

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
DEPARTAMENTO DE SOLOS

**Capacidade de preparos de solo reduzirem
limitações físicas naturais de áreas de várzea
para o cultivo de soja**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Eduardo Augusto Müller

**Santa Maria, RS, Brasil
2015**

PPGCS/UFSM, RS MULLER, Eduardo Augusto Mestre 2015

**Capacidade de preparos de solo
reduzirem limitações físicas naturais de áreas de
várzea para o cultivo de soja**

Eduardo Augusto Müller

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de concentração Física do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

Orientador: Prof. Paulo Ivonir Gubiani

**Santa Maria, RS, Brasil
2015**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Müller, Eduardo Augusto

Capacidade de preparos de solo reduzirem limitações físicas naturais de áreas de várzea para o cultivo de soja / Eduardo Augusto Müller.-2015.

84 p.; 30cm

Orientador: Paulo Ivonir Gubiani

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2015

1. Física do solo 2. Soja em várzea 3. Deficiência por oxigênio 4. Deficiência hídrica 5. Lençol freático
I. Gubiani, Paulo Ivonir II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós graduação em Ciência do Solo**

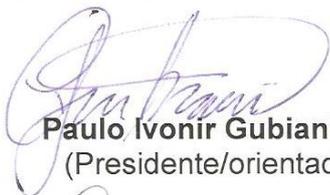
**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado**

**Capacidade de preparos de solo reduzirem limitações físicas
naturais de áreas de várzea para o cultivo de soja**

elaborada por
Eduardo Augusto Müller

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

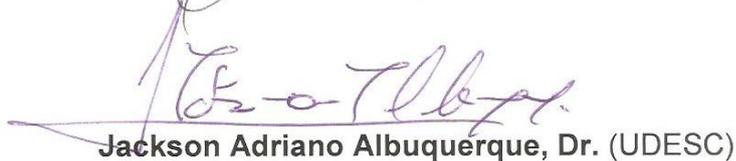
COMISSÃO EXAMINADORA:



Paulo Ivonir Gubiani, Dr.
(Presidente/orientador)



Enio Marchesan, Dr. (UFSM)



Jackson Adriano Albuquerque, Dr. (UDESC)

Santa Maria, 14 de agosto de 2015

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Lizete Clarice Gehrke Müller
e Verner Vilson Müller, por todo
auxílio, apoio e motivação
para enfrentar esse desafio!*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e ao Departamento de Solos, que possibilitaram a realização do curso de mestrado.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos, e ao CNPq por parte do auxílio financeiro.

Ao professor Paulo Ivonir Gubiani pela orientação, dedicação, ensinamentos e amizade durante toda caminhada.

Ao professor Enio Marchesan, por ceder a área experimental e a estrutura para realização do experimento.

Aos amigos e colegas do grupo de pesquisa em arroz irrigado, pelo auxílio prestados durante a execução do experimento.

A minha família, pelo apoio, carinho e incentivo.

E principalmente à equipe do laboratório de Física do Solo, meu agradecimento por todo apoio, contribuição na execução deste trabalho e acima de tudo pela amizade. Cada um sabe o quanto contribuiu e o quanto sou grato por essa contribuição.

MUITO OBRIGADO!!!!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

CAPACIDADE DE PREPAROS DE SOLO REDUZIREM LIMITAÇÕES FÍSICAS NATURAIS DE ÁREAS DE VÁRZEA PARA O CULTIVO DE SOJA

AUTOR: EDUARDO AUGUSTO MÜLLER

ORIENTADOR: PAULO IVONIR GUBIANI

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 14 de agosto de 2015.

A implantação da cultura da soja em solos de várzea nos últimos anos tem aumentado. O objetivo desse trabalho foi investigar a capacidade de preparos do solo modificarem o ambiente físico do solo e quanto o lençol freático e a franja capilar regulam a expressão da melhoria do ambiente físico promovida pelos preparos do solo, tanto no que se refere à deficiência de oxigênio e à deficiência hídrica. Para isso, a cultura da soja foi cultivada em um experimento com os preparos plantio direto, plantio direto com camalhão, escarificado e escarificado com camalhão, em um Planossolo Háplico Eutrófico típico. Para avaliar a modificação física do solo causada pelos preparos foram medidas a densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade ao ar e condutividade hidráulica de solo saturado. Além disso, foram monitorados o nível do lençol freático e o conteúdo volumétrico de água no solo, a partir do qual foram calculados índices de estresse hídrico e por deficiência de oxigênio. O desempenho das plantas foi medido pela população de plantas, massa da matéria seca da parte aérea e produtividade de grãos. Quando o lençol freático se aproximava da superfície do solo, praticamente eram eliminadas as melhorias obtidas com a escarificação para a redução da deficiência de oxigênio, como o aumento da porosidade e da permeabilidade ao ar, pois o conteúdo de água do solo ficava próximo ao de saturação. Os índices de estresse indicaram que a escarificação reduziu a deficiência por oxigênio, embora tenha causado pequena deficiência hídrica. A escarificação também proporcionou a maior produtividade (4610 kg ha^{-1}), que não foi superada pela combinação escarificação mais camalhão (4001 kg ha^{-1}). As menores produtividades ocorreram no plantio direto (2842 kg ha^{-1}) e plantio direto com camalhão (3565 kg ha^{-1}), nos quais a deficiência de oxigênio foi mais severa. Os resultados deste estudo evidenciam que a escarificação tem grande potencial para reduzir o estresse por deficiência de oxigênio em solos de várzea, no entanto, o lençol freático controla a expressão das melhorias proporcionadas pela escarificação.

Palavras-chave: Deficiência hídrica; Deficiência por oxigênio; Lençol freático.

ABSTRACT

Master Course Dissertation
Post-Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

CAPACITY OF SOIL MANagements FOR REDUCING NATURAL PHYSICAL LIMITATIONS OF LOWLANDS FOR SOYBEAN PRODUCTION

AUTHOR: EDUARDO AUGUSTO MÜLLER
ADVISOR: PAULO IVONIR GUBIANI

Place and date of defense: Santa Maria, August 14, 2015.

