformidade foi de 85%, ou seja, aplicou-se 13,8 mm em cada evento de irrigação.

Para a determinação das propriedades físicas e hidráulicas do solo, foram coletadas amostras indeformadas, nas profundidades de 0,00 - 0,05, 0,05 - 0,01 e 0,10 - 0,20 m, com anéis de aproximadamente 0,030 m de altura e 0,055 m de diâmetro. As coletas foram realizadas 60 dias após a semeadura no ExpI e após a colheita no ExpII. As propriedades físico hidráulicas do solo analisadas foram: densidade ( $D_s$ ), porosidade total ( $P_t$ ), macroporosidade ( $M_a$ ), microporosidade ( $M_i$ ) e  $\theta$  no potencial de -100 kPa (Teixeira et al., 2017).

Nas amostras com  $\theta$  no potencial de -100 kPa determinou-se a resistência do solo à penetração mecânica ( $R_p$ ), em três repetições por amostra, de forma equidistante na parte central do anel, usando um penetrômetro eletrônico de bancada (modelo MA 933, Marconi, BRA), seguindo metodologia proposta por Silva et al. (2014). Utilizou-se um cone de 4 mm de

diâmetro, o qual foi introduzido nas amostras de solo até a profundidade de 4 cm no anel, com velocidade constante de  $10 \text{ mm min}^{-1}$  e leituras a cada segundo.

As variáveis morfológicas da cultura avaliadas (R5 no Exp II) foram: distribuição do sistema radicular, massa seca da parte aérea ( $0,5 \text{ m}^2$ ), número e massa seca de nódulos por planta (5 plantas). A distribuição do sistema radicular foi avaliada nos tratamentos de solo Convencional, Direto, Camalhão convencional e Camalhão direto, irrigados por aspersão, faixas e sem irrigação no Convencional e Direto no estágio fenológico R5 (Fehr e Caviness, 1977). Para tanto, abriu-se trincheiras de 1,5 m, perpendicular a duas linhas de semeadura, onde as raízes foram expostas e fotografadas com o auxílio de um quadro de  $1,0 \times 0,4 \text{ m}$ , com malha das quadrículas de  $0,05 \times 0,05 \text{ m}$ , permitindo compor os resultados de cada quadrícula em um único plano (Giacomeli et al., 2016). Além disso, determinou-se o número de nódulos e a massa seca de nódulos por planta (5 plantas) e a matéria seca total da parte aérea em uma área de  $0,5 \text{ m}^2$  no estágio fenológico R5, no ExpII.

A porcentagem de cobertura do solo pelo dossel da soja foi determinada a partir de fotografias das 4 linhas centrais das parcelas, adicionando uma marcação no solo de  $0,25 \text{ m}$  como escala, aos 40 dias após a semeadura. A partir dessa escala, calculou-se a área total da imagem, e por diferença de cor espectral, a área correspondente ao dossel da cultura e a superfície do solo, utilizando o software ImageJ® (National Institute of Health, EUA), e com a razão entre essas áreas obteve-se porcentagem de cobertura do solo pelo dossel da cultura.

Para determinação da produtividade de grãos foi colhida uma área de  $6 \text{ m}^2$  e realizada a trilha da cultura, pesagem dos grãos, retirada das impurezas e determinada a umidade de cada parcela, corrigindo a massa de grãos para 13 % de umidade. A variável índice de colheita foi determinada entre a razão da produção de matéria seca total por hectare, estimada a partir da área coletada, e pela produtividade de grãos. Para a produtividade da água considerou-se a relação entre a produção atingida pela cultura (kg), e o uso total de água, em  $\text{m}^3$  (Irrigação +

chuva), enquanto que, para a produtividade da água de irrigação utilizou-se o uso de água gasto em cada tratamento irrigado. No momento da colheita, no ExpII, avaliou-se a altura de plantas até a inserção do último legume, e o número de legumes por planta em uma área de 1m<sup>2</sup>.

Os resultados foram submetidos ao teste das pressuposições do modelo matemático (normalidade e homogeneidade). A análise de variância foi realizada pelo teste F ( $\alpha \leq 0,05$ ). Observada significância na análise de variância, foi realizado o teste complementar de Tukey ( $\alpha \leq 0,05$ ). Para as análises estatísticas e apresentação dos resultados em gráficos, foram utilizados os softwares R versão 3.5.1 (R Core Team, 2018) com o pacote ExpDes.pt (Ferreira et al., 2014) e Sigma Plot® (Systat Software, San Jose, CA, Estados Unidos).

## **Resultados e Discussão**

A chuva total acumulada entre a semeadura e a maturidade fisiológica da cultura foi de 7.230 e 7.740 m<sup>3</sup>, para o ExpI e II, respectivamente. Embora ligeiramente superior no experimento II, a distribuição foi irregular, principalmente nos períodos entre final de novembro e início de dezembro de 2017 e início de janeiro e fevereiro de 2018, baixo volume de chuva. No ExpI, a melhor distribuição de chuvas resultou na necessidade de apenas quatro aplicações de irrigações, totalizando o uso de 480 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de água para irrigação no método por aspersão e 1200 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para faixas. No ExpII foram realizadas 18 aplicações de irrigação por aspersão e 12 na irrigação por faixas, totalizando um uso água de 1970 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e 360 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Nas propriedades físico-hídricas do solo, Ds, Pt, Ma, Mi, conteúdo de água no potencial de -100 kPa, e Rp, não foram observadas interações entre os fatores, sendo apresentados separadamente (Tabela 2 e 3). Também não foram observadas diferenças entre os métodos de irrigação. O tratamento Convencional apresentou maior Ds na camada de 0,05 - 0,10 m no ExpI,

resultando em uma menor  $M_a$ , em decorrência da gradagem e aplainamento do solo com tráfego de máquinas na superfície do solo, próximo da semeadura causando a compactação do solo nessa camada (Beutler et al., 2012). Maior  $D_s$  e menor  $P_t$  foram observados nos dois experimentos, na camada 0,10 - 0,20 m para o tratamento Camalhão convencional, onde provavelmente o preparo convencional associado a construção do camalhão mobilizou o solo há uma maior profundidade que no tratamento Convencional. Esse maior valor de  $D_s$  nessa camada do solo, logo abaixo os 0,1 m de profundidade, também foi relatado por Giacomeli et al. (2017).

As médias de  $D_s$  e  $M_a$ , para a camada de 0,0 - 0,2 m, no ExpI, foram de  $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e, no ExpII, de  $1,68 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . No ExpII, a  $D_s$  e  $M_a$  foram próximas ao encontrado nas avaliações realizadas para a caracterização da área, antes da escarificação ( $D_s = 1,63 \text{ Mg m}^{-3}$ ;  $M_a = 0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Os resultados, embora próximos da densidade crítica proposta pela equação de Reichert et al. (2009) nesse solo ( $1,69 \text{ Mg m}^{-3}$ ), não indicam compactação. Essa  $D_s$  elevada pode ser explicada, em partes, pelo baixo teor de argila nessa camada ( $191,5 \text{ g kg}^{-1}$ ), que em condições naturais, já apresenta elevada densidade (Marcolin e Klein, 2011).

O conteúdo de água no potencial de -100 kPa não diferiu entre os tratamentos. A  $R_p$ , no Convencional foi superior em relação aos demais tratamentos nas camadas de 0,0 - 0,05 e 0,05 - 0,10 m, no ExpI. Nos resultados do ExpII observou-se uma tendência similar, porém, com valores médios maiores que 2 Mpa também na camada de 0,05 - 0,10 m, enquanto no ExpI, somente na última camada os manejos ultrapassaram esse valor. A maior  $R_p$  está associada na maioria das vezes ao aumento da  $D_s$ , pois ocorre uma aproximação das partículas do solo e a redução do espaço poroso, provocando um maior atrito entre as das partículas do solo (Assis et al., 2010).

**Tabela 2** - Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, em métodos de irrigação e manejos de solo em terras baixas. Itaqui, RS.<sup>1</sup>

	Camada (m)	Método de irrigação <sup>1</sup>			Manejos do solo				Média CV (%)	
		Aspersão	Não irrigado	Faixas	Convencional	Direto	Camalhão Convencional	Camalhão Direto		
Experimento I (2016/17)	Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )									
	0,00 - 0,05	1,36 <sup>ns</sup>	1,38	1,36	1,41 <sup>ns</sup>	1,35	1,37	1,33	1,36	4,90
	0,05 - 0,10	1,50 <sup>ns</sup>	1,51	1,49	1,56 a <sup>2</sup>	1,48 b	1,49 b	1,47 b	1,50	4,82
	0,10 - 0,20	1,65 <sup>ns</sup>	1,61	1,64	1,66 ab	1,62 ab	1,67 a	1,58 b	1,63	5,03
	Porosidade total do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 - 0,05	0,48 <sup>ns</sup>	0,46	0,48	0,46 <sup>ns</sup>	0,48	0,47	0,49	0,47	5,41
	0,05 - 0,10	0,42 <sup>ns</sup>	0,42	0,43	0,40 b	0,44 a	0,43 ab	0,43 a	0,42	7,32
	0,10 - 0,20	0,36 <sup>ns</sup>	0,38	0,37	0,37 ab	0,37 ab	0,35 b	0,39 a	0,37	7,42
	Macroporosidade do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 - 0,05	0,20 <sup>ns</sup>	0,17	0,19	0,16 b	0,19 ab	0,18 ab	0,22 a	0,19	21,79
	0,05 - 0,10	0,12 <sup>ns</sup>	0,14	0,14	0,10 c	0,16 a	0,13 b	0,15 a	0,13	22,64
	0,10 - 0,20	0,08 <sup>ns</sup>	0,07	0,08	0,07 ab	0,08 a	0,06 b	0,08 a	0,07	17,33
	Microporosidade do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 - 0,05	0,28 <sup>ns</sup>	0,29	0,28	0,29 <sup>ns</sup>	0,28	0,29	0,28	0,29	4,13
	0,05 - 0,10	0,30 <sup>ns</sup>	0,29	0,29	0,29 ab	0,28 b	0,30 a	0,29 b	0,29	5,06
0,10 - 0,20	0,29 <sup>ns</sup>	0,29	0,28	0,28 <sup>ns</sup>	0,29	0,29	0,29	0,29	4,68	
Experimento II (2017/18)	Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )									
	0,00 - 0,05	1,50 <sup>ns</sup>	1,53	1,51	1,51 <sup>ns</sup>	1,51	1,51	1,52	1,51	3,70
	0,05 - 0,10	1,70 <sup>ns</sup>	1,68	1,68	1,72 <sup>ns</sup>	1,66	1,71	1,66	1,69	6,16
	0,10 - 0,20	1,77 <sup>ns</sup>	1,75	1,75	1,77 ab	1,75 ab	1,79 a	1,73 b	1,76	2,14
	Porosidade total do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 - 0,05	0,42 <sup>ns</sup>	0,41	0,42	0,42 <sup>ns</sup>	0,42	0,42	0,41	0,42	5,18
	0,05 - 0,10	0,34 <sup>ns</sup>	0,35	0,35	0,34 <sup>ns</sup>	0,36	0,34	0,36	0,35	11,55
	0,10 - 0,20	0,31 <sup>ns</sup>	0,32	0,32	0,32 ab	0,33 ab	0,31 b	0,33 a	0,32	4,54
	Macroporosidade do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 - 0,05	0,12 <sup>ns</sup>	0,12	0,13	0,13 <sup>ns</sup>	0,12	0,13	0,12	0,12	17,34
	0,05 - 0,10	0,04 <sup>ns</sup>	0,06	0,05	0,04 <sup>ns</sup>	0,06	0,04	0,06	0,05	61,23
	0,10 - 0,20	0,03 <sup>ns</sup>	0,04	0,04	0,03 <sup>ns</sup>	0,04	0,02	0,04	0,03	49,00
	Microporosidade do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 - 0,05	0,30 <sup>ns</sup>	0,28	0,29	0,28 <sup>ns</sup>	0,29	0,29	0,29	0,29	5,64
	0,05 - 0,10	0,30 <sup>ns</sup>	0,29	0,30	0,29 <sup>ns</sup>	0,30	0,29	0,30	0,30	5,39
0,10 - 0,20	0,28 <sup>ns</sup>	0,28	0,29	0,28 <sup>ns</sup>	0,28	0,28	0,29	0,28	7,14	

<sup>1</sup> Não houve interações significativa entre os fatores estudados e os tratamentos são apresentados separadamente por fator. <sup>2</sup> Médias seguidas pela mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05). <sup>ns</sup> Não significativo em nível de 5% de probabilidade.

**Tabela 3** - Conteúdo de água no potencial -100 kPa e resistência do solo à penetração mecânica nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade em métodos de irrigação e manejos de solo em terras baixas. Itaqui, RS.

	Camada (m)	Método de irrigação <sup>1</sup>			Manejos do solo				Média	CV (%)
		Aspersão	Não irrigado	Faixas	Convencional	Direto	Camalhão Convencional	Camalhão Direto		
Experimento I	Conteúdo de água na tensão de -100 kPa (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 - 0,05	0,19 <sup>ns</sup>	0,19	0,19	0,19 <sup>ns</sup>	0,19	0,19	0,19	0,19	6,84
	0,05 - 0,10	0,22 <sup>ns</sup>	0,21	0,21	0,21 <sup>ns</sup>	0,21	0,22	0,21	0,21	6,72
	0,10 - 0,20	0,22 <sup>ns</sup>	0,22	0,23	0,22 <sup>ns</sup>	0,23	0,22	0,22	0,22	6,06
	Resistência do solo à penetração mecânica (Mpa)									
	0,00 - 0,05	1,12 <sup>ns</sup>	1,28	1,37	1,57 <sup>a2</sup>	1,46 <sup>b</sup>	1,02 <sup>bc</sup>	0,95 <sup>c</sup>	1,25	26,63
0,05 - 0,10	1,86 <sup>ns</sup>	1,79	1,80	2,52 <sup>a</sup>	1,81 <sup>b</sup>	1,62 <sup>b</sup>	1,32 <sup>b</sup>	1,82	29,59	
0,10 - 0,20	2,88 <sup>ns</sup>	2,98	2,46	2,66 <sup>ab</sup>	2,54 <sup>b</sup>	3,16 <sup>a</sup>	2,72 <sup>ab</sup>	2,77	18,50	
Experimento II	Conteúdo de água na tensão de -100 kPa (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 - 0,05	0,21 <sup>ns</sup>	0,21	0,21	0,20 <sup>ns</sup>	0,22	0,21	0,22	0,21	5,86
	0,05 - 0,10	0,24 <sup>ns</sup>	0,23	0,24	0,23 <sup>ns</sup>	0,23	0,24	0,23	0,23	7,92
	0,10 - 0,20	0,23 <sup>ns</sup>	0,22	0,23	0,23 <sup>ns</sup>	0,22	0,24	0,23	0,23	10,99
	Resistência do solo à penetração mecânica (Mpa)									
	0,00 - 0,05	2,09 <sup>ns</sup>	2,26	2,18	2,23 <sup>ns</sup>	2,06	2,35	2,07	2,18	23,84
0,05 - 0,10	3,93 <sup>ns</sup>	3,95	3,29	4,76 <sup>a</sup>	3,02 <sup>bc</sup>	4,42 <sup>ab</sup>	2,69 <sup>c</sup>	3,72	28,82	
0,10 - 0,20	5,24 <sup>ns</sup>	4,58	4,84	5,58 <sup>a</sup>	3,88 <sup>b</sup>	5,57 <sup>a</sup>	4,50 <sup>ab</sup>	4,88	19,32	

<sup>1</sup> Não houve interações significativas entre os fatores estudados e os tratamentos são apresentados separadamente por fator. <sup>2</sup> Médias seguidas pela mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). <sup>ns</sup> Não significativo em nível de 5% de probabilidade.

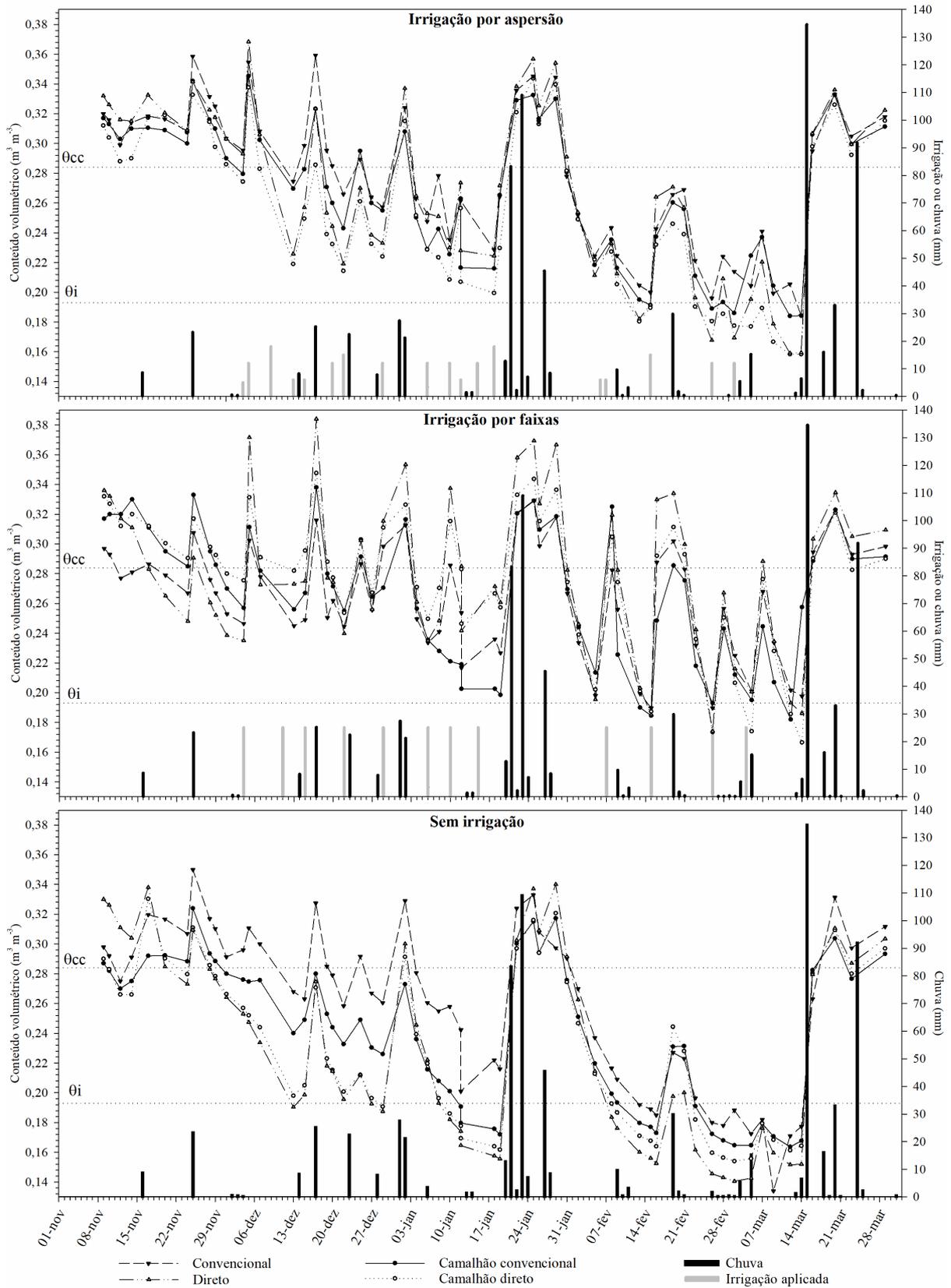
Valores de Rp superiores a 2 Mpa são considerados restritivos para o crescimento radicular (Taylor et al., 1966). No entanto, as consequências de altos valores de Rp para as plantas são dependentes do estágio de desenvolvimento da cultura e do tempo em que a planta fica submetida a esse estresse (Bengough et al., 2006). Observando a variação do  $\theta$  no ExpII (Figura 3), verifica-se que sem o uso da irrigação a cultura da soja foi submetida a períodos mais prolongados a uma condição de elevada Rp, devido a redução do  $\theta$ . O menor  $\theta$  foi observado em todos os tratamentos depois de 5 dias após a última chuva, acelerando a redução do  $\theta$  com o aumento do índice de área foliar da cultura e o número de dias até a próxima chuva.

Nos tratamentos de manejos do solo não foram observadas diferenças nos valores de  $\theta$ . No entanto, foi observado na irrigação por faixas que, após cada irrigação, o  $\theta$  se elevou até próximo à saturação solo, reduzindo drasticamente o espaço aéreo para próximo a zero no solo (Figura 4). Nesse método, observou-se um maior intervalo de tempo com espaço aéreo inferior a 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, logo após a aplicação de irrigação ou chuva, indicando estresse por excesso

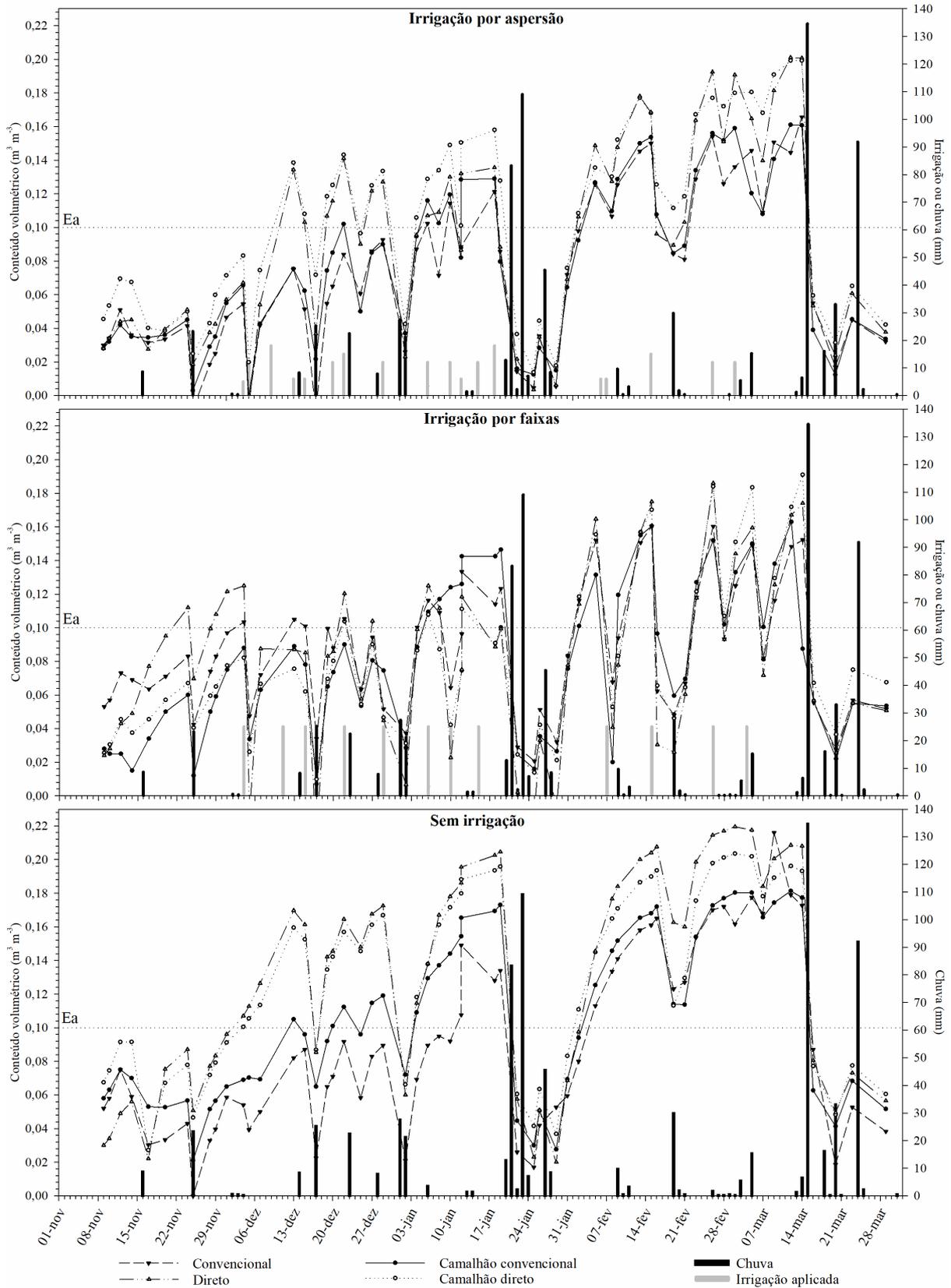
hídrico para a cultura da soja (Olibone et al., 2010; Beutler et al., 2014). No tratamento de irrigação por aspersão, as irrigações foram mais frequentes para manter o  $\theta$  adequado a cultura.

Apesar de semelhantes quanto ao  $\theta$ , pode-se observar um maior espaço aéreo, após chuvas ou irrigações, nos tratamentos de manejos do solo Direto e Camalhão direto, quando comparado ao Convencional e Camalhão convencional, em todos os métodos de irrigação. Esse resultado pode estar relacionado a uma melhor estruturação do solo não mobilizado (Micucci e Taboada, 2006), e a manutenção dos bioporos provenientes das raízes da aveia cultivada no inverno, que favorecem a agregação (Six et al., 2004). Fatores estes que favorecem uma maior taxa de infiltração e o movimento de água no solo como observado por Bonetti et al. (2019), em solo cultivado com gramíneas, e por Ram et al. (2013) em plantio direto com cobertura de palha.

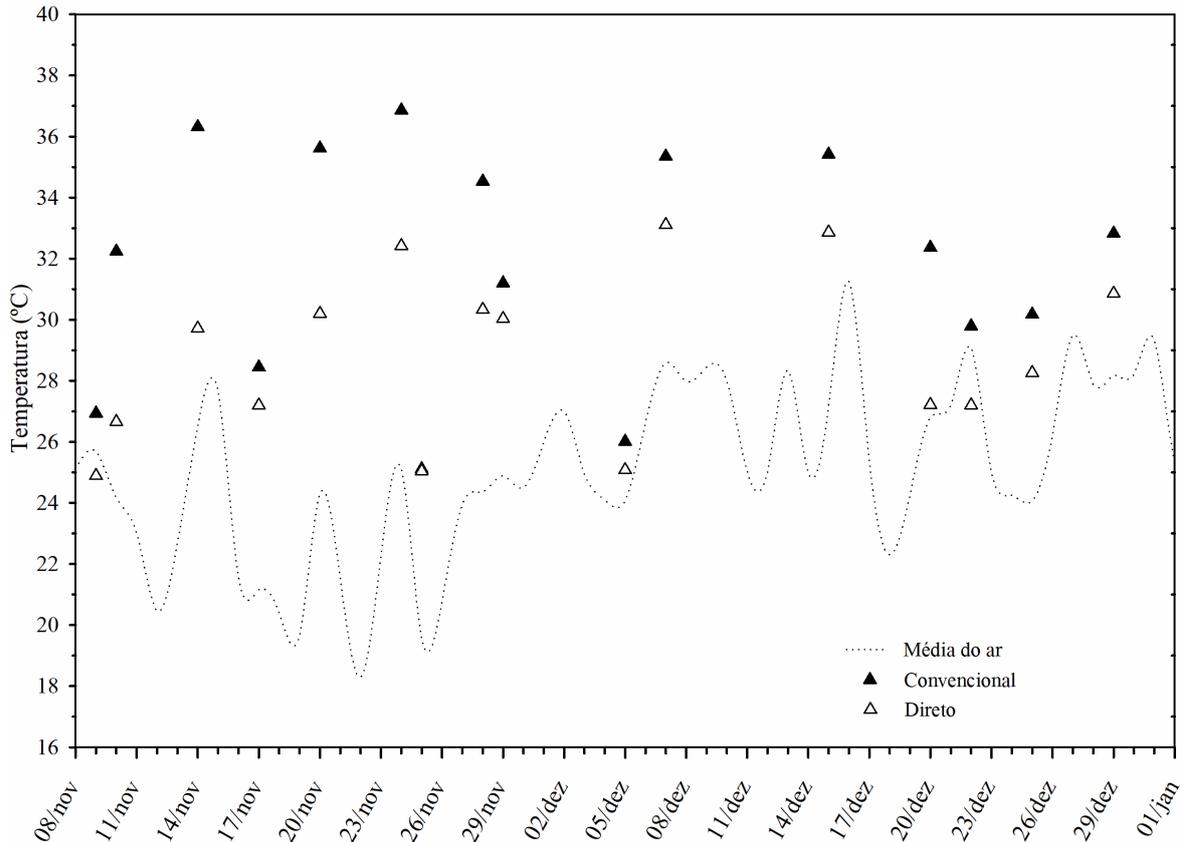
Em relação a temperatura do solo na camada de 0-0,05 m de profundidade, verifica-se efeito positivo da palha de aveia na superfície do solo, no tratamento Direto, comparado ao Convencional, em que a temperatura foi até 6 °C menor em novembro e dezembro de 2017 (Figura 5). A menor temperatura na superfície do solo está relacionada a cobertura do solo com palha (Ram et al., 2013) e é benéfica ao crescimento das plantas e à qualidade do solo.



**Figura 3** - Conteúdo de água no solo, chuva e irrigações realizadas nos métodos de irrigação por aspersão, faixas e não irrigado nos manejos de solo com preparo convencional (Convencional), semeadura direta (Direto), Camalhão convencional e Camalhão direto em terras baixas na safra agrícola 2017/18 na camada de 0 - 0,25 m de profundidade.  $\theta_{cc}$  - Conteúdo de água no solo na capacidade de campo.  $\theta_i$  - conteúdo de água a 50% da água disponível no solo (Cc - PMP) e conteúdo mínimo para realizar a irrigação. Itaquí, RS.



**Figura 4** - Espaço aéreo no solo, chuva e irrigações realizadas nos métodos de irrigação por aspersão, faixas e não irrigado nos manejos de solo com preparo convencional (Convencional), semeadura direta (Direto), Camalhão convencional e Camalhão direto em terras baixas na safra agrícola 2017/18 na camada de 0 - 0,25 m de profundidade. Ea - Espaço aéreo no solo de  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Itaqui, RS.



**Figura 5** - Temperatura do solo na camada de 0 - 0,05 m de profundidade nos tratamentos com preparo convencional (Convencional) e semeadura direta (Direto), nos meses de novembro e dezembro de 2017. Itaquí, RS.

O aprofundamento do sistema radicular tem relação com a água disponível no solo, e se não for limitante, o sistema radicular tende a se concentrar próximo à superfície. Alguns estudos afirmam que, quando as raízes penetram profundamente no solo, as mesmas apresentam maior massa de raiz e atingem um maior volume de solo explorado (Kunert et al., 2016). O engrossamento das raízes pode ocorrer em decorrência da elevação da compactação do solo (Beulter e Centurion, 2004), como observado no tratamento Convencional e Camalhão convencional nas camadas 0,05 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m, e menor profundidade relacionada ao aumento da  $R_p$  (Beulter e Centurion, 2004; Olibone et al., 2010).

Segundo Willams et al. (2004), em plantio direto utilizando plantas de cobertura, o crescimento das raízes de soja ocorre preferencialmente nos bioporos oriundos das raízes da cultura antecessora. De acordo com os mesmos autores, quanto maior a compactação do solo, maiores são os benefícios encontrados pelos bioporos da cultura anterior, o que pode explicar a melhor distribuição do sistema radicular no tratamento Direto, ainda que apresente  $D_s$  próxima da crítica.

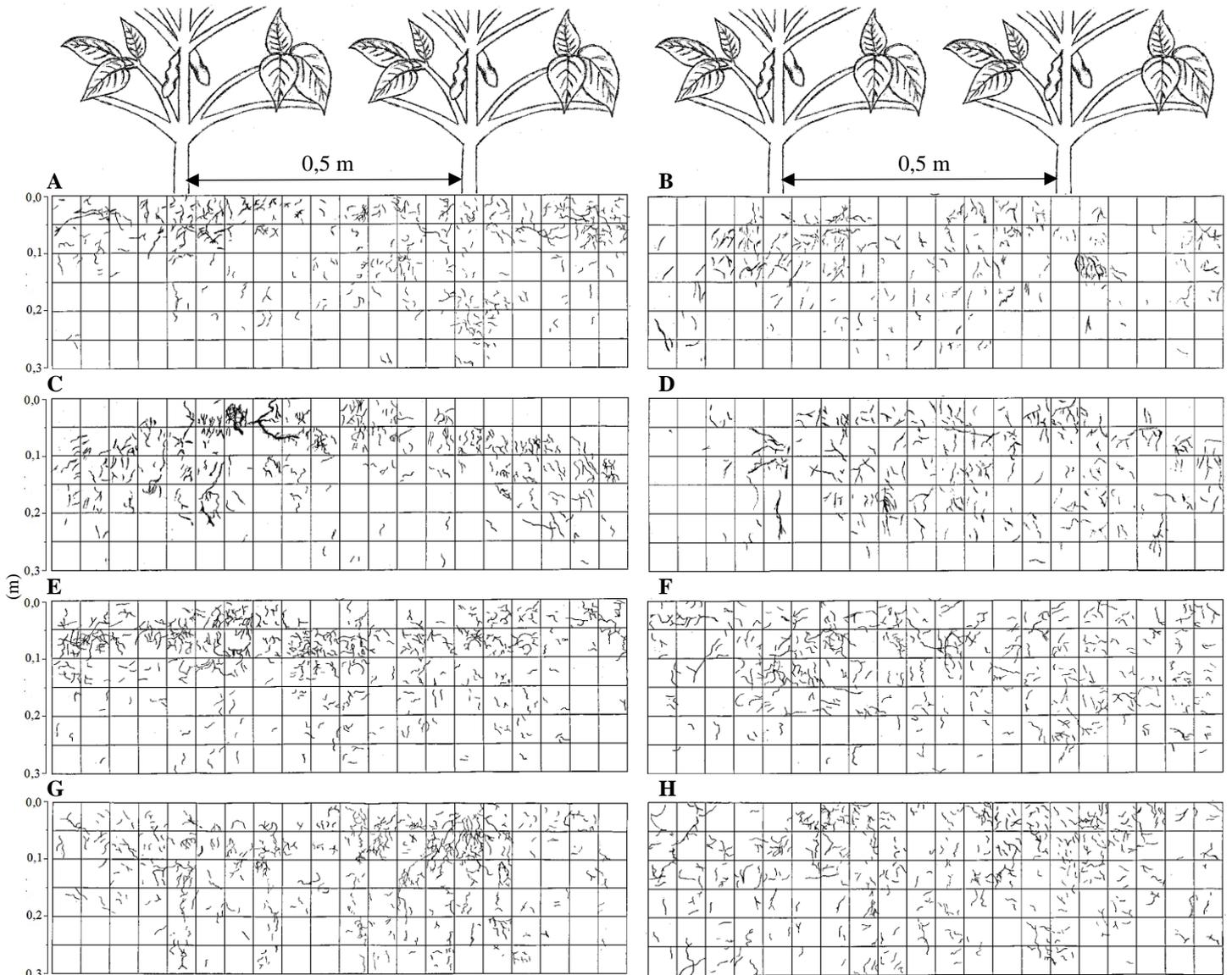
A porcentagem de cobertura do solo pelo dossel da soja aos 40 dias após a semeadura (Tabela 4) não apresentou interação, nos dois experimentos. No ExpI, a cobertura do solo foi

menor no tratamento Convencional (61%) em relação ao Direto (73%), não havendo diferença nos métodos de irrigação. No ExpII, a porcentagem de cobertura no Convencional e Camalhão convencional (54 e 59%) foram menores que o Direto e Camalhão direto (84 e 79%). Nesse experimento, os tratamentos irrigados também tiveram uma maior cobertura do solo, em relação ao não irrigado.