The soybean crop development in lowland soils in recent years has increased. The aim of this study was to investigate the capacity of the soil management to modify the physical environment of the soil, and analyze the role of groundwater and capillary fringe in regulating the expression of physical environment improved by soil management, both in regard to oxygen deficiency and water deficit. For this, the soybean crop was grown in an experiment with no-tillage, ridge with tillage, chiseling, and chiseling with ridge, in a Alfisol. To evaluate the modification caused by the preparations, bulk density, total porosity, macro and micro porosity, air permeability and saturated hydraulic conductivity were measured. Also, the level of the water table and the volumetric water content in the soil were monitored, from which rates of water stress and oxygen deficiency were calculated. Plant performance was evaluated by measuring population of plants, dry matter of shoot and grain yield. When the groundwater approaching the soil surface, the improvements obtained with the chiseling for the reduction of oxygen deficiency were removed virtually, such as increased porosity and air permeability, because the water content was close to that of saturation. The levels of stress indicated that chiseling reduced oxygen deficiency, although it caused little water deficit. The chiseling also provided the highest yield (4610 kg ha⁻¹), which was not surpassed by the ridge and chiseling combination (4001 kg ha⁻¹). The lower yields were observed in no tillage (2842 kg ha⁻¹) and no tillage with ridge (3565 kg ha⁻¹), in which oxygen deficiency was more severe. The results of this study show that chiseling has great potential to reduce stress by oxygen deficiency in lowland soils, however, the water table controls the expression of the improvements provided by chiseling.

Keywords: Water stress; deficiency oxygen; groundwater

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Representação dos tratamentos e suas influências no solo e na franja capilar. D: semeadura direta, DC: semeadura direta com camalhão, E: escarificado, EC: escarificado com camalhão. 29
- Figura 2 - Imagem aérea ilustrando a área em estudo, coordenadas 29°43'13.20"S e 53°43'30.39"O (imagem retirada do Google Earth).
..... 32
- Figura 3 - Solo da área experimental após o processo de escarificação (a) e destorroamento com grade de dentes (b). 34
- Figura 4 - Semeadura de soja sobre camalhão com semeadora camalhoneira.
..... 34
- Figura 5 - Relação empírica que descreve a taxa de extração de água pelas raízes (λ) em função da tensão da água do solo (ψ) e seus correspondentes conteúdos de água (θ). Adaptado de Feddes et al. (1978). 40
- Figura 6 - Esquema de poço de observação. Fonte: Cruciani (1987). 41
- Figura 7 - Precipitação e nível do lençol freático no período de cultivo, de dezembro a início de abril de 2015. 50
- Figura 8 - Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) nos diferentes tratamentos na camada de 0-10 cm ao longo do período de cultivo. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão. 52
- Figura 9 - Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) nos diferentes tratamentos na camada de 10-20 cm ao longo do período de cultivo. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão. 53
- Figura 10 - Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) nos diferentes tratamentos na camada de 20-30 cm ao longo do período de cultivo. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão. 54
- Figura 11 - Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) nos diferentes tratamentos na camada de 30-40 cm ao longo do período de cultivo. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão. 55
- Figura 12 - Relação da permanência (X) de λ_{DH} (linhas à esquerda) e da permanência (100-X) de λ_{DO} (linhas à direita), para a camada de 0-10 cm, nos diferentes tratamentos em todas repetições. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão. 57

- Figura 13 - Relação da permanência (X) de λ_{DH} (linhas à esquerda) e da permanência (100-X) de λ_{DO} (linhas à direita), para a camada de 10-20 cm, nos diferentes tratamentos em todas repetições. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão..... 58
- Figura 14 - Relação da permanência (X) de λ_{DH} (linhas à esquerda) e da permanência (100-X) de λ_{DO} (linhas à direita), para a camada de 20-30 cm, nos diferentes tratamentos em todas repetições. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão..... 59
- Figura 15 - Relação da permanência (X) de λ_{DH} (linhas à esquerda) e da permanência (100-X) de λ_{DO} (linhas à direita), para a camada de 30-40 cm, nos diferentes tratamentos em todas repetições. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão..... 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição granulométrica média nas diferentes profundidades do solo da área experimental.	33
Tabela 2 - Densidade e porosidade do solo nos diferentes sistemas de manejo.	45
Tabela 3 - Condutividade hidráulica de solo saturado (K_s) nos diferentes sistemas de manejo.	47
Tabela 4 - Permeabilidade ao ar (K_a) nos diferentes sistemas de manejo.	48
Tabela 5 - População de plantas, massa da matéria seca da parte aérea e produtividade de grãos nos diferentes sistemas de preparo do solo.	64

LISTA DE APÊNDICE

Apêndice A – Análise química do solo da área do experimento.....	77
Apêndice B - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento direto com camalhão, primeira coleta aos 12 dias após plantio.	78
Apêndice C - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento direto, primeira coleta aos 12 dias após plantio.	79
Apêndice D - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento escarificado com camalhão, primeira coleta aos 12 dias após plantio.	80
Apêndice E - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento escarificado, primeira coleta aos 12 dias após plantio.....	81
Apêndice F - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento direto com camalhão, segunda coleta aos 70 dias após plantio.	82
Apêndice G - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento direto, segunda coleta aos 70 dias após plantio.	83
Apêndice H - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento escarificado com camalhão, segunda coleta aos 70 dias após plantio.	84
Apêndice I - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para	

cada camada de solo do tratamento escarificado, segunda coleta aos 70 dias após plantio.....	85
Apêndice J – Encharcamento do solo no tratamento direto após 24 horas da ocorrência da precipitação.	86

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Cultivo de soja em solos de várzea.....	18
2.2 Características dos solos de várzea	21
2.3 Lençol freático e franja capilar	23
2.4 Preparos do solo	26
3. OBJETIVOS.....	29
3.1 Objetivos específicos	30
4. HIPÓTESES	31
5. MATERIAL E MÉTODOS	32
5.1 Área experimental e tratamentos	32
5.2 Variáveis medidas e calculadas	35
5.3 Testes estatísticos.....	42
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
6.1 Densidade e porosidade do solo	43
6.2 Condutividade hidráulica e permeabilidade ao ar do solo	46
6.3 Precipitação, nível do lençol freático e conteúdo de água no solo	49
6.4 Indicadores de deficiência hídrica e por oxigênio	56
6.5 Parâmetros da cultura	62
7. CONCLUSÕES.....	65
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
9. APÊNDICE	77

1. INTRODUÇÃO

As áreas de várzea do Rio Grande do Sul são utilizadas principalmente para o cultivo do arroz irrigado e criação pecuária. Nos últimos anos o monocultivo e a intensificação do uso das várzeas aumentou a incidência de pragas e plantas daninhas prejudiciais ao arroz. Uma das medidas que visa contornar esse problema é a rotação ou sucessão de culturas. No entanto, para implantar outras culturas nesse ambiente, é necessário utilizar plantas que tolerem o encharcamento e, além disso, manejar corretamente o solo para possibilitar uma drenagem eficiente.