O número de nódulos por plantas não apresentou interação entre os fatores, sendo menor no tratamento Convencional comparado aos demais, não diferindo entre os métodos de irrigação. Porém, para a massa seca de nódulos por planta houve interação, sendo menor no Convencional, Direto e Camalhão convencional quando não irrigados. Na irrigação por aspersão e faixas, o tratamento Convencional resultou em menor massa seca dos nódulos. Resultados esses que indicam que a menor nodulação está relacionada às condições de menor disponibilidade hídrica no solo (Kunert et al., 2016).

Na Figura 6 são apresentadas as imagens da distribuição do sistema radicular da cultura da soja no ExpII. Nessa figura, pode-se observar maior aprofundamento das raízes nos tratamentos sem irrigação, tanto no tratamento Convencional, quanto no Direto. Em todos os tratamentos de irrigação, o Convencional apresentou um engrossamento das raízes próximas a 0,1 m de profundidade em relação ao Direto, o que coincidiu com a maior  $R_p$  nesse tratamento e Camalhão convencional, em comparação ao Camalhão direto, irrigados por aspersão.

No ExpII a altura final de plantas e legumes por plantas não indicaram interações entre os fatores. A altura das plantas foi menor no tratamento Convencional e Camalhão convencional em aproximadamente 0,3 m comparada ao Direto e Camalhão direto. A ausência de irrigação também resultou em plantas quando comparada a irrigadas por aspersão ou faixas, resultado da ocorrência do déficit hídrico (Bellaloui et al., 2013). A irrigação também resultou em diferenças no número de legumes por plantas, onde no tratamento sem irrigação a soja teve menor número de legumes.



**Figura 6** - Distribuição do sistema radicular da cultura da soja irrigada por aspersão nos manejos do solo convencional (A), semeadura direta (B), camalhão com convencional (C) e camalhão direto (D), irrigada por faixa nos tratamentos com preparo convencional (E) e semeadura direta (F), e sem irrigação nos tratamentos convencional (G) e semeadura direta (H) no estágio fenológico R5 na safra agrícola 2017/18, em quadriculas de 0,05 x 0,05 m. Itaqui, RS.

**Tabela 4** - Porcentagem de cobertura do solo pelo dossel aos 40 dias após semeadura no experimento I e II (Safrá 2016/17 e 2017/18), e no experimento II, número e massa seca de nódulos por planta, altura de plantas e número de legumes de soja em método de irrigação e manejos do solo em terras baixas. Itaquí, RS.

Métodos de irrigação	Manejos do solo				Média	CV(%)
	Convencional	Direto	Camalhão Convencional	Camalhão Direto		
Experimento I						
Porcentagem de cobertura do solo pelo dossel <sup>1</sup> (%)						
Aspersão	-	-	-	-	69,66 <sup>ns</sup>	
Faixas	-	-	-	-	66,89	6,30
Não irrigado	-	-	-	-	65,84	
Média	61,52 <sup>γ</sup>	73,25 <sup>α</sup>	69,71 <sup>αβ</sup>	65,33 <sup>βγ</sup>	67,46	
Porcentagem de cobertura do solo pelo dossel (%)						
Aspersão	-	-	-	-	76,38 <sup>α</sup>	
Faixas	-	-	-	-	74,23 <sup>α</sup>	12,62
Não irrigado	-	-	-	-	57,20 <sup>β</sup>	
Média	54,52 <sup>β</sup>	84,52 <sup>α</sup>	58,72 <sup>β</sup>	79,31 <sup>α</sup>	69,27	
Nº de nódulos por planta						
Aspersão	-	-	-	-	107,67 <sup>ns</sup>	
Faixas	-	-	-	-	100,67	20,36
Não irrigado	-	-	-	-	90,03	
Média	77,07 <sup>β</sup>	102,96 <sup>α</sup>	109,89 <sup>α</sup>	107,89 <sup>α</sup>	99,46	
Experimento II						
Massa seca de nódulos por planta (gramas)						
Aspersão	0,35 abB <sup>2</sup>	0,49 aAB	0,59 aA	0,56 A	0,53	
Faixas	0,40 aB	0,58 aA	0,51 abAB	0,55 AB	0,48	14,78
Não irrigado	0,25 bC	0,33 bBC	0,44 bAB	0,52A	0,38	
Média	0,33	0,47	0,51	0,54	0,46	
Altura de plantas (cm)						
Aspersão	-	-	-	-	127,10 <sup>α</sup>	
Faixas	-	-	-	-	127,65 <sup>α</sup>	10,67
Não irrigado	-	-	-	-	97,74 <sup>β</sup>	
Média	99,19 <sup>β</sup>	134,77 <sup>α</sup>	104,78 <sup>β</sup>	131,25 <sup>α</sup>	117,50	
Legumes por planta (nº)						
Aspersão	-	-	-	-	70,38 <sup>αβ</sup>	
Faixas	-	-	-	-	72,82 <sup>α</sup>	15,90
Não irrigado	-	-	-	-	59,68 <sup>β</sup>	
Média	62,68 <sup>ns</sup>	72,53	68,49	66,80	67,63	

<sup>1</sup> Os resultados das variáveis agrônômicas que não apresentaram interação significativa são apresentados na linha média para os tratamentos do fator manejos de solo e na coluna média para os métodos de irrigação, quando significativas as diferenças são classificadas pelas letras gregas. <sup>2</sup> Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e maiúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05). <sup>ns</sup> Não significativo em nível de 5% de probabilidade.

Na produtividade grãos de soja houve interação (Tabela 5). No ExpI, a menor produtividade de grãos para o Convencional pode ser explicada pela maior Ds e Rp, e que as irrigações realizadas por faixa evitaram a ocorrência de períodos de baixo conteúdo de água no solo desse tratamento. No ExpII, a produtividade de grãos foi maior no irrigado por aspersão ou faixas, nos Direto, Camalhão convencional e Camalhão direto.

**Tabela 5** - Produtividade de grãos, massa de mil grãos, produtividade da água e da água de irrigação no experimento I e II (Safra 2016/17 e 2017/18), e massa seca total e índice de colheita no experimento II, na cultura soja em diferentes métodos de irrigação e manejos do solo em terras baixas. Itaquí, RS.

Métodos de irrigação <sup>1</sup>	Manejos do solo				Média	CV(%)
	Convencional	Direto	Camalhão Convencional	Camalhão Direto		
Produtividade de grãos (Mg ha <sup>-1</sup> )						
Aspersão	3,64 ab <sup>2</sup>	4,11 <sup>ns</sup>	3,77 <sup>ns</sup>	3,67 <sup>ns</sup>	3,78	
Faixas	4,01 a	4,15	3,85	3,76	3,94	9,49
Não irrigado	3,15 b	3,77	3,60	3,74	3,57	
Média	3,60	4,01	3,71	3,72	3,76	
Massa de mil grãos (gramas)						
Aspersão	-	-	-	-	179,18 <sup>ns</sup>	
Faixas	-	-	-	-	184,25	7,46
Não irrigado	-	-	-	-	182,16	
Média	173,63 <sup>ns</sup>	189,57	182,41	181,85	181,86	
Produtividade da água (kg m <sup>-3</sup> )						
Aspersão	0,47 B	0,53 A	0,49 AB	0,47 B	0,49	
Faixas	0,47 <sup>ns</sup>	0,49	0,53	0,52	0,50	9,53
Não irrigado	0,44 B	0,52 A	0,50 A	0,51 A	0,49	
Média	0,46	0,51	0,51	0,50	0,51	
Produtividade da água de irrigação (kg m <sup>-3</sup> )						
Aspersão	-	-	-	-	7,92 <sup>α</sup>	
Faixas	-	-	-	-	3,29 <sup>β</sup>	6,02
Média	5,46 <sup>β</sup>	6,02 <sup>α</sup>	5,54 <sup>αβ</sup>	5,39 <sup>β</sup>	5,61	
Produtividade de grãos (Mg ha <sup>-1</sup> )						
Aspersão	4,03 bB	5,31 aA	5,03 aA	4,56 aA	4,73	
Faixas	5,09 a	4,93 a	5,17 a	5,07 a	5,07	8,99
Não irrigado	3,37 bB	4,04 bA	3,42 bAB	3,54 bAB	3,59	
Média	4,16	4,76	4,54	4,39	4,46	
Massa de mil grãos (gramas)						
Aspersão	-	-	-	-	173,87 <sup>β</sup>	
Faixas	-	-	-	-	180,83 <sup>α</sup>	2,15
Não irrigado	-	-	-	-	154,90 <sup>γ</sup>	
Média	163,10 <sup>β</sup>	173,69 <sup>α</sup>	172,67 <sup>α</sup>	170,02 <sup>α</sup>	169,87	
Produtividade da água (kg m <sup>-3</sup> )						
Aspersão	-	-	-	-	0,49 <sup>ns</sup>	
Faixas	-	-	-	-	0,46	9,29
Não irrigado	-	-	-	-	0,46	
Média	0,43 <sup>β</sup>	0,50 <sup>α</sup>	0,47 <sup>αβ</sup>	0,47 <sup>αβ</sup>	0,47	
Produtividade da água de irrigação (kg m <sup>-3</sup> )						
Aspersão	2,04 aB	2,50 aA	2,55 aA	2,52 aA	2,40	
Faixas	1,41 b	1,48 b	1,44 b	1,41 b	1,43	12,85
Média	1,72	1,99	1,99	1,96	1,91	
Massa seca total de plantas (Mg ha <sup>-1</sup> )						
Aspersão	-	-	-	-	11,30 <sup>α</sup>	
Faixas	-	-	-	-	10,75 <sup>α</sup>	3,61
Não irrigado	-	-	-	-	7,52 <sup>β</sup>	
Média	8,41 <sup>β</sup>	10,34 <sup>α</sup>	10,04 <sup>α</sup>	10,65 <sup>α</sup>	9,86	
Índice de colheita (kg m <sup>-3</sup> )						
Aspersão	-	-	-	-	0,42 <sup>ns</sup>	
Faixas	-	-	-	-	0,49	19,67
Não irrigado	-	-	-	-	0,49	
Média	0,50 <sup>ns</sup>	0,48	0,46	0,43	0,47	

<sup>1</sup> Os resultados das variáveis agrônômicas que não apresentaram interação significativa são apresentados na linha média para os tratamentos do fator manejos de solo e na coluna média para os métodos de irrigação, quando significativas as diferenças são classificadas pelas letras gregas. <sup>2</sup> Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e maiúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05). <sup>ns</sup> Não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

O tratamento Convencional irrigado por aspersão teve a mesma produtividade de grãos do que os não irrigados, nos dois experimentos. Esses resultados podem estar relacionados a menor infiltração de água no solo, pelo adensamento próximo a 0,1 m, e tenha ocasionando perdas por escoamento superficial e não aproveitada pela cultura. A taxa de infiltração reduzida é o principal limitante para utilizar a irrigação por aspersão em terras baixas. Dessa forma, antes de se recomendar a adoção do método, deve-se avaliar a condição física do solo. Utilizando a irrigação por aspersão nos tratamentos Direto e Camalhão direto os resultados foram semelhantes aos encontrados na irrigação por faixas.

No ExpII o tratamento sem irrigação no manejo do solo Direto resultou em incremento de produtividade de grãos em 20%, em relação ao Convencional. Os manejos Direto, Camalhão convencional e Camalhão direto, quando irrigados, também proporcionaram maior produtividade de grãos, alcançando produtividade média de 5,01 Mg ha<sup>-1</sup>, enquanto naqueles não irrigados, a produtividade foi 3,67 Mg ha<sup>-1</sup>. Dessa forma, no ExpII, com maiores períodos sem chuvas, demandou maior número de irrigações, aumentando a produtividade de grãos em 37%.

A variável massa de mil grãos não resultou em interação entre os fatores, sendo igual em todos tratamentos do ExpI. No ExpII, a massa de mil grãos foi maior na irrigação por faixas e maior na irrigação por aspersão, em relação ao não irrigado. Nos manejos do solo, esse componente foi menor somente no tratamento Convencional. A massa de mil grãos pode ser reduzida principalmente em condições em que a cultura é submetida a déficit hídrico no enchimento de grão (R5 - R6) (Bellaloui et al., 2013). Dessa forma, a boa distribuição de chuvas no ExpI e a má distribuição no ExpII nesse estágio, podem explicar a redução da massa em relação ao menor  $\theta$  quando não irrigado, e próximo ao crítico na irrigação por aspersão.

A produtividade da água total foi menor no tratamento Convencional, em comparação ao Direto, já que o volume total gasto foi similar e a produtividade menor naquele manejo. E,

para o ExpI e ExpII, a produtividade da água média foi de 0,51 e 0,47 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Para a produtividade da água de irrigação não houve interações entre o manejo do solo e o método de irrigação no ExpI. A produtividade da água de irrigação foi de 7,92 kg m<sup>-3</sup> na aspersão, muito superior ( $\approx 140\%$ ) ao irrigado por faixas no ExpI (3,29 kg m<sup>-3</sup>). No manejo do solo Convencional, a produtividade da água foi menor, visto que, a quantidade de água utilizada para irrigação foi a mesma que no Direto, onde se observa maior produtividade de grãos.

No ExpII, a produtividade da água de irrigação teve interação entre os fatores, e foi maior na irrigação por aspersão, em relação às faixas, em todos os manejos do solo. Quando irrigado por aspersão, a produtividade da água de irrigação foi maior nos tratamentos Direto, e Camalhão convencional e Camalhão direto, comparada ao Convencional. No entanto, a irrigação por faixas apresentou resultados semelhantes em todos os manejos do solo.

A massa seca total da cultura da soja foi maior nos tratamentos irrigados, e menor no manejo do solo Convencional. Essa maior massa seca não resultou, entretanto, índice de colheita diferente entre os tratamentos, resultado que pode ser explicado pela também melhor produtividade de grãos nesses tratamentos. De acordo com Steduto et al. (2009), a produtividade de grãos de uma cultura é função do acúmulo de massa seca durante o ciclo de crescimento da cultura, sendo que o índice de colheita é característica de cada cultivar.

De forma geral, com os resultados encontrados para a produtividade de grãos de soja irrigada, o cultivo sobre camalhão pode ser uma estratégia em anos de maiores volumes de chuvas ou com necessidade de irrigação. Quando irrigado (nos sulcos), a produtividade da água é maior do que na irrigada por faixas (Ram et al., 2013), além da menor frequência de períodos de baixa aeração no solo (Gubiani et al., 2018). Por outro lado, o cultivo de soja no manejo do solo Direto, desde que não compactado, ocasiona menores riscos tanto para excesso, quando déficit hídrico para a produção de soja em áreas de terras baixas, melhorando disponibilidade hídrica no solo (Olibone et al., 2010) e desenvolvimento radicular (Williams e Weil, 2004).

A utilização da irrigação pode minimizar os efeitos da baixa qualidade física do solo, principalmente quando da utilização da irrigação por superfície, com a elevação da produtividade de grãos, porém, com menor produtividade da água irrigada. A irrigação por aspersão resulta em boas produtividades de soja, desde que adotados manejos do solo como a semeadura direta e semeadura direta em camalhões. Esse método pode viabilizar a rotação de culturas em terras baixas, com a utilização de pivô central, pela menor necessidade de mão de obra e preparo do solo. Além disso, segundo Al-Kaisi et al. (2016) a rotação de cultura ao longo dos anos apresenta maior retorno econômico que o monocultivo.

## **Conclusão**

O manejo do solo com preparo convencional aumenta a resistência do solo à penetração mecânica próximo a 0,1 m de profundidade em solos de terras baixas, podendo restringir o desenvolvimento do sistema radicular, aumentando o risco de estresse por déficit ou excesso hídrico para a cultura da soja.

A irrigação na cultura da soja em áreas de terras baixas aumenta em 36% a produtividade de grãos, em anos de distribuição irregular de chuva.

O método de irrigação por aspersão apresenta maior produtividade da água de irrigação (90 %) comparada a faixas, para a cultura da soja, contribuindo para aumento da produtividade de forma sustentável.

## Referências bibliográficas

- Al-Kaisi, M.M.; Archontoulis, S.; Kwaw-Mensah, D. 2016. Soybean Spatiotemporal Yield and Economic Variability as Affected by Tillage and Crop Rotation. *Agronomy Journal* 108: 1-14.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith M. [FAO]. 1996. Irrigation and Drainage Paper N° 56 Crop Evapotranspiration. Food and Agriculture Organization of the United Nations 56: 1-156.
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M. Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22: 711-728.
- Bellaloui, N.; Mengistu, A.; Kassem, M.A. 2013. Effects of Genetics and Environment on Fatty Acid Stability in Soybean Seed. *Food and Nutrition Sciences* 04: 165-175.
- Beutler, A.N.; Giacomeli, R.; Alberto, C.M.; Silva, V.N.; Silva, G.F.; Machado, G.A.; Santos, A.T.L. 2014. Soil hydric excess and soybean yield and development in Brazil. *Australian Journal of Crop Science* 8: 1461-1466.
- Bonetti, J.A.; Anghinoni, I.; Gubiani, P.I., Cecagno, D.; Moraes, M.T. 2019. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. *Soil and Tillage Research* 186: 280-291.
- Christiansen, JE. 1942. Irrigation by sprinkling (Bulletin, 670). Berkeley: University of California, EUA.
- Companhia Nacional de Abastecimento [CONAB]. 2019. Brazilian crop production follow-up; Grains 2018/2019 season; twelfth survey, March 2019. Available at: [http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/12\\_levantamento\\_set2007.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/12_levantamento_set2007.pdf). [Accessed Abr. 23, 2019]. (in Portuguese).

- Denardin, L.G.O.; Carmona, F. C.; Veloso M.G.; Martins, A.P.; Freitas, T.F.S.; Carlos, F.S.; Marcolin, É.; Camargo, F.A.O.; Anghinoni I. 2019. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. *Soil and Tillage Research* 186: 64-69.
- Discrimination and Delimitation of the Lowlands in the State of Rio Grande do Sul: First Approach [Internet]. Press Release 313. Embrapa. Pelotas, RS, BRA. (in Portuguese)
- Fehr, W.R.; Caviness, C.E. 1977. Stages of soybean development. 80: 1-12.
- Ferreira, E.B.; Cavalcanti, P.P.; Nogueira, D.A. 2014. ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. *Applied Mathematics* 05: 2952-2958.
- Fin, S.S.; Marchesan, E.; Gubiani, P.I.; Farenzena, J.A.P.; Murari, M.S.; Coelho, L.L.; Cargnelutti, A.; Aramburu, B.B. 2018. Duration of the effects of scarification and raised bed associated with vegetation cover on soybean yield on an Alfisol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 53: 1230-1238.
- Giacomeli, R.; Marchesan, E.; Sartori, G.M.S.; Donato, G.; Silva, P.R.F.; Kaiser, D.R. 2016. Deep tillage and furrow opener seeders for corn cropping in Planosols. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51: 261-270. (in Portuguese, with abstract in English)
- Gubiani, P.I.; Müller, E.A.; Somavilla, A.; Zwirtes, A.L.; Mulazzani, R.P.; Marchesan, E. 2018. Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42: 1-14.
- Kunert, K.J.; Vorster, B.J.; Fenta, B.A.; Kibido, T.; Dionisio, G.; Foyer, C.H. 2016. Drought Stress Responses in Soybean Roots and Nodules. *Frontiers in Plant Science* 7: 1-7.
- Marcolin, C.D.; Klein, V.A. 2011. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum Agronomy* 33: 349-354.

- Micucci, F.G.; Taboada, M.A. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 86: 152-162.
- Miura, K.A.; Iribarrem, P.C.; Chaves, R.D.; Cunha, H.N.; Pranke, L.V. 2015.
- Nie, L.; Peng, S.; Chen, M.; Shah, F.; Huang, J.; Cui, K.; Xiang, J. 2012. Aerobic rice for water-saving agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32: 411-418.
- Olibone, D.; Encide-Olibone, A.P.; Rosolem, C.A. 2010. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. *Soil Use and Management* 26: 485-493.
- R Core Team. 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. [Internet]. Vienna, AUS.
- Ram H.; Singh Y.; Saini K.S.; Kler D.S.; Timsina J. 2013. Tillage and planting methods effects on yield, water use efficiency and profitability of soybean-wheat system on a loamy sand soil. *Experimental Agriculture* 49: 524-542.
- Rao A.N.; Johnson D.E.; Sivaprasad B.; Ladha J.K.; Mortimer A.M. 2007. Weed Management in Direct-Seeded Rice. *Advances in Agronomy* 93: 153-255.
- Reichert, J.M.; Suzuki, L.E.A.S.; Reinert, D.J.; Horn, R.; Håkansson, I. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research* 102: 242-254.
- Salvadori, J.R.; Bacaltchuk, B.; Deuner, C.C.; Lamas, G.L.C.J.; Rizzardi, M.A., Lângaro, N.C.; Ecosteguy, P.A.V.; Boller, W. 2016. Techniques for the cultivation of soybeans in Rio Grande do Sul and Santa Catarina crops 2016/2017 and 2017/2018. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, BRA. (in Portuguese)
- Sánchez-Llerena, J.; López-Piñeiro, A.; Albarrán, Á.; Peña, D.; Becerra, D.; Rato-Nunes, J.M. 2016. Short and long-term effects of different irrigation and tillage systems on soil properties

and rice productivity under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 77: 101-110.

Sartori, G.M.S.; Marchesan, E.; David, R.; Carlesso, R.; Petry, M.T.; Aires, N.P.; Giacomeli, R.; Aramburu, B.B.; Silva, A.L. 2016. Soybean Tillage Systems and Physical Changes in Surface Layers of Two Albaqualf Soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 40: 1–15.

Sartori, G.M.S.; Marchesan, E.; David, R.; Carlesso, R.; Petry, M.T.; Donato, G.; Cargnelutti, A.; Silva, M.F. 2015. Soybean yield under different planting systems and border irrigation on Alfisols. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 50: 1139-1149. (in Portuguese, with abstract in English)

Silva, F.R.; Albuquerque, J.A.; Costa, A. 2014. Initial growth of the soybean crop in an oxisol with different degrees of compaction. *Revista Brasileira de Ciência do solo* 38: 1731-1739. (in Portuguese, with abstract in English)

Six, J.; Bossuyt, H.; Degryze, S.; Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79: 7-31.

Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA.

Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Raes, D.; Fereres, E. 2009. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal* 101: 426-437.

Williams, S.M.; Weil, R.R. 2004. Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. *Soil Science Society of America Journal* 68: 1403-1409.

## **4 ARTIGO II - Métodos de irrigação e manejo do solo para produção de arroz em terras baixas<sup>2</sup>**

### **Resumo**

A maioria das áreas de terras baixas cultivadas com arroz são irrigadas por inundação, com baixa produtividade da água utilizada e alta emissão de gases de efeito estufa. Solos nessas áreas, apresentam inúmeras vezes reduzida taxa de infiltração de água, baixa macroporosidade, e elevação da densidade do solo próximo a superfície, dificultando a rotação com outras culturas. O objetivo desse trabalho foi avaliar métodos alternativos de irrigação e de manejos do solo para cultivo de arroz em terras baixas. Para isso, dois experimentos com a cultura do arroz foram conduzidos em safras agrícolas 2016/17 e 2017/18, em Itaqui, RS, Brasil. O delineamento foi de blocos ao acaso, em esquema bi-fatorial (3x3) e três repetições. No fator principal foram avaliados os métodos de irrigação por aspersão, faixas e inundação. O fator manejos do solo apresentou os seguintes níveis: preparo convencional; semeadura direta e; camalhão (altura de 0,15 m e 1,0 m entre os sulcos). Antes da instalação do experimento o solo foi escarificado e a acidez corrigida com aplicação de calcário e, no tratamento convencional foi realizada antes da semeadura a gradagem a 0,1 m e aplainamento do solo. Avaliou-se as propriedades físicas do solo (densidade, porosidade total, macro e microporosidade), a necessidade de irrigação, produtividade de grãos e a produtividade da água. Os resultados indicam que: não houve redução na produtividade de grãos de arroz, quando irrigado por aspersão em semeadura direta, e a produtividade da água foi maior ( $3,82 \text{ kg m}^{-3}$ ) do que irrigado por faixas ( $1,64 \text{ kg m}^{-3}$ ) e inundação ( $1,21 \text{ kg m}^{-3}$ ); a irrigação por aspersão é uma alternativa a irrigação por inundação, desde que em semeadura direta e; o manejo do solo não influencia na produtividade de grãos de arroz quando irrigado por inundação.

**Palavras chave:** Irrigação por aspersão, plantio direto, sustentabilidade, produtividade da água.

---

<sup>2</sup> Redigido conforme as normas para submissão de artigos à revista Field Crops Research®

## Introdução

As áreas de terras baixas têm como características a reduzida declividade natural e, em alguns casos, a sistematização do solo em nível ou com pequeno desnível. Esses solos, quando cultivados, apresentam como características físicas, a reduzida taxa de infiltração de água, baixa porosidade e macroporosidade, além de camadas compactadas próximas à superfície (Sartori et al., 2016; Denardin et al., 2019). Essas características favorecem a utilização da irrigação por inundação, e é utilizado em 75% das terras baixas em que o arroz é cultivado (Nie et al., 2012). O arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo (161 milhões de hectares), correspondendo a 29% do total dos grãos utilizados na alimentação humana, e é considerado estratégico na solução de questões de segurança alimentar (Knaak and Miranda, 2018).

Na metade Sul do Estado do Rio Grande do Sul (RS), onde predominam planícies aluviais, anualmente são cultivadas aproximadamente um milhão de hectares com arroz (Conab, 2019), dos 6,5 milhões presentes nessa região (Miura et al., 2015). Nas últimas safras tem se observado a estabilização do teto produtivo da cultura, sendo devido, provavelmente, ao aumento no número de plantas daninhas resistentes ou de difícil controle aos herbicidas (Rao et al., 2007). Outros problemas descritos por Denardin et al. (2019) são a falta de rotação de culturas e de práticas conservacionistas do solo, com a redução da qualidade física, química e biológica do solo.

Alguns estudos apontam que, as práticas de manejo que reduzem a compactação, como a escarificação do solo e uso de haste sulcadora na semeadura viabilizam a rotação de culturas em terras baixas (Giacomeli et al., 2017; Sartori et al., 2015) e propiciam menores riscos de períodos de excesso hídrico no solo (Fin et al., 2018; Gubiani et al., 2018). Embora essas práticas garantam o sucesso da rotação de culturas, esses solos normalmente sofrem algum preparo quando cultivado novamente o arroz. O manejo do solo na maioria dos casos é realizado

com gradagens, buscando o aplainamento (nivelamento) da superfície do solo em áreas sistematizadas, e/ou a construção de taipas para facilitar a irrigação. Essa prática é conhecida como cultivo mínimo, e realizada em aproximadamente 61% da área de arroz do RS, seguido pelo preparo convencional em 30% (Knaak et al., 2018).

Métodos de irrigação alternativos, como a irrigação por aspersão ou por faixas, e de práticas conservacionistas de manejo do solo nessas áreas, podem ser utilizados como alternativa à tradicional irrigação por inundação, com melhor eficiência no uso da água (Bischetti et al., 2013). Sánchez-Llerena et al. (2016), avaliando o uso de água e a produtividade de arroz irrigado por aspersão, observaram redução de 75% no uso de água em comparação ao método tradicional de irrigação por inundação. Além disso, os mesmos autores observaram melhorias na qualidade física do solo, quando da utilização do sistema plantio direto e irrigação por aspersão, sem perda de produtividade a partir do terceiro ano de cultivo, em relação ao cultivo convencional.

Métodos de irrigação sem a manutenção de lâmina de água sobre o solo, quando manejados adequadamente, demandam menor uso de água que a inundação (Bischetti et al., 2013; Jiang et al., 2019; Nie et al., 2012). Além disso, a utilização de camalhões possibilita o estabelecimento de culturas sobre os camalhões, contribuindo para a drenagem da camada superficial do perfil do solo, auxiliando a aeração do solo e, dessa forma, viabilizando o cultivo de culturas anuais não adaptadas à ambiente parcial ou plenamente anaeróbico, como as culturas do milho e soja (Giacomeli et al., 2016; Sartori et al., 2015).

Alternativas mais sustentáveis devem ser estudadas para o cultivo de arroz em terras baixas, pois além da questão do uso da água, outros problemas ambientais estão relacionados à irrigação por inundação, como a persistência de pesticidas na água (Teló et al., 2015), a alta emissão de gases de efeito estufa (Fangueiro et al., 2017; Jiang et al., 2019), e a prática do preparo convencional do solo. Diante disso, objetivou-se avaliar métodos alternativos de

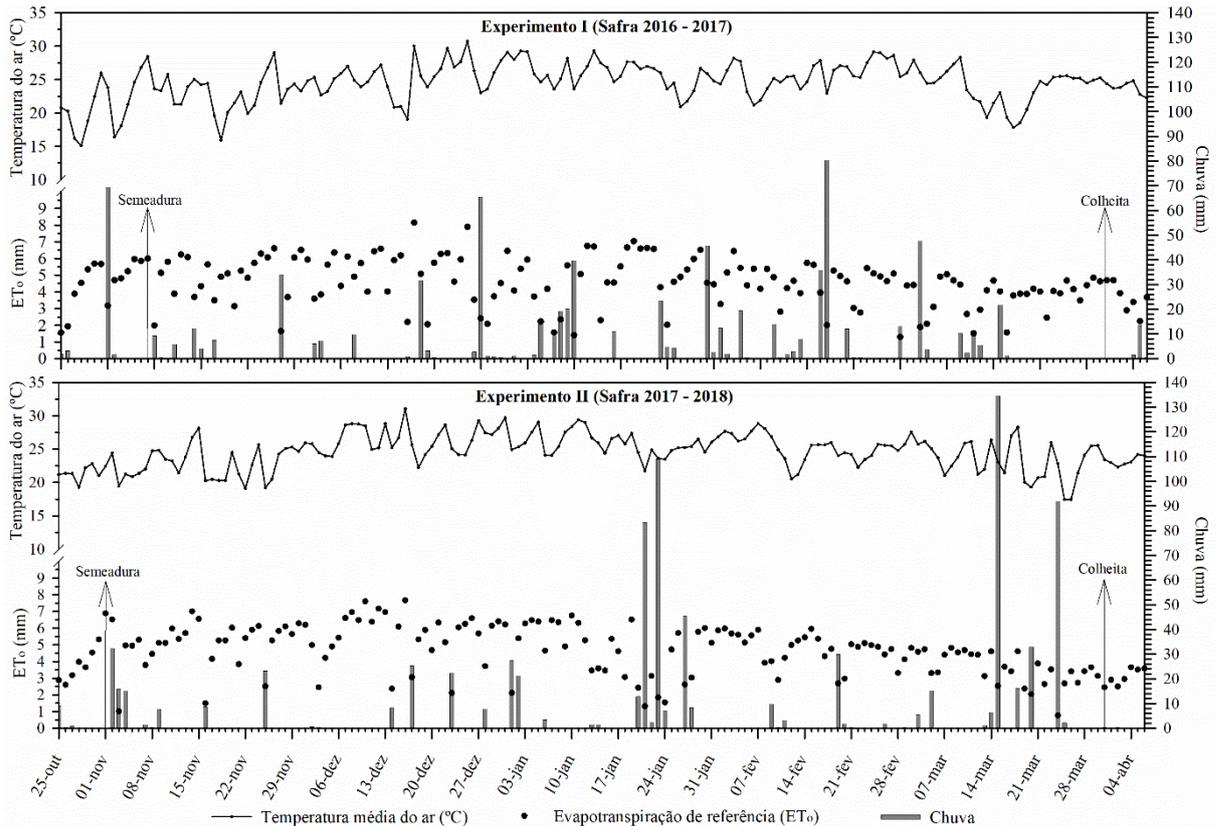
irrigação e de manejos do solo para cultivo de arroz em terras baixas.