Nesse sentido, a cultura que recebe maior destaque é a soja. A soja é capaz de tolerar excessos hídricos, melhorar a fertilidade do solo, reduzir o banco de semente de plantas daninhas e possibilitar uma fonte de renda ao produtor. O manejo do solo para implantar uma cultura de sequeiro em áreas de várzeas ainda precisa ser adequado às características desses solos. A condição natural do solo de várzea, intensificada pelo seu uso, causa limitações físicas e hídricas para o crescimento radicular. As principais limitações desse solo são a drenagem lenta, presença de camadas compactadas, proximidade do lençol freático da superfície, baixa capacidade de armazenamento de água.

Assim, ao se cultivar soja em várzea a planta é submetida a uma frequência elevada de estresse, tanto por excesso de água, que diminui a disponibilidade de oxigênio no solo e compromete o sistema radicular, como por deficiência hídrica, causada pela baixa capacidade de armazenamento de água deste solo. Desta forma, surge à necessidade de intervenções mecânicas para o preparo do solo, com a finalidade de eliminar o microrelevo, melhorar os atributos físicos e a drenagem solo. A adequação do ambiente físico do solo de várzea tende a reduzir a frequência de estresses que a soja é submetida e proporcionar estabilidade produtiva da cultura.

O trabalho busca identificar as características de alguns sistemas de manejo e a capacidade em alterar o ambiente físico hídrico do solo de várzea para aperfeiçoar o desenvolvimento da cultura da soja.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Historicamente, os solos de várzea do estado do Rio Grande do Sul vêm sendo utilizados para o cultivo do arroz irrigado e pecuária extensiva, com predomínio do cultivo sucessivo de arroz irrigado na mesma área, ao longo dos anos. Contudo, a sucessão de cultivos aumenta a incidência de doenças, pragas e plantas daninhas na cultura, como: maior ocorrência de brusone e surgimento de outras doenças; elevação da população de algumas pragas importantes, como a bicheira da raiz do arroz, percevejos e lagartas; infestação de arroz-vermelho e aumento de plantas daninhas resistentes, devido ao uso contínuo de herbicidas do mesmo mecanismo de ação (SOSBAI, 2014).

Uma opção de manejo com potencial para minimizar esses problemas é a rotação e/ou sucessão de cultura, em que o cultivo de arroz irrigado é substituído esporadicamente por culturas de sequeiro como a soja, milho, sorgo, entre outras (SOSBAI, 2014). Porém, o grande desafio da pesquisa tem sido propor manejos culturais e de solo que reduzam as limitações provocadas pelo encharcamento ou alagamento, comuns em solo de várzea. As principais alternativas são o uso de culturas que se adaptem à condição alternada de deficiência de oxigênio e hídrica.

Quanto às culturas, muitos estudos sugerem que a soja é uma alternativa, devido ao nível de tolerância de alguns genótipos (PIRES et al., 2002; SCHÖFFEL et al., 2001; VAN TOAI et al., 2010). No entanto, outros trabalhos relatam decréscimos significativos na produtividade da soja submetida ao alagamento, mesmos em genótipos tolerantes (CORNELIUS et al., 2006). Van Toai et al. (1994) constataram redução de 25% na produtividade de 84 cultivares de soja em áreas inundadas.

Assim, à modificação do ambiente físico do solo, o conhecimento das características naturais dos solos de várzea e seu regime hídrico são fatores importantes na definição de técnicas de preparo do solo.

2.1 Cultivo de soja em solos de várzea

A soja é uma cultura de grande importância econômica e industrial, com elevado valor de mercado. Nos últimos anos, manteve preços em patamares altos e com baixa oscilação (CEPEA, 2015), o que proporcionou a expansão das fronteiras agrícolas da cultura e motivou os orizicultores a usá-la no sistema de rotação com arroz nas áreas de várzeas.

No entanto, a soja cultivada em várzeas está sujeita a estresses frequentes, tanto por deficiência de oxigênio (DO), quanto por deficiência hídrica (DH). O acúmulo de água na superfície e o encharcamento do solo em várzeas, no período do cultivo da soja, ocorrem com frequência quando as precipitações são elevadas e se repetem por vários dias. Além disso, o acúmulo de água é favorecido pela lenta drenagem do solo. De acordo com a normal climatológica dos meses de outubro a abril (período do cultivo de soja) a precipitação varia aproximadamente de 100 a 200 mm mensais para o estado do Rio Grande do Sul (INMET, 2015). Quando a distribuição das chuvas é concentrada em poucos dias ou ainda excede a normal climatológica do mês, o solo é submetido ao encharcamento e a DO é severa. Por outro lado períodos com mais de 10 dias sem chuva, comuns no verão nos meses de janeiro e fevereiro (INMET, 2015), diminuem a disponibilidade de água no solo e a planta pode ficar sujeita a DH.

De maneira geral, a cultura da soja é sensível à DO, a qual ocorre com frequência em solos de várzea. Porém, estudos demonstram que alguns genótipos são tolerantes à DO, o que possibilita rendimento de grãos semelhante ao das áreas de sequeiro (THOMAS et al., 2000; PIRES et al., 2002; VAN TOAI et al., 2010). Contudo, as pesquisas indicam que a tolerância genética à deficiência de oxigênio da cultura da soja é condicionada por dois fatores principais, o estágio fenológico da cultura e o tempo de duração do estresse.

Nos estádios fenológicos V2, R2, R3 e, principalmente, R4 a deficiência de oxigênio afeta significativamente os componentes de rendimento da soja e, conseqüentemente, sua produtividade (SCHÖFFEL et al., 2001). Outro período crítico é a germinação e período inicial de crescimento da cultura, onde a DO prejudica o estabelecimento da lavoura (WUEBKER et al., 2001). Em estudos

de laboratório, Hou e Thseng (1991) avaliaram 50 cultivares submetidas ao excesso hídrico e verificaram que a maioria apresentou severa redução da germinação após o quarto dia de inundação.

Quanto à duração do estresse, seu principal condicionante é o tempo de alagamento do solo. Se ele for curto, um ou dois dias, o estresse é pequeno e as mudanças metabólicas resultam na produção das chamadas "proteínas de estresse anaeróbico", como enzimas da via glicolítica e fermentativa, que ajudam as plantas a tolerar a hipoxia nas raízes (SAIRAM et al., 2008; IRFAN et al., 2010). Quando ocorrem períodos longos de alagamento, as alterações em nível metabólico provocam alterações morfológicas no sistema radicular, como o desenvolvimento de aerênquima, raízes adventícias e hipertrofia do caule das plantas (PIRES et al., 2002; FANTE et al., 2010). Também pode ocorrer a morte da raiz principal e o aumento da quantidade de raízes laterais (PIRES et al., 2002), mas isso coincide com drástica queda no volume total de raízes (ZENZEN et al., 2007).

As plantas submetidas a longos períodos de hipoxia alteram sua produção hormonal, principalmente com aumento da produção endógena de etileno, que prejudica a nodulação da soja (JAMES; CRAWFORD, 1998; OLDROYD, 2001). O alagamento diminui, também, a sobrevivência das bactérias responsáveis pela nodulação (ROUGHLEY et al., 1995; BAILEY-SERRES et al., 2012). Sabe-se também que a fixação biológica do N₂ em leguminosas é, geralmente, prejudicada pela deficiência de O₂ para os nódulos (JAMES; CRAWFORD, 1998). Portanto, indiretamente o alagamento pode limitar o rendimento da planta pela redução do mecanismo de fixação biológica de nitrogênio.

Por outro lado, em várzea predominam solos e textura siltosa e arenosa o que podem armazenar e disponibilizar menor quantidade de água para a soja. Conseqüentemente, pode haver também DH em solos de várzea, que afeta diretamente os processos morfofisiológicos da planta. A resposta mais proeminente das plantas ao DH consiste no decréscimo da produção da área foliar, fechamento dos estômatos, aceleração da senescência e abscisão das folhas (TAIZ; ZEIGER, 2006). O efeito do déficit hídrico sobre as culturas está associado ao período de ocorrência durante o desenvolvimento das plantas. A soja possui três períodos bem definidos de sensibilidade à falta de água: emergência, florescimento e enchimento dos grãos. Na emergência, a falta de

água prejudica estabelecimento da cultura (TAVARES et al., 2013), já no florescimento, causa o aborto das flores reduzindo o número de vagens, enquanto no enchimento dos grãos, afeta o peso dos grãos e a produção (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

Embora o estresse por DH também ocorre em solo de várzea, em períodos prolongados de escassez de chuva, o principal limitante é o estresse por DO, devido ao alagamento. Mesmo que alguns genótipos de soja tolerem estresses por DO, os gastos energéticos para reduzir os danos do estresse implicam em diminuição da produtividade da cultura. Fante et al. (2010), comparando plantas submetidas ao alagamento em diferentes estádios com plantas não alagadas, encontraram incrementos na atividade das enzimas álcool desidrogenase, piruvato descarboxilase e lactato desidrogenase. Os mesmos autores relataram redução de matéria seca da planta e matéria seca dos grãos, além de menor número de grão por planta no genótipo BRS 257. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Correa et al. (2006) que, avaliando genótipos de soja em solos de várzea, constataram redução na massa seca de plantas de soja em todos os genótipos testados quando submetidos ao alagamento. Já Pazzin (2012), avaliando plantas submetidas ao alagamento em diferentes estádios de desenvolvimento, verificou redução na produtividade da soja quando comparado com a testemunha sem alagamento.

Portanto, em conjunto com a escolha de cultivares tolerantes, estratégias de manejo de solo e de épocas de semeadura se constituem práticas necessárias para evitar que ocorram períodos prolongados de alagamento durante o crescimento da cultura. No caso específico em que se quer estudar opções de preparo de solo, com o propósito de melhorar o ambiente físico do solo, a fim de diminuir a ocorrência de estresse por DH e DO, é indispensável compreender as características intrínsecas do solo de várzea que controlam a disponibilidade de água e oxigênio. Com base nisso pode-se propor estratégias de preparo do solo e analisar suas capacidades de viabilizar o cultivo de soja nas áreas de várzea.

A determinação do efeito da DH e da DO que a planta enfrenta durante o ciclo de cultivo é difícil de ser estimado. Vários fatores podem alterar processos biológicos fundamentais como fotossíntese, respiração e nutrição, o que resulta em diferentes respostas da planta. Em termos de fatores físicos do solo, Letey (1985) ressalta que a concentração de oxigênio, a resistência mecânica, o

potencial da água e a temperatura do solo são fatores que diretamente afetam o crescimento e produção das culturas. A medição e modelagem desses fatores ao longo do ciclo de uma planta permite avaliar sua importância. Contudo, há grandes dificuldades de ordem metodológica para se obter essas medidas e, por tais razões, índices relacionados com esses fatores são frequentemente utilizados (GUBIANI et al., 2013a). A resistência mecânica ao crescimento celular tem sido estimada pela resistência à penetração de uma haste metálica (MORAES et al., 2014) e a deficiência de oxigênio ou de água tem sido estimada em termos de conteúdo de água ou potencial matricial. Para estes dois últimos, uma estimativa da DH e DO pode ser obtida com a função empírica descrita por Feddes et al. (1978), que estabelece potenciais de água no solo limitantes para a ocorrência do estresse, a qual tem sido utilizada em modelos hidrológicos como o HYDRUS-1D (SIMUNEK; VAN GENUCHTEN, 2008).