## **Material e Métodos**

### *Descrição do local e solo*

Foram conduzidos dois experimentos com a cultura do arroz irrigado na área experimental da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), sendo o experimento I na safra agrícola 2016/17 e o experimento II na safra 2017/18. A área está situada no município de Itaqui, na região Oeste do Rio Grande do Sul (29°09' S, 56°33' W e altitude de 74 m). Segundo a classificação de Köeppen, o clima é caracterizado como subtropical úmido (Cfa), sem estação seca definida e precipitação pluviométrica (chuva) média de 1.616 mm ao ano (Alvares et al., 2013). O solo é classificado como Plintossolo Háptico (Santos et al. 2018), cuja descrição química e física é apresentada na Tabela 1. Os dados meteorológicos (Figura 1) foram obtidos de estação meteorológica automática (Modelo Vantage Pro2, Davis, USA), localizada a 400 m dos experimentos.

Entre os meses de abril e junho de 2016, realizou-se a uniformização da área com duas gradagens e aplainamento do solo, visando a implementação do sistema de plantio direto. No mês de agosto aplicou-se 3500 kg de calcário com PRNT de 60% para a correção da acidez do solo para pH 6,0. Após a calagem, no dia 10 de agosto, o solo foi escarificado até a profundidade 0,3 m, com escarificador de hastes espaçadas a 0,35 m, sendo no mesmo dia semeada a cultura da aveia preta. Em 2017, a aveia foi semeada no mês de junho, com o auxílio de semeadora de plantio direto, com linhas espaçadas em 0,17 m.



**Figura 1** - Temperatura média do ar, evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e chuva diária das safras agrícolas 2016/17 e 2017/18.

**Tabela 1** - Características físicas e químicas do solo da área experimental, nas diferentes profundidades, com amostragem realizada antes da instalação dos experimentos. Itaqui, RS.

..... Propriedades físicas ....										
Camada do solo (m)	Densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ )	Dp	Porosidade			CC	PMP	Textura		
			Total	Micro	Macro			Areia	Silte	Argila
0,0 - 0,1	1,49	2,60	0,42	0,30	0,12	0,283	0,089	585	237	179
0,1 - 0,2	1,78	2,58	0,32	0,30	0,02	0,285	0,110	570	225	204
0,2 - 0,3	1,74	2,56	0,33	0,30	0,03	0,284	0,110	526	199	275
0,3 - 0,4	1,60	2,58	0,38	0,34	0,04	0,319	0,148	501	157	342
0,4 - 0,5	1,54	2,62	0,41	0,33	0,08	0,310	0,181	460	157	383
..... Propriedades químicas na camada de 0,0 - 0,2 m ....										
Saturação (%) por Bases	Saturação (%) por Al	H+Al	CTC <sub>efetiva</sub>	CTC <sub>pH 7</sub>	Al	Mg	Ca			
56,4	5,1	2,8	3,9	6,5	0,2	0,9	2,7	(cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )		
pH	K	P-Mehlich	S	MO	Cu	Zn	B			
(H <sub>2</sub> O 1:1)								(mg dm <sup>-3</sup> )		
5,3	36,0	3,6	19,4	18,0	2,9	0,8	0,3			

Dp = Densidade de partícula, Total = Porosidade total; Micro = Microporosidade; Macro = Macroporosidade; CC = Capacidade de campo equivalente ao ponto de -10 kPa da curva de retenção de água no solo; PMP = Ponto de murcha permanente, equivalente ao ponto de -1500 kPa da curva de retenção de água no solo obtido pela técnica psicométrica (Modelo WP4, Decagon Devices, EUA).

### *Delineamento experimental e descrição dos tratamentos*

O delineamento utilizado foi de blocos ao acaso, com três repetições e parcelas subdivididas no fator A, e área de 150 m<sup>2</sup> nesse fator, e 50 m<sup>2</sup> para o fator D. O fator A foi constituído dos seguintes métodos de irrigação: irrigação por aspersão; irrigação por faixas e; irrigação por inundação. O fator D foi composto pelos manejos do solo: preparo convencional (Convencional), onde foram realizadas duas gradagens e posterior aplainamento do solo, em 31/10/2016 e 5/10/2017, para o experimento I e II, respectivamente; semeadura direta (Direto), onde não foi realizada nenhuma prática de preparo do solo após à escarificação e; semeadura direta com camalhão (Camlhão), construído no dia da escarificação, com altura aproximada de 0,15 m em relação ao nível do solo e largura de 1,0 m entre sulcos. Para semeadura foi utilizada a cultivar IRGA 424 RI, na densidade de 250 sementes por m<sup>-2</sup>.

O experimento I foi semeado no dia 6 de novembro de 2016 sob 1000 kg ha<sup>-1</sup> de resíduos de massa seca de aveia, na superfície do solo dos tratamentos com semeadura direta, enquanto o experimento II foi semeado em 01 de novembro de 2017, com 3100 kg ha<sup>-1</sup> de resíduos de aveia. A adubação e os tratos culturais foram realizados conforme as recomendações técnicas da cultura para alta expectativa de produtividade (Knaak and Miranda, 2018).

### *Manejo da irrigação*

A necessidade de irrigação foi monitorada pela combinação da estimativa da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), mediante a multiplicação da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) pelo método de Penman-Monteith, com os coeficientes de cultura simples (K<sub>c</sub>), conforme Allen et al., (1998) e do monitoramento do conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta$ ), com sensores que utilizam a técnica de capacitância/frequência de domínio no tempo (FDR). Para o tratamento irrigado por inundação, manteve-se lâmina média variando de 0,05 à 0,10 m sobre a superfície do solo após o estágio de desenvolvimento V3 (Counce et al., 2000).

No experimento I, o  $\theta$  foi avaliado com o auxílio de um FDR portátil (modelo

Hydrosense<sup>TM</sup>, Campbell Scientific, EUA), enquanto no experimento II foram instalados sensores a campo, fazendo-se medidas pontuais do  $\theta$ , com frequência de três vezes por semana (modelo CS-616, Campbell Scientific, EUA). Em ambos os métodos foi considerada a média do conteúdo de água na camada de 0 - 0,2 m dos tratamentos do fator manejo do solo para irrigação. Na irrigação por faixas, as irrigações foram realizadas sempre que a lâmina de água armazenada na camada de 0,0 a 0,20 m fosse menor que 57 mm, considerando-se essa a água armazenada no solo na capacidade de campo (Tabela 1). Para irrigação por aspersão, considerou-se o limite de 51 mm, correspondendo a 90% da água armazenada na capacidade de campo.

Na irrigação por inundação, foram construídas duas taipas ao redor da parcela principal (Fator A), utilizando-se mangueiras para irrigação. Na irrigação por faixas, 15 registros, distribuídos a cada metro no começo da parcela foram utilizados. Para irrigação por aspersão, utilizou-se um sistema convencional com dois aspersores setoriais (Modelo Pingo Setorial 4 mm, Fabrimar, BRA), em rotação de 180°, com 100% de sobreposição na área útil da parcela. No tratamento inundado, manteve-se lâmina de água entre as duas taipas para evitar a infiltração lateral. O uso de água para as parcelas nesse tratamento foi determinado com auxílio de hidrômetro de 1" de diâmetro. Para a irrigação por faixa utilizou-se vazão de 0,1 L s<sup>-1</sup> por registro e o tempo de irrigação fixado em, 1 h e 40 min. A eficiência de irrigação foi estimada em 50%, de forma que, estimou-se lâmina bruta de irrigação de 30 mm para cada evento de irrigação.

As irrigações por aspersão foram aplicadas com lâmina líquida fixa de 12 mm, com aplicação média de 6 mm por hora. Sendo essa determinada pela média de duas determinações em cada experimento, com o auxílio de pluviômetros (copos) medidores de diâmetro de 0,08 m e espaçados a um metro, mantendo-se a mesma pressão de serviço na linha principal em todas as irrigações (35 Psi). O coeficiente de uniformidade foi de 85% (Christiansen, 1942), ou seja,

aplicou-se 13,8 mm de lâmina bruta de irrigação.

#### *Variáveis relacionadas ao solo*

Nos tratamentos irrigados por inundação, coletaram-se amostras de solo indeformadas 30 dias após a colheita de cada experimento, e foram determinadas as propriedades físicas e hidráulicas do solo: densidade (Ds); porosidade total (Pt); macroporosidade (Ma) e; microporosidade (Mi). As amostras foram coletadas nas camadas intermediárias de 0,00 - 0,05, 0,05 - 0,10 e 0,10 - 0,20 m, com anéis de aproximadamente 0,03 m de altura e 0,055 m de diâmetro (Teixeira et al., 2017).

No experimento II foi avaliada a distribuição do sistema radicular nos tratamentos manejos de solo Convencional e Direto irrigados por aspersão, no estágio fenológico R4. Foram abertas trincheiras perpendiculares às linhas de semeadura (1,5 m x 0,5 m), onde as raízes foram expostas e fotografadas com um quadro de 1,0 x 0,4 m e malha de quadrículas de 0,05 x 0,05 m, permitindo compor os resultados de cada quadrícula em um único plano (Giacomeli et al., 2016).

#### *Variáveis agronômicas da cultura*

Determinou-se a massa seca total da parte aérea em área de 0,34 m<sup>2</sup> no estágio R8, o número de panículas por m<sup>2</sup> e altura de plantas até a panícula. Para a produtividade de grãos foi colhida uma área de 4,25 m<sup>2</sup> e realizada a trilha, pesagem, retirada das impurezas e determinada a umidade de cada parcela, corrigindo a massa de grãos para 13% de umidade. Posteriormente, realizou-se a secagem ao ar para a determinação do rendimento de grãos inteiros e quebrados. Para a produtividade da água de irrigação considerou-se a relação entre a produção atingida pela cultura (kg), e o uso total de água para irrigação. A variável índice de colheita foi determinada entre a razão da massa seca total e a produtividade de grãos.

#### *Análise estatística*

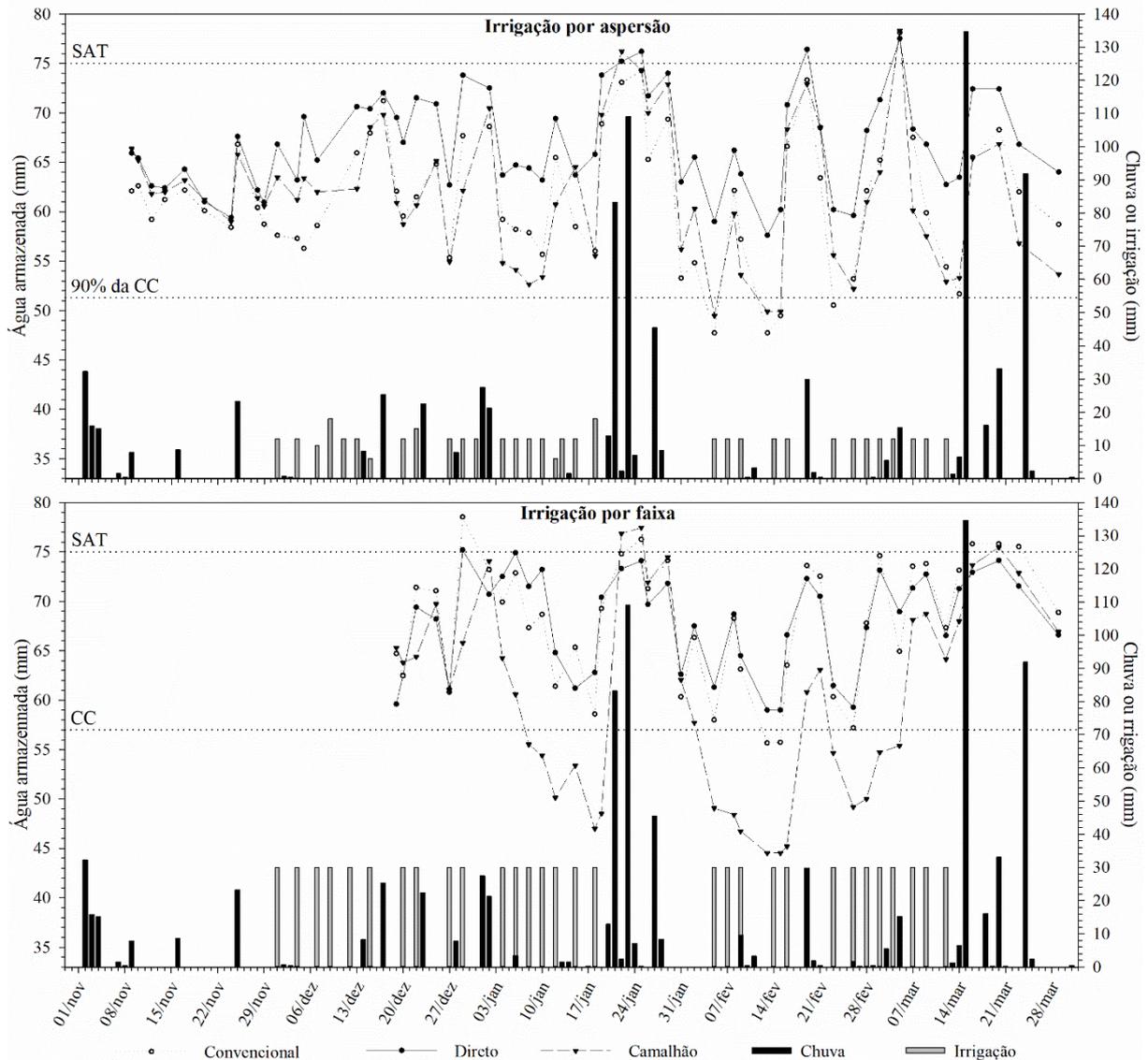
Os resultados foram submetidos ao teste das pressuposições do modelo matemático

(normalidade e homogeneidade). A análise de variância foi realizada pelo teste F ( $\alpha \leq 0,05$ ). Observada significância na análise de variância, foi realizado o teste complementar de Tukey ( $\alpha \leq 0,05$ ). Para as análises estatísticas e apresentação dos resultados em gráficos, foram utilizados os softwares R, versão 3.5.1 (R Core Team, 2018) com o pacote ExpDes.pt (Ferreira et al., 2014) e Sigma Plot® (Systat Software, San Jose, CA, Estados Unidos).

## **Resultados**

### *Irrigações*

Foram realizadas 16 irrigações nos tratamentos de irrigação por faixa e aspersão no experimento I, enquanto que, no Experimento II, foram realizadas 32 aplicações de água na irrigação por aspersão e 30 aplicações nos tratamentos irrigados por faixas (Figura 2). No experimento I, estimou-se o uso de água na irrigação de 1.920, 4.800 e 8.470 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, na aspersão, faixas e inundação, respectivamente. No experimento II foram aplicados 3.970, 7.500 e 9.375 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, na irrigação por aspersão, por faixas e por inundação, respectivamente. O volume de chuva no período entre a semeadura e maturidade fisiológica foi de 7.080 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para o experimento I e 7.420 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no experimento II.



**Figura 2** - Conteúdo de água no solo em métodos de irrigação e manejos de solo preparo convencional (Convencional), semeadura direta (Direto) e semeadura direta em camalhão (Camlhão) cultivado com arroz em terras baixas na safra 2017/18 na camada de 0 – 0,2 m de profundidade. Itaqui, RS.

### *Variáveis relacionadas ao solo*

Para a Ds, Pt, Ma e Mi, não houve interação entre os fatores métodos de irrigação e manejo do solo, dessa forma, os resultados foram comparados nos tratamentos para cada fator em cada camada do solo (Tabela 2). O manejo de irrigação não modificou nenhuma dessas variáveis físicas do solo.

**Tabela 2** - Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em dois experimentos com diferentes métodos de irrigação e manejos de solo para cultivo de arroz em terras baixas. Itaqui, RS.