2.2 Características dos solos de várzea

Os solos de várzea ocupam uma área de aproximadamente 5,4 milhões de ha no Rio Grande do Sul (RS) (PINTO et al., 1999). Deste total, aproximadamente 3,0 milhões de ha são aptos para cultivo (PINTO et al., 2006), dos quais cerca de 1,1 milhão de ha são cultivados anualmente com arroz irrigado (CONAB, 2015) e o restante permanece em pousio ou é utilizado para pecuária extensiva.

As principais classes de solo que ocorrem nas áreas de várzea são os planossolos e gleissolos, mas também são encontrados vertissolos, chernossolos e neossolos. Todos eles têm características hidromórficas, relevo suave ondulado a plano e são usados com a cultura do arroz irrigado (PINTO et al., 1999).

Os planossolos ocupam 56% da área de solos de várzea do RS (PINTO et al., 2006). Essa classe é caracterizada pela presença de um tipo especial de horizonte B textural, chamado de horizonte B plânico, no qual há incremento de argila numa pequena distância em relação ao horizonte subjacente A ou E, denominada de mudança textural abrupta, e predomínio de cores acinzentadas

ou escurecidas, que refletem sua baixa permeabilidade (SANTOS; ZARONI, 2011). Decorrente disso, a porosidade do horizonte B é menor e constituída predominantemente por microporos, enquanto que a porosidade do horizonte A é maior e ocupada em grande parte por macroporos. Conseqüentemente, a permeabilidade à água e aos gases é maior no horizonte A e baixa no horizonte B. Neste, a permeabilidade pode ser praticamente nula e pode haver redução da disponibilidade de água (PINTO et al., 2004).

Os gleissolos ocorrem nas partes mais baixas das várzeas e nas depressões no RS. Caracterizam-se por apresentar um horizonte com cores cinzentas, imediatamente abaixo do horizonte A podendo começar dentro de 50 cm da superfície, com forte gleização e zonas de redução do solo devido ao longo período de saturação. A água permanece estagnada internamente nesse solo e a drenagem ocorre por fluxo lateral, sendo considerado livre de oxigênio dissolvido (NETO; SILVA, 2011). A maior limitação está na presença de lençol freático elevado, com riscos de inundação, necessitando de drenagem para seu uso. (SOUSA; LOBATO, 2007). Assim, a retirada da água em áreas de várzea depende basicamente da drenagem lateral. Contudo, o relevo plano torna esse processo bastante lento, exigindo obras de drenagem complexas e de alto custo.

Outro fator limitante é o armazenamento de água, que é diretamente relacionado com características físicas do solo (LIBARDI, 2005). Manzke et al. (2011), ao estudar solos de várzea do RS, observam que a capacidade de água disponível na maioria desses solos foi inferior a $0,1 \text{ m}^{-3}\text{m}^{-3}$ e a capacidade de armazenamento de água nos primeiros 20 cm variou entre 5 e 30 mm, o que caracteriza uma baixa retenção de água. Essa baixa capacidade de armazenamento, quando associada a períodos longos sem precipitação, pode limitar o fornecimento de água à planta.

Além disso, essas áreas são extensas e contínuas, mecanizáveis, facilmente irrigadas e com baixa suscetibilidade à erosão e perdas de nutrientes por lixiviação (PAULETTO et al., 2004). Mas estão sujeitas a ocorrência de compactação devido ao preparo excessivo do solo em condições de umidade elevada e ao tráfego de maquinário pesado. Em estudo utilizando sistema convencional de cultivo, Bamberg et al. (2009) encontraram duas camadas compactadas ao longo do perfil de solo de várzea. A primeira, próximo à superfície do solo, entre 0,0 a 1,5 cm, e, a segunda, entre 11 a 14

cm. Para o cultivo do arroz irrigado, a compactação é vista como benéfica, pois diminui as perdas de água por percolação e o consumo de água na irrigação. Portanto, o ambiente físico dos solos de várzea naturalmente restringe o desenvolvimento do sistema radicular das culturas de sequeiro (GOMES et al., 2006).

A compactação do solo indica um aumento significativo na densidade do solo e ocasiona impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas (BERGAMIM et al., 2010). As raízes ficam restritas a camada superficial do solo, o que reduz o volume de solo explorado pelo sistema radicular e conseqüentemente a disponibilidade hídrica para a planta. Assim, compreender os fatores que condicionam a variação da umidade em solos de várzea possibilita reduzir os estresses por DO e DH.

2.3 Lençol freático e franja capilar

Um dos fatores que condiciona a variação da umidade do solo de várzea é o lençol freático, que é definido como uma zona saturada do solo limitada na parte inferior por uma camada impermeável, cuja flutuação está associada ao regime hídrico do local. Assim, a água advinda da precipitação que chega ao solo pode escoar superficialmente ou infiltrar. A drenagem da água que infiltrou e aumentou o armazenamento depende das características internas do solo, do relevo e da vegetação (PINTO et al., 1976). Solos com poros contínuos ou arenosos facilitam o fluxo descendente de água no perfil, já solos com camadas menos permeáveis e acúmulo de argila iluvial retardam a infiltração da água (HILLEL, 1982). O impedimento do fluxo de água forma a zona saturada, que ocupa o espaço aéreo sobrejacente à camada impermeável (PINTO et al., 1976).

A posição baixa no relevo e formas mais planas típicas de áreas de várzea, associadas com a presença de camadas impermeáveis, faz com que o lençol freático fique mais próximo da superfície do solo. Nesse sentido, Fiorin et al. (2003) verificaram que a profundidade do lençol freático de uma área de várzea cultivada com milho oscilou entre 27,8 e 68,3 cm da superfície do solo.

A variação da profundidade do lençol freático é regulada pela distribuição das precipitações. Em períodos prolongados de precipitação, o nível do lençol freático se aproxima ou até mesmo se eleva em relação à superfície do solo, constituindo o alagamento. Assim, o lençol freático pode atingir a área explorada pelo sistema radicular, diminuindo a disponibilidade de oxigênio e causando prejuízos às plantas. Gomes et al. (2012), ao comparar a variação anual do nível do lençol freático em dois solos, verificaram que o nível do lençol freático se aproximou da superfície do solo nos períodos de precipitação mais elevada.