	Tratamentos <sup>1</sup>							Média geral	CV (%)	
	Camada (m)	Métodos de irrigação			Manejos do solo					
		Aspersão	Faixa	Inundado	Convencional	Direto	Camalhão			
Experimento I (Safrá 2016/17)	Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )									
	0,00 – 0,05	1,53 <sup>ns</sup>	1,49	1,46	1,49 <sup>ns</sup>	1,51	1,48	1,49	7,69	
	0,05 – 0,10	1,58 <sup>ns</sup>	1,60	1,55	1,58 <sup>ns</sup>	1,56	1,58	1,57	6,92	
	0,10 – 0,20	1,65 <sup>ns</sup>	1,64	1,65	1,69 a <sup>2</sup>	1,66 ab	1,59 b	1,65	6,67	
	Porosidade total do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 – 0,05	0,41 <sup>ns</sup>	0,42	0,44	0,42 <sup>ns</sup>	0,42	0,43	0,42	10,48	
	0,05 – 0,10	0,39 <sup>ns</sup>	0,38	0,40	0,39 <sup>ns</sup>	0,39	0,40	0,39	10,80	
	0,10 – 0,20	0,36 <sup>ns</sup>	0,36	0,36	0,35 b	0,36 ab	0,39 a	0,36	11,67	
	Macroporosidade do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 – 0,05	0,07 <sup>ns</sup>	0,08	0,08	0,07 <sup>ns</sup>	0,07	0,09	0,08	38,62	
	0,05 – 0,10	0,06 <sup>ns</sup>	0,05	0,06	0,06 <sup>ns</sup>	0,06	0,05	0,06	47,22	
	0,10 – 0,20	0,04 <sup>ns</sup>	0,06	0,04	0,03 <sup>ns</sup>	0,05	0,06	0,05	53,83	
	Microporosidade do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
	0,00 – 0,05	0,34 <sup>ns</sup>	0,34	0,36	0,35 <sup>ns</sup>	0,35	0,34	0,35	7,47	
	0,05 – 0,10	0,33 <sup>ns</sup>	0,33	0,34	0,33 <sup>ns</sup>	0,33	0,33	0,33	8,98	
	0,10 – 0,20	0,32 <sup>ns</sup>	0,31	0,32	0,31 <sup>ns</sup>	0,31	0,32	0,32	7,76	
	Experimento II ( Safrá 2017/18)	Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )								
		0,00 – 0,05	1,46 <sup>ns</sup>	1,52	1,52	1,52 <sup>ns</sup>	1,50	1,48	1,50	8,71
0,05 – 0,10		1,61 <sup>ns</sup>	1,58	1,62	1,63 <sup>ns</sup>	1,59	1,60	1,60	6,04	
0,10 – 0,20		1,69 <sup>ns</sup>	1,67	1,71	1,69 <sup>ns</sup>	1,65	1,72	1,69	3,74	
Porosidade total do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )										
0,00 – 0,05		0,44 <sup>ns</sup>	0,41	0,41	0,41 <sup>ns</sup>	0,42	0,43	0,42	11,95	
0,05 – 0,10		0,38 <sup>ns</sup>	0,39	0,37	0,37 <sup>ns</sup>	0,39	0,38	0,38	9,86	
0,10 – 0,20		0,35 <sup>ns</sup>	0,36	0,34	0,34 <sup>ns</sup>	0,36	0,33	0,35	7,01	
Macroporosidade do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )										
0,00 – 0,05		0,08 <sup>ns</sup>	0,06	0,07	0,06 <sup>ns</sup>	0,07	0,09	0,07	40,18	
0,05 – 0,10		0,02 <sup>ns</sup>	0,04	0,02	0,02 <sup>ns</sup>	0,04	0,03	0,03	51,46	
0,10 – 0,20		0,02 <sup>ns</sup>	0,03	0,02	0,02 b	0,04 a	0,01 b	0,02	40,84	
Microporosidade do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )										
0,00 – 0,05	0,35 <sup>ns</sup>	0,36	0,34	0,36 <sup>ns</sup>	0,36	0,34	0,35	7,64		
0,05 – 0,10	0,35 <sup>ns</sup>	0,35	0,35	0,35 <sup>ns</sup>	0,35	0,35	0,35	5,44		
0,10 – 0,20	0,32 <sup>ns</sup>	0,33	0,32	0,33 <sup>ns</sup>	0,32	0,32	0,32	3,46		

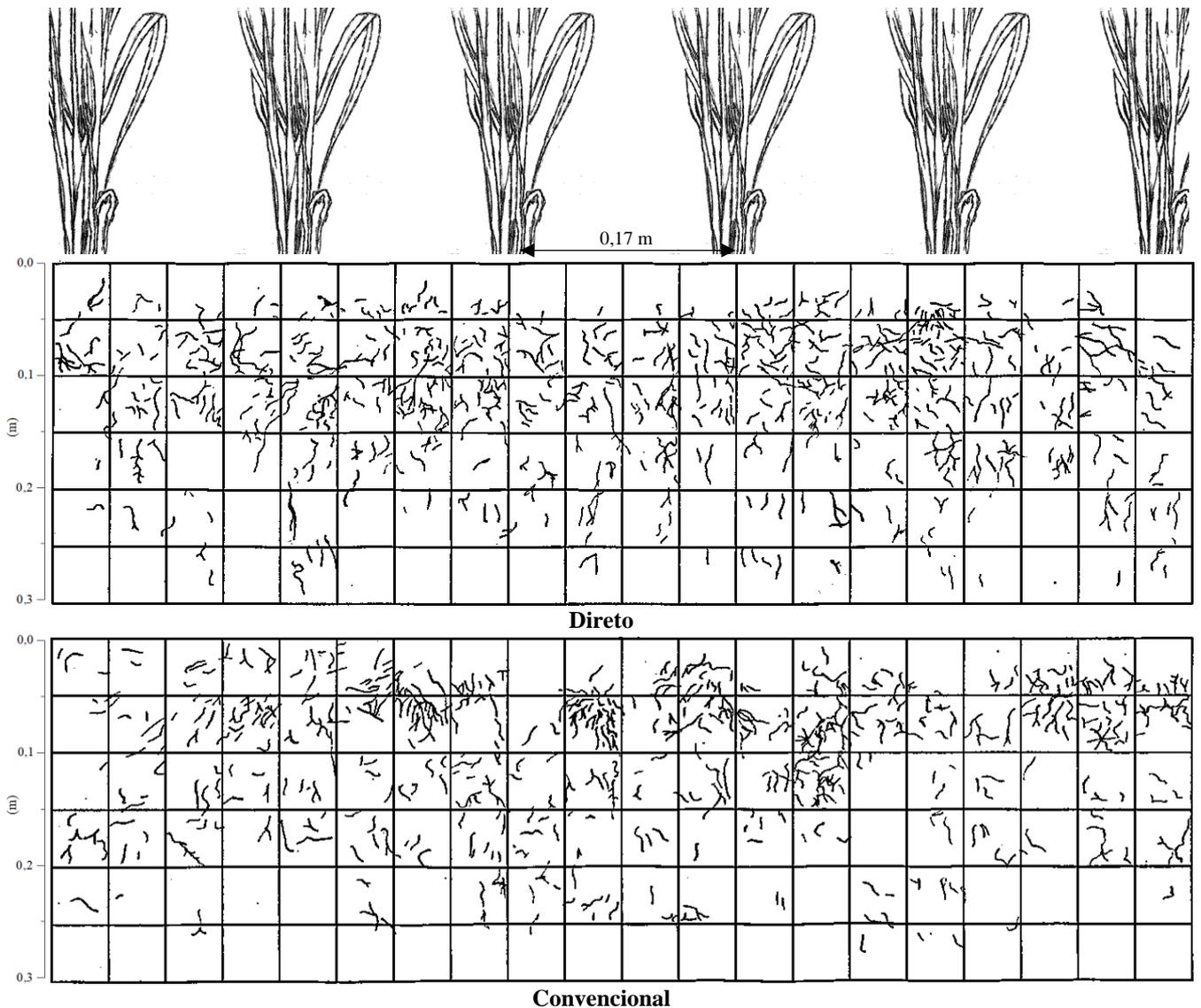
<sup>1</sup> Não houve interações significativa entre os fatores estudados e os tratamentos são apresentados separadamente por fator. <sup>2</sup>Médias seguidas pela mesma letra nas linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p< 0,05). <sup>ns</sup> Não significativo em nível de 5% de probabilidade.

No experimento I, o manejo de solo Camalhão apresentou menor Ds e maior Pt, em comparação ao manejo do solo Convencional, na camada de 0,1 - 0,2 m de profundidade.

Entretanto, nas demais camadas, não houve alteração nessa variável, assim como, para a Ma e

Mi, os resultados foram similares para todas as camadas. No experimento II, a Ma foi maior no manejo do solo Direto em relação aos tratamentos Convencional e Camalhão, na camada de 0,1 - 0,2 m. As variáveis Ds, Pt e Mi não diferiram em nenhuma das camadas.

Na Figura 3, a distribuição do sistema radicular do arroz indica raízes mais espessas próximos à superfície do solo e concentradas nesta camada no tratamento Convencional, irrigado por aspersão, quando comparadas ao Direto. Além disso, nesse método de irrigação, pode-se visualizar uma maior profundidade de raízes no tratamento Direto que no Convencional.



**Figura 3** - Distribuição do sistema radicular da cultura do arroz nos manejos do solo em preparo convencional (Convencional) e semeadura direta (Direto) irrigados por aspersão, no experimento II, em estágio fenológico R6. Itaqui, RS.

### *Variáveis agronômicas da cultura do arroz*

Não foi observada interação entre os fatores para a altura de plantas nos dois experimentos e para rendimento de grãos inteiros e massa de mil sementes no experimento I (Tabela 3). A altura de plantas foi 11 cm maior na irrigação por inundação, em ambos os experimentos em relação a irrigação por aspersão e faixas.

Para a massa de mil grãos, observou-se diferença somente para os tratamentos irrigados por aspersão em comparação a irrigação por faixa e inundação, apresentando massa 0,6 gramas menor. Na irrigação por aspersão, no experimento II, o rendimento de grãos inteiros foi maior nos tratamentos Direto em relação ao Camalhão e semelhante a irrigação por faixa, onde, além do Camalhão, o tratamento Convencional resultou em menor rendimento de grãos inteiros. No manejo do solo Camalhão, os tratamentos com irrigação por aspersão e faixa resultaram em menor rendimento de grãos inteiros, enquanto que, nos manejos Convencional e Direto os tratamentos de irrigação foram similares.

Na variável produtividade de grãos houve interações entre os fatores nos dois experimentos. No experimento I, a irrigação por aspersão, no manejo Camalhão, resultou em produtividade 1,56 Mg ha<sup>-1</sup> menor que a média dos tratamentos Convencional e Direto (17%) e, na irrigação por faixas, 2,78 e 1,72 Mg ha<sup>-1</sup> menores nos tratamentos Camalhão e Convencional, respectivamente, em relação ao Direto (31 e 19%). Na irrigação por inundação, a produtividade no preparo Convencional foi menor que no Direto (12%). No experimento II, a produtividade de grãos no manejo convencional foi menor em 1,56 Mg ha<sup>-1</sup> (18%) em relação ao Direto irrigado por aspersão e, na irrigação por faixas, 2,92 e 1,81 Mg ha<sup>-1</sup> menores nos tratamentos Camalhão e Convencional, respectivamente, em relação ao Direto (41 e 22%). Nos dois experimentos, a produtividade de grãos de arroz no manejo de solo Camalhão foi similar na irrigação por inundação e menor quando irrigado por faixas.

Nos dois experimentos houve interação entre os fatores para massa seca total da parte

aérea. Na irrigação por inundação, a massa seca não apresentou diferença nos manejos do solo. O tratamento Camalhão irrigado por inundação, em relação a irrigação por aspersão e faixas, teve maior massa seca da parte aérea. A massa seca também foi maior na irrigação por inundação, em relação a irrigação por faixas no manejo Convencional do solo no experimento I, e irrigação por aspersão e faixa, no Convencional e Direto no experimento II. O índice de colheita teve interação somente no experimento I e pode-se observar menor valor na irrigação por inundação, no manejo de solo Convencional e Camalhão (0,34 e 0,31), em comparação ao Direto (0,45) e irrigação por aspersão e faixa (0,36 e 0,41), no tratamento Camalhão. No experimento II, a irrigação por inundação proporcionou menor índice de colheita (0,35), em relação a irrigação por faixas e aspersão (0,41 e 0,42), em todos manejos do solo.

A produtividade da água de irrigação apresentou interação entre os fatores. Em ambos os experimentos, a irrigação por aspersão resultou em maior produtividade da água de irrigação ( $3,82 \text{ kg m}^{-3}$ ), em relação a irrigação por faixas ( $1,64 \text{ kg m}^{-3}$ ) e inundação ( $1,21 \text{ kg m}^{-3}$ ), em todos os manejos do solo. A irrigação por faixas nos manejos Camalhão e Direto, no experimento I e II, respectivamente, resultaram em maior produtividade de água de irrigação. A produtividade da água de irrigação foi maior por faixas em relação a inundação em todos os manejos do solo no experimento I e no Direto no experimento II.

**Tabela 3** - Altura de plantas, rendimento de grãos inteiros, massa de mil grãos de arroz, produtividade de grãos, massa seca total, índice de colheita da parte aérea, produtividade da água da irrigação de arroz em dois experimentos com diferentes métodos de irrigação e manejos do solo. Itaquí, RS.<sup>1</sup>

Métodos de irrigação	----- Experimento I -----				----- Experimento II -----			
	Convencional	Direto	Camalhão	Manejos do solo Média	Convencional	Direto	Camalhão	Média
----- Altura de plantas (cm) <sup>2</sup> -----								
Aspersão	-	-	-	66,84 $\beta$	-	-	-	57,42 $\beta$
Faixa	-	-	-	62,00 $\beta$	-	-	-	55,86 $\beta$
Inundado	-	-	-	73,80 $\alpha$	-	-	-	69,04 $\alpha$
Média	68,50 <sup>ns</sup>	68,37	65,78	67,55	60,20 <sup>ns</sup>	61,51	60,61	60,77
CV(%)		4,9				7,6		
----- Rendimento de grãos inteiros (%) -----								
Aspersão	-	-	-	65,07 <sup>ns</sup>	65,40 AB <sup>3</sup>	66,70 A	63,67 bB	65,26
Faixa	-	-	-	64,82	63,80 A	64,33 A	61,13 bB	63,09
Inundado	-	-	-	66,32	65,17	65,93	66,57 a	65,89
Média	65,65 <sup>ns</sup>	65,42	65,13	65,40	64,79	65,65	63,79	64,75
CV(%)		1,4				2,0		
----- Massa de mil grãos (gramas) -----								
Aspersão	-	-	-	23,75 $\beta$	24,24 bAB	24,78 bA	23,93 aB	24,32
Faixa	-	-	-	24,23 $\alpha\beta$	25,45 aA	25,19 abA	24,21 bB	24,95
Inundado	-	-	-	24,60 $\alpha$	26,28 a	25,94 a	26,44 c	26,22
Média	24,30 <sup>ns</sup>	24,31	23,98	24,20	25,32	25,30	24,86	25,16
CV(%)		1,6				1,8		
----- Produtividade de grãos (Mg ha <sup>-1</sup> ) -----								
Aspersão	10,41 A	11,17 A	9,23 bB	10,27	8,48 bB	10,04 A	8,91 bAB	9,13
Faixa	10,59 B	11,65 A	8,87 bC	10,37	8,24 bB	10,05 A	7,13 cC	8,47
Inundado	10,11 B	11,37 A	10,76 aAB	10,78	10,75 a	10,74	10,72 a	10,74
Média	10,37	11,43	9,62	10,47	9,16	10,22	8,92	9,43
CV(%)		5,87				6,94		
----- Massa seca total da parte aérea (Mg ha <sup>-1</sup> ) -----								
Aspersão	27,36 abA	26,01 A	23,35 bB	25,57	21,36 b	22,93 b	21,20 b	21,83
Faixa	24,82 bB	27,78 A	24,59 bB	25,73	22,22 bA	23,96 bA	16,60 cB	20,93
Inundado	29,51 a	28,85	30,83 a	29,73	30,53 a	30,25 a	31,44 a	30,74
Média	27,23	27,54	26,26	27,06	24,70	25,71	23,08	24,50
CV(%)		5,60				8,29		
----- Índice de colheita da parte aérea -----								
Aspersão	0,37 abB	0,44 A	0,41 aAB	0,41	-	-	-	0,42 $\alpha$
Faixa	0,42 a	0,42	0,36 ab	0,40	-	-	-	0,41 $\alpha$
Inundado	0,34 bB	0,45 A	0,31 bB	0,37	-	-	-	0,35 $\beta$
Média	0,38	0,44	0,36	0,39	0,40 <sup>ns</sup>	0,37	0,40	0,38
CV(%)		7,39				7,93		
----- Produtividade da água de irrigação (kg m <sup>-3</sup> ) -----								
Aspersão	5,42 aB	5,82 aA	4,81 aC	5,35	2,14 aB	2,53 aA	2,24 aB	2,30
Faixa	2,21 bA	2,42 bA	1,82 bB	2,15	1,10 bB	1,34 bA	0,95 bB	1,13
Inundado	1,19 c	1,34 c	1,27 c	1,27	1,15 b	1,15 c	1,14 b	1,15
Média	2,94	3,19	2,63	2,92	1,46	1,67	1,44	1,53
CV(%)		5,21				6,09		

<sup>1</sup> Experimento I conduzido na safra agrícola 2016/17 e experimento II na safra 2017/18. <sup>2</sup> Os resultados das variáveis agrônômicas que não apresentaram interação significativa são apresentados na linha média para os tratamentos do fator manejos de solo e na coluna média para os métodos de irrigação, quando significativas as diferenças são classificadas pelas letras gregas. <sup>3</sup> Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e maiúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). <sup>ns</sup> Não significativo em nível de 5% de probabilidade.

## Discussão

O incremento no uso de água necessário no experimento II em todos os métodos de irrigação, embora em volume similar, é justificado pela má distribuição das chuvas nessa safra (2017/18), que triplicou o número de eventos de irrigação. O segundo ano de experimentação se caracterizou por três períodos de ausência de chuvas significativas, sendo estes na primeira quinzena de dezembro e janeiro e o mês de fevereiro de 2018. Além disso, esses dois últimos períodos coincidiram com o maior índice de área foliar, em virtude do estágio reprodutivo da cultura. Nos tratamentos de irrigação por aspersão e faixas, a diferença foi maior que 2000 m<sup>3</sup> de uso de água, enquanto que nos tratamentos de irrigação por inundação, o aumento foi inferior a 1000 m<sup>3</sup>.