Para a soja, a consequência imediata desse fato é a ocorrência de estresse por DO. Portanto, se o nível do lençol freático permanecer próximo da superfície do solo durante o crescimento da soja, uma camada pequena de solo fornece oxigênio para o sistema radicular, restringindo o crescimento das raízes a essa camada superficial. Silveira e Klar (2001), avaliando o crescimento radicular da aveia em diferentes profundidades do lençol freático, encontraram que o sistema radicular da planta ocupou somente o espaço aerado do solo até próximo ao nível da água do lençol freático (0,17 m a 0,3 m). Jorenush e Sepaskhah (2003) citam que em solos com a zona saturada próxima a superfície, a maior parte das raízes de trigo ocupa uma região pouco acima do lençol freático. Pires et al. (2002) verificaram que o elevado teor de umidade causou a morte da raiz principal da soja, crescimento de raízes laterais e surgimento de raízes adventícias, o que condiciona o crescimento do sistema radicular à camada superficial do solo.

Outro componente importante em solos de várzea, que regula o conteúdo de água na zona enraizada, é a franja capilar. A franja capilar se forma imediatamente acima do lençol freático (zona saturada) e caracteriza-se por apresentar uma camada de elevação da água pelo fenômeno da capilaridade (PINTO et al., 1976). O conteúdo de água na franja capilar varia gradativamente do conteúdo de água da zona saturada até o conteúdo de água da zona aerada. A altura de ascensão capilar é inversamente proporcional ao diâmetro dos poros (LIBARDI, 2005).

Estudos demonstram que há mudança brusca no conteúdo de água em certa altura acima do lençol freático, e que a altura pode ser modificada pelo aumento de poros menores pela compactação do solo (RONEN et al., 2000). Nesse sentido, Kowalik (2006) avaliou a ascensão capilar para seis perfis de

solo durante quatro anos e verificou que a elevação média de umidade no perfil foi de 0,09-0,15 m em solo argilo siltoso (Inceptisols) e 0,06-0,13 m para solo argiloso (Organossolos ou Inceptisols). Já Ronen et al. (2000) citam que pode haver elevação da umidade até 1 m acima do lençol freático.

Em períodos de baixa disponibilidade hídrica, associados a condições de sistema radicular pouco profundo, a água extraída da camada superficial onde estão as raízes pode ser repostada em parte pela água da franja capilar. Assim, em períodos de deficiência hídrica, a presença da franja capilar próxima da superfície do solo é benéfica, pois pode suprir a demanda hídrica das plantas.

Contudo, existem evidências que as quantidades de água e ar na região da franja capilar produzem um ambiente adequado para os processos de biodegradação e outras reações químicas (AFFEK et al. de 1998; SINKE et al. 1998). Assim, a variação no teor de água nessa região pode modificar a disponibilidade de oxigênio. Affek et al. (1998) mediram concentrações muito elevadas de CO₂, produzido pela biodegradação realizada na região da franja capilar. Nesse caso, a planta precisa concorrer com os micro-organismos do solo pelo oxigênio disponível, o que pode prejudicar o crescimento do sistema radicular das plantas nessa região.

Portanto, a mudança do nível do lençol freático pode causar sucessão de estresses por DO e DH. Assim, o monitoramento do nível do lençol freático é útil para conhecer seu papel no controle do ambiente físico do solo de várzea para o cultivo da soja, bem como para adaptar o manejo adequado do solo.

2.4 Preparos do solo

O preparo do solo em áreas de várzea é uma prática utilizada com frequência, principalmente para corrigir a superfície do terreno. A colheita do arroz em lavouras irrigadas, normalmente executada em elevada umidade, promove a desestruturação e o desnivelamento do solo (LOUZADA et al., 2008). Nesse sentido o preparo do solo ainda é uma prática necessária, principalmente no caso do cultivo de culturas de sequeiro quando essa técnica deve proporcionar melhorias físicas ao solo e drenagem eficiente.

No que se refere às possibilidades de preparo do solo, alguns autores sugerem que o preparo mínimo, que em áreas de várzea é a menor quantidade de operações necessárias para nivelar o solo, como favorável para melhores condições físicas ao solo, com densidade menor em relação ao preparo convencional (PEDROTTI et al. 2001). Por outro lado, a escarificação é outra técnica muito difundida que proporciona melhorias nas características físicas do solo em várias condições. Machado et al. (1996) compararam solos com e sem escarificação em várzeas e verificaram contribuição da escarificação na redução da densidade do solo, microporosidade, na relação micro/macroporos, além de aumentar a macroporosidade e a porosidade total.

Assim, esses preparos poderiam ser uma alternativa para viabilizar a implantação de culturas de sequeiro nas áreas de várzea, reduzindo os efeitos da compactação e resistência à penetração das raízes. Marchesan et al. (2013), ao estudar sistemas de implantação de soja em várzea, encontraram que a escarificação proporcionou maior desenvolvimento da raiz, devido a menor resistência a penetração, menor densidade e maior macroporosidade do solo, enquanto que o sistema plantio direto restringiu o desenvolvimento do sistema radicular devido a compactação do solo. No entanto, em áreas de várzea, estes preparos devem ser mais estudados para melhor compreender sua capacidade em diminuir as limitações por DO e DH na cultura da soja. Para isso é fundamental compreender quanto o lençol freático controla os efeitos dos preparos do solo.

No que se refere ao controle do lençol freático pela drenagem, os drenos projetados para o cultivo do arroz irrigado nas áreas de várzea não drenam satisfatoriamente o solo para culturas de sequeiro. Para o cultivo de culturas de

sequeiro em várzea, o sistema de drenagem deve ser ampliado e aperfeiçoado. As práticas mais citadas em sistemas de drenagem são a sistematização em declive do terreno, a confecção de camalhões largos (SILVA; PARFITT, 2004), a construção de drenos profundos e a instalação de redes de drenagem subterrânea (MILLAR, 1978). No entanto, as práticas aplicadas para a confecção de drenos exigem altos investimentos, grandes demanda por maquinário para a alteração da superfície do solo e ainda podem gerar problemas ambientais. Silva et al. (2002) relatam que a colheita e o preparo do solo são prejudicados por sistemas de drenagem de camalhão largo. O mesmo autor também indica a necessidade de nivelar o terreno quando for o caso de cultivar arroz irrigado na área. Kisekka et al. (2013) citam que as redes de canais de drenagem subterrâneas, muito utilizados no sul da Flórida, podem ter afetado o ecossistema da região. Nessa região, a construção de canais de drenagem dos solos reduziu a frequência de inundações e conseqüentemente a presença de aves e outros animais neste local, bem como a micro-organismos do solo.

Desta forma, as técnicas tradicionais de drenagem têm sido pouco utilizadas. Assim, no sistema de produção arroz/soja o manejo de solo assume função importante para reduzir os estresses da cultura da soja. O preparo escarificado pode proporcionar benefício à drenagem através do aumento do diâmetro de poros na superfície do solo e o aumento das trocas gasosas com atmosfera (Klein et al., 2008). Dalla Rosa (1981) relata que a escarificação pode aumentar a permeabilidade do solo e reduzir o encharcamento em terrenos planos. No entanto, em solos de várzea essa técnica ainda merece investigações, no sentido de compreender sua efetividade na drenagem e, principalmente, no rebaixamento do lençol freático e franja capilar em relação a superfície do solo.

Outro preparo que tem sido utilizado para favorecer a drenagem de várzeas é a construção de microcanais de drenagem ou camalhões, nos quais são estabelecidas uma ou duas linhas de cultivo diretamente com a semeadora. Marchesan et al. (2013) verificaram que o sistema de microcamalhão proporcionou maior acúmulo de massa seca na parte aérea da soja, fato associado à maior drenagem do solo nesse sistema. No entanto, os mesmos autores relatam que não houve diferença na produtividade das plantas em relação a outros preparos, o que pode ter sido condicionado pelo ano

agrícola do estudo que não apresentou excessos hídricos. Em estudo anterior, Fiorin et al. (2009) também observaram que o excesso de água na zona radicular de plantas de milho cultivadas sem camalhão comprometeu o desenvolvimento da parte aérea e da produção de massa fresca e seca, o que reduziu o rendimento da produção de silagem.

A técnica dos microcanais de drenagem ou camalhões promove a elevação relativa da superfície do solo onde é construído o camalhão, o que possibilita o distanciamento da superfície do solo em relação ao lençol freático. No entanto, é necessário verificar se essa prática é suficiente ou deve ser combinada com a escarificação para se conseguir um maior distanciamento entre superfície do solo e lençol freático e franja a fim de reduzir a frequência dos estresses hídricos sofridos pela cultura da soja.

3. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho foi investigar como preparos do solo alteram a dinâmica de ocupação da porosidade do solo por água e ar. Um dos principais interesses foi investigar o quanto o lençol freático e a franja capilar regulam a expressão da melhoria do ambiente físico promovida pelos preparos do solo, tanto no que se refere à DO quanto à DH. Neste propósito, a figura abaixo ilustra os preparos do solo que foram estudados, que são a semeadura direta (D) e a escarificação (E), usados individualmente e combinados com camalhões (DC e EC), e os principais aspectos que foram investigados. Um deles foi investigar se a E promove significativo rebaixamento da franja capilar e diminui satisfatoriamente a ocorrência de DO nos períodos chuvosos. Outra questão que foi investigada sobre a E é se ela agrava a DH nos períodos de pouca precipitação. Quanto ao uso de camalhões, pretende-se investigar em que condições de regime de chuva eles são necessários no E, dispensáveis ou indispensáveis no D, para diminuir a DO. Também foi interesse deste estudo avaliar o crescimento e produtividade da soja nos diferentes preparos de solo.

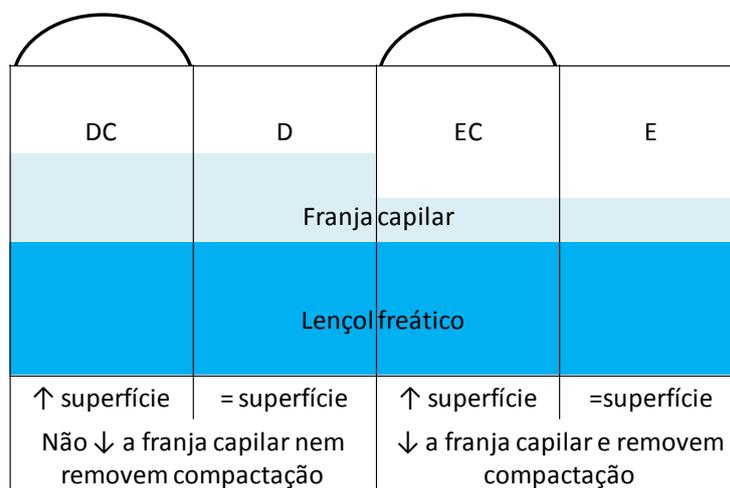


Figura 1 - Representação dos tratamentos e suas influencias no solo e na franja capilar. D: semeadura direta, DC: semeadura direta com camaleão, E: escarificado, EC: escarificado com camalhão.

3.1 Objetivos específicos

Nos diferentes preparos do solo, foi avaliado:

- A modificação das propriedades físicas ao longo do perfil de solo;
- O nível do lençol freático e sua influência na disponibilidade temporal de água e ar no solo;
- A ocupação da porosidade por água e ar e correspondentes indicadores de estresse por DO e DH;
- A relação da produtividade das plantas com as propriedades físico-hídricas do solo.

4. HIPÓTESES

A partir das evidências reunidas na revisão e do objetivo estabelecido para o estudo, acredita-se que:

- Nos períodos em que as chuvas provocam elevação do lençol freático e franja capilar, a DO aumenta na sequência de preparos do solo EC, E, DC e D.
- Nos períodos de pouca precipitação e que há rebaixamento do lençol freático e franja capilar, a DH aumenta na sequência de preparos do solo D, DC, E e EC.
- Devido o predomínio de elevada umidade em solos de várzea e às modificações no solo causadas pela EC, o balanço de indicadores de DH e DO será menos prejudicial à cultura da soja no EC, no qual ela atingirá maior produtividade.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área experimental e tratamentos

O estudo foi realizado no campo experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), localizado na cidade de Santa Maria, Região Fisiográfica da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul (Figura 2), no ano agrícola 2014/15. O solo da área de estudo é classificado como Planossolo Háplico Eutrófico típico (EMBRAPA, 2013), de textura média (Tabela 1). O clima da região é caracterizado como Cfa (subtropical úmido sem estiagens) de acordo com a classificação de Köppen, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e a do mês mais frio entre -3 °C e 18 °C (MORENO, 1961).