O uso médio de água na irrigação por aspersão foi de 1/3 da água utilizada por inundação, resultados próximos aos encontrados por Sánchez-Llerena et al. (2016), que observaram redução de 75% com a utilização desse método. De acordo com Pinto et al. (2016) este resultado está relacionado ao maior aproveitamento das chuvas na irrigação por aspersão na cultura do arroz em terras baixas. Dessa forma, a quantidade de água necessária dependerá muito das condições meteorológicas durante o desenvolvimento, da densidade e época de semeadura, cobertura do solo e ciclo da cultivar. Mesmo que esses eventos influenciem o uso de água na irrigação por inundação, terá menor influência, pois apresenta menor eficiência de irrigação (Bischetti et al., 2013).

O maior uso de água nos tratamentos com irrigação por superfície está relacionada às perdas em condutos abertos e, dentro da área, por infiltração e evaporação da água (Nie et al., 2012). Além disso, o escoamento ao final das áreas, para a manutenção de lâmina de água sobre o solo, permite restrito aproveitamento das chuvas, principalmente em áreas não sistematizadas.

Estudos determinando a  $ET_c$  apontam valores entre 487 a 800 mm (Bischetti et al., 2013; Moratiel and Martínez-Cob, 2013; Mote et al., 2018). Diante desse cenário, e da média de água utilizada nos dois experimentos, possivelmente a  $ET_c$  tenha sido na ordem de 48 a 78, 36 a 60 e 30 a 49%, em relação ao uso total de água, na irrigação por aspersão, faixa e inundação, respectivamente. No método de irrigação por inundação esse aproveitamento pode ser de somente 14 - 36% (Mote et al., 2018), e as perdas estão relacionadas a percolação e ao escoamento superficial. Segundo Bischetti et al. (2013) na  $ET_c$  da cultura do arroz, somente é utilizado 80% para transpiração quando irrigado por inundação, enquanto na irrigação sem formar lâmina de água sobre o solo a transpiração é de 88%, correspondendo a evaporação de 20 e 12% em cada método de irrigação.

A reduzida influência dos manejos do solo sobre as propriedades físicas do solo, possivelmente está relacionada ao momento da coleta das amostras (após a colheita), onde o desenvolvimento vigoroso do sistema radicular até 20 cm de profundidade (Kato and Katsura, 2014), tenha minimizado possíveis diferenças na  $D_s$  e  $Ma$ . Sánchez-Llerena et al. (2016) afirmam que, melhorias na qualidade física e química do solo em plantio direto, são identificadas a partir do terceiro ano de cultivo. Os diferentes métodos de irrigação, desde que bem dimensionados, não devem causar prejuízos à qualidade do solo. Dessa forma, os resultados indicam que as irrigações foram conduzidas adequadamente. A escarificação para a implantação dos experimentos somada ao cultivo de aveia antes do arroz, favoreceu a redução da  $D_s$  e aumento da  $P_t$ , em relação às características naturais do solo da área.

O aumento da espessura das raízes próximas à superfície do solo no manejo Convencional irrigado por aspersão, está relacionado a menor  $Ma$  na camada de 0,1 - 0,2 m nesse manejo que é indicativo de maior adensamento do solo (Sartori et al., 2016). Embora em condições aeróbicas de cultivo (irrigação por aspersão) as raízes de arroz tendem a se aprofundar e apresentar menor concentração próximo da superfície (Kato and Katsura, 2014),

pois a compactação do solo pode limitar o aprofundamento de raízes. Esses efeitos dificilmente seriam encontrados em condições anaeróbicas como na irrigação por inundação, onde as raízes são concentradas próximo à superfície e em maior volume que em condição aeróbica (Kato and Katsura, 2014).

De acordo com Sartori et al. (2016), manejos de solo que favoreçam a Ma resultam em maior taxa de infiltração de água no solo. Essa afirmação pode explicar parcialmente a maior  $\theta$  no tratamento Direto na maioria das avaliações em relação ao Convencional, ou seja, permitiu maior infiltração da água de irrigação e, conseqüentemente, maior aproveitamento da água. O menor  $\theta$  no tratamento Camalhão, principalmente nos tratamentos de irrigação por faixas após 5 dias sem chuvas, mesmo com irrigação, ocorreu em virtude da irrigação ser concentrada nos sulcos, distanciados em um metro. Os sensores alocados entre o sulco e o topo do camalhão, distantes a 0,25 m do sulco, foram pouco sensíveis, ou seja, no topo do camalhão a redução do  $\theta$  parece ter sido ainda mais evidente.

A baixa condutividade hidráulica dos solos de terras baixas (Gubiani et al., 2018), resulta em menor condutividade hidráulica de fluxo lateral. Embora o manejo com camalhões apresente bom desempenho quanto a drenagem, deve-se utilizar prioritariamente para irrigação em culturas de maior espaçamento entre linhas de semeadura, como a soja e milho (Giacomeli et al., 2017; Sartori et al., 2015), ou reduzir o espaçamento dos sulcos. Outra alternativa para viabilizar a utilização desse sistema na cultura do arroz, é a utilização em menor desnível em relação ao terreno ou em áreas sistematizadas.

A resposta das plantas em relação aos diferentes métodos pode ser observado na maior altura de plantas na irrigação por inundação, proveniente da alongação dos entrenós dos colmos do arroz, sinalizado pela produção de etileno pelas raízes após a formação da lâmina de água sobre o solo (Kende et al., 1998). Dessa forma, a menor estatura das plantas de arroz irrigadas por aspersão e faixas não está relacionada à disponibilidade de água, mas possivelmente a

ausência do estímulo para alongação. A menor estatura pode reduzir os riscos de tombamento da cultura, e favorecer a adoção ou mudança de práticas de manejo, como a elevação das doses de nitrogênio em cobertura.

A melhor distribuição das chuvas durante o período de condução do experimento I em relação ao II favoreceram resultados diferentes para a porcentagem de rendimento de grãos inteiros e massa de mil grãos. Essa redução no cultivo em camalhão está relacionada ao menor  $\theta$  na irrigação por aspersão e faixas. Os resultados apresentados por Meus et al. (2018) corroboram com os encontrados no presente estudo, afirmando que rendimentos de grãos inteiros são similares entre a irrigação por inundação e aspersão para a cultura do arroz, desde que mantidos níveis elevados de  $\theta$ .

A produtividade de grãos e massa seca de arroz irrigados por aspersão e faixa são mais sensíveis aos manejos do solo que na irrigação por inundação. Como observado no  $\theta$ , apresentam maior dificuldade de manter níveis elevados, mesmo em irrigações frequentes com a ausência de chuva, nos tratamentos Camalhão ou Convencional. Como mencionado anteriormente, o cultivo sobre camalhão (espaçados a um metro) apresenta dificuldade para irrigação por faixas visando a manutenção do  $\theta$  próximo a  $\theta_{CC}$ , seguido da irrigação por aspersão. Os resultados de Beutler et al. (2012) também indicam que arroz irrigado por inundação em preparo convencional ou plantio direto tem a mesma produtividade e massa seca da parte aérea.

A produtividade de grãos de  $10,61 \text{ Mg ha}^{-1}$  considerando os dois experimentos nos tratamentos de irrigação por aspersão foi menor em  $0,44 \text{ Mg ha}^{-1}$  do que nos tratamentos irrigados por inundação em semeadura direta e maior que a média brasileira de arroz irrigado na safra 2017/18, que foi de  $6,12 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Conab, 2019). Alguns estudos já evidenciam produção nesse método de irrigação próximo a  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$ , com menor uso de água em  $\theta$  até uma tensão de  $-30 \text{ kPa}$  (Kato et al., 2009; Kato and Katsura, 2014; Pinto et al., 2016). Os autores

Sánchez-Llerena et al. (2016) também observaram que a produtividade de grãos só é atingida com manejo de solo mais conservacionista como o plantio direto, favorecendo melhorias nas propriedades físicas e químicas do solo a médio e longo prazo.

A menor diferença no índice de colheita encontrada no experimento I é explicada pela redução na massa seca total da parte aérea, em comparação ao experimento II. O menor índice de colheita na irrigação por inundação, em relação a aspersão de 0,42 e 0,35, respectivamente, é indicativo da eficiência da planta no uso da água. Segundo os autores Bischetti et al. (2013), o arroz irrigado por inundação tem maior índice de área foliar do que quando irrigado sem lâmina contínua e, nesse estudo, a evapotranspiração foi 123 mm maior.

A maior eficiência no uso da água está relacionada a maior produtividade da água de irrigação, que é maior em métodos que mantêm a produtividade de grãos com menor uso de água de irrigação. Diante disso, a irrigação por aspersão propiciou produção média de 3,82 kg m<sup>-3</sup>, em relação a irrigação por faixas e inundação (1,64 e 1,21 kg m<sup>-3</sup>), respectivamente. Em anos de maior volume de chuva, a produtividade da água nesse método é ainda maior (5,35 kg m<sup>-3</sup> no experimento I e 2,30 kg m<sup>-3</sup> no experimento II), diferentemente da irrigação por inundação, no qual a variação foi de apenas 0,15 kg m<sup>-3</sup>. Segundo Hassen et al., 2017, a melhor alternativa para elevação da produtividade da água no arroz em terras baixas é a utilização de métodos alternativos de irrigação.

A irrigação por aspersão pode ser a melhor estratégia para viabilizar sistemas de plantio direto, com adição de carbono ao solo sem risco na elevação na emissão de gases de efeito estufa (Fangueiro et al., 2017), redução no uso de água utilizada nas terras baixas (Sánchez-Llerena et al., 2016), e melhor eficiência no uso da água em condição anaeróbica (Bischetti et al., 2013). Além disso, ao realizar a irrigação por aspersão com pivôs centrais, facilitasse a automação da irrigação, reduzindo a mão de obra, que hoje é um dos maiores custos das propriedades orizícolas (Knaak et al., 2018).

O manejo de solo mais promissor em todos os métodos de irrigação estudados para rotação de culturas em terras baixas é em semeadura direta. Quando a irrigação por inundação for utilizada, o manejo do solo não influencia consideravelmente a produtividade de arroz. Como alternativa para a manutenção da irrigação por inundação com rotação de culturas em plantio direto, em alguns casos, pode ser utilizada a semeadura sobre camalhão em áreas sistematizadas, sem a necessidade de preparo do solo para uniformizar a área e manutenção dos níveis de produtividade de grãos de arroz quando for a cultura sucessora.

## **Conclusões**

O método de irrigação por aspersão pode ser utilizado como alternativa a irrigação por inundação na cultura do arroz em manejo do solo em semeadura direta, desde que mantida a qualidade física do solo, com produtividade de grãos próximos a  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$ , com menor uso de água, maior índice de colheita e maior produtividade da água da irrigação.

Os manejos do solo em preparo convencional, semeadura direta e semeadura direta em camalhão quando irrigados por inundação não influenciam na produção de massa seca total da parte aérea, produtividade de grãos e a produtividade da água da irrigação.

Irrigação por faixas (nos sulcos), em turnos de dois dias, é insuficiente para manter o conteúdo de água no solo próximos a capacidade de campo, em cultivo de arroz sobre camalhões de um metro e altura de 15 cm no sentido do maior desnível, em períodos maiores que 5 dias sem chuvas.

## Referências bibliográficas

- Allen, R.G., Luis, S.P., RAES, D., Smith, M., 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Irrig. Drain. 300, 300.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., de Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorol. Zeitschrift 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Beutler, A.N., Munareto, J.D., Ramão, C.J., Galon, L., Dias, N.P., Pozzebon, B.C., Rodrigues, L.A.T., Munareto, G.S., Giacomeli, R., Ramos, P.V., 2012. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado em diferentes sistemas de manejo. Rev. Bras. Ciência do Solo 36, 1601–1607. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500024>
- Bischetti, G.B., Facchi, A., Gandolfi, C., Chiaradia, E.A., Gharsallah, O., 2013. Monitoring and Modelling Evapotranspiration in Flooded and Aerobic Rice Fields. Procedia Environ. Sci. 19, 794–803. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.088>
- Christiansen, J.E., 1942. Irrigation by sprinkling (Bulletin, 670). University of California, Berkeley.
- Conab, 2019. Acompanhamento da Safra Brasileira - Grãos. Obs. Agrícola 1, 1–60.
- Counce, P.A., Keisling, T.C., Mitchell, A.J., 2000. A Uniform, Objective, and Adaptive System for Expressing Rice Development. Crop Sci. 40, 436. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402436x>
- Denardin, L.G. de O., Carmona, F. de C., Veloso, M.G., Martins, A.P., Freitas, T.F.S. d., Carlos, F.S., Marcolin, É., Camargo, F.A. de O., Anghinoni, I., 2019. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. Soil Tillage Res. 186, 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.006>
- Fangueiro, D., Becerra, D., Albarrán, Á., Peña, D., Sanchez-Llerena, J., Rato-Nunes, J.M.,

- López-Piñeiro, A., 2017. Effect of tillage and water management on GHG emissions from Mediterranean rice growing ecosystems. *Atmos. Environ.* 150, 303–312.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.020>
- Ferreira, E.B., Cavalcanti, P.P., Nogueira, D.A., 2014. ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. *Appl. Math.* 05, 2952–2958.  
<https://doi.org/10.4236/am.2014.519280>
- Fin, S.S., Marchesan, E., Gubiani, P.I., Farenzena, J.A.P., Murari, M.S., Coelho, L.L., Cargnelutti Filho, A., Aramburu, B.B., 2018. Duration of the effects of scarification and raised bed associated with vegetation cover on soybean yield on an Alfisol. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 53, 1230–1238. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018001100005>
- Giacomeli, R., Marchesan, E., Meneghetti, G., Sartori, S., Donato, G., 2016. Escarificação do solo e sulcadores em semeadora para cultivo de milho em Planossolos. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 51, 261–270. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000300008>
- Giacomeli, R., Marchesan, E., Oliveira, M.L. De, Martin, T.N., Teló, G.M., Donato, G., Silva, M.F. da, 2017. Physical Properties and Crop Management for Corn in an Albaqualf. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 41, 1–14. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160237>
- Gubiani, P.I., Müller, E.A., Somavilla, A., Zwirtes, A.L., Mulazzani, R.P., Marchesan, E., 2018. Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 42, 1–14.  
<https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170282>
- Hassen, M. Ben, Monaco, F., Facchi, A., Romani, M., Valè, G., Sali, G., 2017. Economic performance of traditional and modern rice varieties under different water management systems. *Sustain.* 9, 15–20. <https://doi.org/10.3390/su9030347>
- Jiang, Y., Carrijo, D., Huang, S., Chen, J., Balaine, N., Zhang, W., van Groenigen, K.J., Linquist, B., 2019. Water management to mitigate the global warming potential of rice

- systems: A global meta-analysis. *F. Crop. Res.* 234, 47–54.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.010>
- Kato, Y., Katsura, K., 2014. Rice Adaptation to Aerobic Soils: Physiological Considerations and Implications for Agronomy. *Plant Prod. Sci.* 17, 1–12.  
<https://doi.org/10.1626/pps.17.1>
- Kato, Y., Okami, M., Katsura, K., 2009. Yield potential and water use efficiency of aerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. *F. Crop. Res.* 113, 328–334.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.010>
- Kende, H., van der Knaap, E., Cho, H.-T., 1998. Deepwater Rice: A Model Plant to Study Stem Elongation. *Plant Physiol.* 118, 1105–1110. <https://doi.org/10.1104/pp.118.4.1105>
- Knaak, N., Miranda, F.F., 2018. Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil, XXXII. ed. SOSBAI - Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, Farroupilha.
- Meus, L.D., Muttoni, M., Bartz, A.C., Kaminski, T.A., Alberto, C.M., 2018. Classification of rice grains of lowland cultivars grown under flood irrigation and sprinkler irrigation. *Eng. Agrícola* 38, 599–605. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n4p599-605/2018>
- Miura, K.A., Iribarrem, P.C., Chaves, R.D., Cunha, H.N. da, Pranke, L.V., 2015. Discriminação e Delimitação das Terras Baixas no Estado do Rio Grande do Sul: Primeira Aproximação, Comunicado 313 Técnico. Embrapa, Pelotas.
- Moratiel, R., Martínez-Cob, A., 2013. Evapotranspiration and crop coefficients of rice (*Oryza sativa* L.) under sprinkler irrigation in a semiarid climate determined by the surface renewal method. *Irrig. Sci.* 31, 411–422. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0319-8>
- Mote, K., Rao, V.P., Kumar, K.A., Ramulu, V., 2018. Estimation of crop evapotranspiration and crop coefficients of rice (*Oryza sativa* L.) under low land condition. *J.*

- Agrometeorol. 20, 117–121.
- Nie, L., Peng, S., Chen, M., Shah, F., Huang, J., Cui, K., Xiang, J., 2012. Aerobic rice for water-saving agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 411–418.  
<https://doi.org/10.1007/s13593-011-0055-8>
- Pinto, M.A.B., Parfitt, J.M.B., Timm, L.C., Faria, L.C., Scivittaro, W.B., 2016. Produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas em função da disponibilidade de água e de atributos do solo. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 51, 1584–1593.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900058>
- R Core Team, 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Rao, A.N., Johnson, D.E., Sivaprasad, B., Ladha, J.K., Mortimer, A.M., 2007. Weed Management in Direct-Seeded Rice. *Adv. Agron.* 93, 153–255.  
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)93004-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)93004-1)
- Sánchez-Llerena, J., López-Piñeiro, A., Albarrán, Á., Peña, D., Becerra, D., Rato-Nunes, J.M., 2016. Short and long-term effects of different irrigation and tillage systems on soil properties and rice productivity under Mediterranean conditions. *Eur. J. Agron.* 77, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.04.005>
- Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A. dos, Lumberras, J.F. de, Coelho, M.R., Almeida, J.A. de, Araujo Filho, J.C. de, Oliveira, J.B. De, Cunha, T.J., 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 5<sup>o</sup> edição. ed. Embrapa, Brasília.  
<https://doi.org/ISBN 978-85-7035-198-2>
- Sartori, G.M.S., Marchesan, E., David, R. De, Carlesso, R., Petry, M.T., Aires, N.P., Giacomeli, R., Aramburu, B.B., Silva, A.L. da, 2016. Soybean Tillage Systems and Physical Changes in Surface Layers of Two Albaqualf Soils. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 40, 1–15. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160019>
- Sartori, G.M.S., Marchesan, E., David, R. De, Carlesso, R., Petry, M.T., Donato, G.,

Cargnelutti Filho, A., Silva, M.F. da, 2015. Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planossolos. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 50, 1139–1149. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001200003>

Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G.T., 2017. *Manual de Métodos de Análise de Solo*, 3ª edição. ed. Brasília.

Teló, G.M., Marchesan, E., Zanella, R., Limberger de Oliveira, M., Coelho, L.L., Martins, M.L., 2015. Residues of Fungicides and Insecticides in Rice Field. *Agron. J.* 107, 851. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0475>

## 5 DISCUSSÃO

A rotação de culturas com o arroz, bem como, a utilização de métodos de irrigação alternativos à inundação, torna-se necessário nas terras baixas do Rio Grande do Sul, tanto pela dificuldade no controle de plantas daninhas ocorrentes na cultura do arroz, como pelos elevados custos da irrigação, uso de água e emissão de gases de efeito estufa, característicos desse método de irrigação. Além disso, o manejo do solo é fundamental para o sucesso de rotação de culturas e da utilização de outros métodos de irrigação, como a aspersão, na cultura do arroz.

Os resultados encontrados nesse trabalho elucidam que manejos do solo mais conservacionistas, como a semeadura direta com plantas de cobertura no inverno, proporcionam melhor estruturação do solo, ausência de camadas adensadas próximas à superfície e menores períodos de déficit e excesso hídrico para a soja. Esse manejo também é benéfico para a cultura do arroz, quando irrigado por aspersão, podendo ser uma ótima estratégia aos produtores da região da fronteira oeste que estão irrigando o arroz com pivô central. Essa estratégia é válida quando realizada, conforme for necessário, uma descompactação prévia do solo, como a escarificação utilizada nesse estudo anterior ao início dos experimentos.

Embora de menor custo inicial, pela utilização da estrutura presente nas propriedades orizícolas, a irrigação por faixas na cultura da soja pode trazer riscos de baixa aeração no solo por tempo prolongado se os eventos de irrigação culminarem com chuvas em dias próximos. O cultivo de soja sobre camalhões evita esse risco após a irrigação, assim como pelo excesso de chuvas, e facilita a irrigação em áreas não sistematizadas, além da melhoria das propriedades físicas do solo, principalmente quando em semeadura direta. Quando utilizada a irrigação por faixas, sem a utilização de camalhão, os períodos de menor aeração no solo tendem a serem prolongados para a cultura da soja.

Melhorias no manejo de irrigação dos produtores da região da fronteira oeste podem realizadas, visto que, hoje muitos irrigam diariamente o arroz quando cultivado sob pivôs, e nos experimentos a irrigação foi realizada a cada dois dias, e com alta produtividade, esperasse que pelo menos em alguns casos possa ser realizada também nas propriedades. Porém, para que isso seja possível, um olhar mais criterioso ao solo deve ser dado, afim de favorecer uma maior infiltração de água e maior aprofundamento do sistema radicular. A afirmação anterior é fundamentada nos resultados obtidos, em que houve redução de produção de grãos de arroz e de soja quando cultivado em solo preparado convencionalmente, próximo da semeadura, irrigado por aspersão.

O arroz quando cultivado sobre camalhões e irrigado nos sulcos a cada um metro, apresenta perdas significativas de produtividade. Dessa forma, a utilização desse sistema não é recomendada. Nesse sentido, sugere-se que a combinação entre diferentes espaçamentos e declividades dos sulcos ou a utilização desse sistema de camalhões e irrigação em áreas sistematizadas ainda sejam investigadas.

Quando utilizada a irrigação por inundação, constata-se que os manejos do solo não influenciam a produtividade da cultura do arroz. Dessa forma, deve-se utilizar as práticas de manejo do solo menos onerosas e de menor impacto a qualidade do solo e ao meio ambiente de uma forma geral, como o cultivo mínimo e o plantio direto.

De forma geral, a rotação de culturas e a utilização de métodos de irrigação alternativos é possível em terras baixas cultivadas com arroz, porém, com dificuldades para a manutenção da manutenção da qualidade física do solo e com a utilização da irrigação por aspersão com pivô central. A adoção desse sistema de irrigação facilitará a rotação de culturas e o plantio direto, no entanto, a baixa taxa de infiltração de água inerente dos solos de terras baixas, pode ser limitante para a utilização de irrigação por aspersão nesses solos. Sendo assim, para o sucesso da utilização da irrigação por aspersão em terras baixas, técnicas de manejo do solo deverão ser empregadas a fim de melhorar sua qualidade física e proporcionar uma maior taxa de infiltração de água para que não ocorram estresses às plantas de arroz e de soja irrigadas por esse método.

## 6 CONCLUSÕES

O manejo do solo com preparo convencional aumenta a resistência do solo à penetração mecânica próximo a 0,1 m de profundidade em solos de terras baixas, podendo restringir o desenvolvimento do sistema radicular, aumentando o risco de estresse por déficit ou excesso hídrico para a cultura da soja.

A irrigação na cultura da soja em áreas de terras baixas aumenta em 36% a produtividade de grãos, em anos de distribuição irregular de chuva.

O método de irrigação por aspersão apresenta maior produtividade da água de irrigação (90 %) comparada a faixas, para a cultura da soja, contribuindo para aumento da produtividade de forma sustentável.

O método de irrigação por aspersão pode ser utilizado como alternativa a irrigação por inundação na cultura do arroz em manejo do solo em semeadura direta, desde que mantida a qualidade física do solo, com produtividade de grãos próximos a  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$ , com menor uso de água, maior índice de colheita e maior produtividade da água da irrigação.

Os manejos do solo em preparo convencional, semeadura direta e semeadura direta em camalhão quando irrigados por inundação não influenciam na produção de massa seca total da parte aérea, produtividade de grãos e a produtividade da água da irrigação.

Irrigação por faixas (nos sulcos), em turnos de dois dias, é insuficiente para manter o conteúdo de água no solo próximos a capacidade de campo, em cultivo de arroz sobre camalhões de um metro e altura de 15 cm no sentido do maior desnível, em períodos maiores que 5 dias sem chuvas.

## REFERÊNCIAS

- ANDRES, A. et al. Rotação de culturas e pousio do solo na redução do banco de sementes de arroz vermelho em solo de várzea. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.7, n.2, p.85-88, 2001.
- ARMSTRONG, W., et al. Mechanisms of flood tolerance in plants. **Acta Botanica Neerlandica**. v.43, n.1, p.307-358, 1994.
- BAMBERG, A. L. et al. Densidade de um planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1079–1086, 2009.
- BENGOUGH, A. G. et al. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 2, p. 437–447, 2006.
- BERNARDO, S. et al. **Manual de Irrigação**. 8o ed. Viçosa: Editora da UFV, 2006.
- BEUTLER A. N., et al. Manejo do solo, palha residual e produtividade de arroz irrigado por inundação. **Revista Semina: Ciências Agrárias**. V. 35, p. 1153-62, 2014.
- BEUTLER, A. N. et al. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1601–1607, 2012.
- BISCHETTI, G. B. et al. Monitoring and Modelling Evapotranspiration in Flooded and Aerobic Rice Fields. **Procedia Environmental Sciences**, v. 19, p. 794–803, 2013.
- BONETTI, J. DE A. et al. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 186, n. September 2018, p. 280–291, 2019.
- CATUCHI, T.A. et al. Tolerance to water deficiency between two soybean cultivars: transgenic versus conventional. **Ciência Rural**. v. 31, n. 3, p. 373-378, 2011.
- COLLARES, G. L. et al. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura - pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**. v. 41, n. 2, p. 246-250, 2011.
- Companhia Nacional de abastecimento – Conab. **Perspectiva de safra 2015/16**. [internet]. Brasília, DF: 2016 [acesso em 10 mar 2016]. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&>.

- CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira - Grãos**. Observatório Agrícola, v. 1, n. 4, p. 1–60, 2019.
- COSTA A. et al. Pedotransfer functions to estimate retention and availability of water in soils of the state of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.37, p. 889-910, 2013.
- DENARDIN, L. G. DE O. et al. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. **Soil and Tillage Research**, v. 186, n. October 2018, p. 64–69, 2019.
- DENNIS, E.S. et al. Molecular strategies for improving waterlogging tolerance in plants. **Journal of Experimental Botany**. v. 51, n. 342, p. 89-97, 2000.
- FAGAN, E. B. et al. Fisiologia da fixação biológica do nitrogênio em soja – Revisão. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**. v.14, n. 1, p. 89-106. 2007.
- FAHONG, W. et al. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China. **Field Crops Research**, v. 87, n. 2, p. 35-42, 2004.
- FANGUEIRO, D. et al. Effect of tillage and water management on GHG emissions from Mediterranean rice growing ecosystems. **Atmospheric Environment**, v. 150, p. 303–312, 2017.
- FANTE, C.A. et al. Respostas fisiológicas em cultivares de soja submetidas ao alagamento em diferentes estádios. **Bragantia**, v. 69, n. 2, p. 253-261, 2010.
- FIN, S. S. et al. Duration of the effects of scarification and raised bed associated with vegetation cover on soybean yield on an Alfisol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1230–1238, 2018.
- FIORIN, T. T.; et al. Produção de silagem de milho sobre camalhões em solos de várzea. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, v.2, p.147-153, 2009.
- GALON L. et al. Resistência de *Cyperus difformis* a herbicidas inibidores da ALS em lavoura de arroz irrigado em Santa Catarina. **Planta Daninha**. V. 26, p. 419-427, 2008.
- GIACOMELI, R. et al. Escarificação do solo e sulcadores em semeadora para cultivo de milho em Planossolos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 51, n. 3, p. 261–270, 2016.
- GIACOMELI, R. et al. Physical Properties and Crop Management for Corn in an Albaqualf. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1–14, 2017.

- GOMES, A.S. et al. **Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase as áreas de várzea do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 40 p. (Documentos, 169).
- GUBIANI, P. I. et al. Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. 1–14, 2018.
- HEATHERLY & SPURLOCK, S.R. Furrow and Flood Irrigation of EarlyPlanted, Early-Maturing Soybean Rotated with Rice. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 785-791, 2000.
- JIANG, Y. et al. Water management to mitigate the global warming potential of rice systems: A global meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 234, n. February, p. 47–54, 2019.
- 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.
- KING, C.A. et al. A possible relationship between shoot N concentration and the sensitivity of N<sub>2</sub> fixation to drought in soybean. **Crop Science**, v. 54, n. 1, p. 746-756, 2014.
- KNAAK, N.; MIRANDA, F. F. Arroz Irrigado: **Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil**. XXXII ed. Farroupilha: SOSBAI - Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2018. v. 32
- KOECH, R.K.; SMITH, R.J.; GILLIES, M.H. Evaluating the performance of a real-time optimisation system for furrow irrigation. **Agricultural and Water Management**, v. 142, n. 2, p. 77-87, 2014.
- LANZA, L.M.N. et al. Adubação nitrogenada beneficia soja alagada. **Bragantia**. v. 72, n. 1, p. 2-9, 2013.
- MARCHEZAN, E. et al. Produção animal em várzea sistematizada cultivada com forrageiras de estação fria submetidas a diferentes níveis de adubação. **Ciência Rural**. v. 32, n. 2, p. 303-308, 2002.
- MASTRODOMENICO, A.T. et al. The response and recovery of nitrogen fixation activity in soybean to water deficit at different reproductive developmental stages. **Environmental and Experimental Botany**. v. 85, n. 2, p. 16-21, 2013.
- MATZENBACHER F. O., et al. Rapid diagnosis of resistance to imidazolinone herbicides in barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) and control of resistant biotypes with alternative herbicides. **Planta Daninha**. v. 31, n.3, p. 645-656, 2013;

- MIURA, K. A. et al. **Discriminação e Delimitação das Terras Baixas no Estado do Rio Grande do Sul: Primeira Aproximação**. Pelotas: Embrapa, 2015.
- MUNARETO, J. D., et al. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado por inundação no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 45, p. 1499-1506, 2010.
- NIE, L. et al. Aerobic rice for water-saving agriculture. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 2, p. 411–418, 2012.
- OLIBONE, D. et al. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. **Soil Use and Management**, v. 26, n. 4, p. 485–493, 2010.
- OLIVEIRA, H.C., et al. Nitrogen metabolism and translocation in soybean plants subjected to root oxygen deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**. v. 66, n. 2, p. 141-149, 2013.
- PINTO, L. F. S., et al. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. da S., e MAGALHÃES JR., A. M. Editores técnicos. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p.75-95, 2004.
- PURCELL, L.C. et al. Soybean N<sub>2</sub> fixation estimates, ureide concentrations, and yield responses to drought. **Crop Science**. v. 44, n. 3, p. 484–492, 2004.
- RAO, A. N. et al. Weed Management in Direct-Seeded Rice. **Advances in Agronomy**, v. 93, n. 06, p. 153–255, 2007.
- REICHERT, J. M., et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.44, n.3, p.310-319, 2009.
- RODRIGUES, J. F., et al. Eficiência do uso de água e rendimento de grãos na cultura do milho em área de arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria, **Anais**. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2013. p. 1628-1637.
- ROSO A. C., et al. Bioensaios para diagnóstico da resistência aos herbicidas imidazolinonas em arroz. **Planta Daninha**. V. 28, p. 411-419, 2010;
- SAIRAM, R.K., et al. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. **Biologia Plantarum**. v. 52, n. 3, p. 401-412, 2008.

- SÁNCHEZ-LLERENA, J. et al. Short and long-term effects of different irrigation and tillage systems on soil properties and rice productivity under Mediterranean conditions. **European Journal of Agronomy**, v. 77, p. 101–110, 2016.
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª edição ed. Brasília: Embrapa, 2018.
- SARTORI, G. M. S. et al. Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 12, p. 1139–1149, 2015.
- SARTORI, G. M. S. et al. Soybean Tillage Systems and Physical Changes in Surface Layers of Two Albaqualf Soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1–15, 2016.
- SCHAEDLER, C. E., et al. Globe fringerush (*Fimbristylis miliacea*) cross resistance to ALS-inhibitor herbicides under field conditions in irrigated rice in the south of Brazil. **Planta Daninha**. v. 31, n. 4, p. 893-902, 2013.
- SERRAJ, R., et al. Symbiotic N<sub>2</sub> fixation response to drought. **Journal of Experimental Botany**. v. 50, n. 2, p. 143–155, 1999.
- SICZEK, A.; LIPIEC, J. Soybean nodulation and nitrogen fixation in response to soil compaction and surface straw mulching. **Soil and Tillage Research**, v. 114, n. 1, p. 50-56, 2011.
- SILVA, C. A. S., et al. **Sistema sulco/camalhão para irrigação e drenagem em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008. 4 p. (Comunicado Técnico, 165).
- SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004.
- SOUZA, G. M., et al. Soybean under water stress: Physiological and yield responses. In: **A Comprehensive Survey of International Research – Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships**. 1. ed. InTech: 2013. cap. 13, p. 273-298.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5 ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.
- TELÓ, G. M. et al. Residues of Fungicides and Insecticides in Rice Field. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 3, p. 851, 2015.
- TINT, A. M. M., et al. Nodule growth and nitrogen fixation of selected soybean cultivars under different soil water regimes. **Journal of Natural Science**. v. 45, n. 1, p. 811-823, 2011.

VERNETTI, F. de J., et al. Sucessão de culturas em solos de várzea implantadas nos sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira Agrociência**. V.15, n.4, p.37-42, 2009.

WILLIAMS, S. M.; WEIL, R. R. Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 4, p. 1403, 2004.

YUN, J. T., et al. Waterlogging effects on nitrogen accumulation and N<sub>2</sub> fixation of supernodulating soybean mutants. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v. 11, n. 2, p.111-118, 2008.