Figura 2 - Imagem aérea ilustrando a área em estudo, coordenadas 29°43'13.20"S e 53°43'30.39"O (imagem retirada do Google Earth).

Tabela 1 - Composição granulométrica média nas diferentes profundidades do solo da área experimental.

Prof (cm)	Areia	Silte	Argila
	g kg ⁻¹		
0-10	198	573	229
10-20	180	572	248
20-30	165	587	249
30-40	240	546	214

O delineamento experimental adotado foi o blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos foram preparos do solo, sendo eles: semeadura direta (D), escarificado (E), semeadura direta com camalhão (DC) e escarificado com camalhão (EC). As parcelas tiveram dimensões de 6 m x 8 m. Os blocos foram alocados no centro de um quadro maior, que foi todo cultivado com soja.

A área experimental anteriormente foi cultivada com arroz irrigado. O preparo inicial do solo foi realizado após a colheita da cultura do arroz. Primeiramente, foram incorporados os restos culturais com rolo faca. Com o solo mais seco, foi realizada calagem, com aplicação de uma tonelada de calcário dolomítico e, posteriormente, o revolvimento com uma grade de disco. Posteriormente, para corrigir o microrrelevo do terreno, o solo foi nivelado com lâmina remaplan. Os procedimentos foram realizados durante os meses de abril e maio de 2014. Durante os meses de inverno, a área permaneceu em pousio, com plantas espontâneas e azevém, e no mês de agosto foi realizada uma dessecação.

No tratamento D não foram feitas outras operações de solo antes da implantação da cultura. Para o E, foi realizada uma escarificação, seguida de uma gradagem para o destorroamento do solo. A escarificação foi feita no dia 10 de outubro de 2014, com escarificador de cinco hastes afastas em 50 cm, operando a uma profundidade de 35 cm. Os blocos de solo de tamanho grande resultantes da mobilização pelo escarificador (Figura 3a) foram destorroados com auxílio de uma grade de dentes (figura 3b), tomando o cuidado para o rodado do trator não compactar a área útil da parcela.



Figura 3 - Solo da área experimental após o processo de escarificação (a) e destorroamento com grade de dentes (b).

O camalhão foi construído no momento da semeadura da soja, sobre as áreas dos tratamentos D e E, previamente preparadas. Foi utilizada uma semeadora do tipo hyper plus camalhoneira, modelo KF 6/4, fabricada pela industrial KF. Esta semeadora forma um camalhão em formato aproximadamente triangular, com 85 cm de base e aproximadamente 12 cm de altura, afastados 15 cm um do outro, e posiciona as sementes nas duas laterais do camalhão, resultando linhas de semeadura afastadas 50 cm (Figura 4).



Figura 4 - Semeadura de soja sobre camalhão com semeadora camalhoneira.

A semeadura foi feita no dia 14 de novembro de 2014, na densidade de 15 sementes por metro linear. A cultivar utilizada foi a Brasmax Tornado RR (6863

RSF), de porte médio, grupo de maturação 6,2 e hábito de crescimento indeterminado. As sementes foram tratadas com Standak Top, molibdênio + cobalto e duas vezes a dose recomendada de inoculante. Essa dose mais elevada de inoculante foi utilizada para introduzir uma população adequada de rizóbios, uma vez que a área não havia sido cultivada com soja e, portanto, não possuía população naturalizada do micro-organismo. Além disso, em áreas de várzea a sobrevivência dos rizóbios no solo é reduzida devido à condição de alagamento (THOMAS et al., 2005; BAILEY-SERRES et al., 2012). A adubação utilizada foi 330 kg ha⁻¹ de fertilizante NPK formulado (4-27-17), conforme a análise de solo (Apêndice A), seguindo as recomendações técnicas (CQFS, 2004).

Os tratos culturais empregados seguiram as recomendações técnicas para a cultura da soja, para o estado do Rio grande do Sul (COSTAMILAN et al., 2012). As plantas daninhas, predominantemente gramíneas, foram dessecadas quando se encontravam com 3 a 4 folhas, com o herbicida glifosato, marca comercial Zapp QI 620, na dose de 3 l ha⁻¹. Foram necessárias três dessecações, pois a emergência das plantas daninhas ocorreu em momentos diferentes. O controle de doenças foi realizado a partir do dia 20 de janeiro, com quatro aplicações de fungicida, espaçadas em 14 dias, até o dia 3 de março de 2014. Os fungicidas utilizados foram: trifloxistrobina + tebuconazol, marca comercial Nativo, na dose de 0,6 l ha⁻¹; azoxistrobina, marca comercial Piori, na dose de 0,2 l ha⁻¹; carbendazim + tebuconazole + cresoxim-metílico, marca comercial Locker, na dose de 1,5 l ha⁻¹. O controle de insetos foi realizado conjuntamente com as duas primeiras aplicações de fungicida, com triflumurom, marca comercial Certero, na dose de 0,05l ha⁻¹ e cipermetrina, marca comercial Cipermetrina Nortox 250 EC, na dose de 0,1 l ha⁻¹.

5.2 Variáveis medidas e calculadas

Para avaliar a modificação física do solo foram medidas as variáveis densidade do solo (D_s), porosidade total (P_t), macroporosidade (M_a), microporosidade (M_i), permeabilidade ao ar (K_a) e condutividade hidráulica de solo saturado (K_s). Para calcular índices de estresse hídrico e por deficiência de oxigênio, a curva de retenção de água (CRA) foi determinada e o conteúdo

volumétrico de água no solo (θ) foi monitorado ao longo do ciclo da cultura. Para avaliar o desempenho das plantas nos diferentes ambientes físicos modificados pelos preparos do solo foram medidas as variáveis: população de plantas, massa da matéria seca da parte aérea e produtividade de grãos. A metodologia usada em cada medição será informada a seguir. Na sequência, são descritos os procedimentos usados nas determinações.

A primeira e segunda coleta de solo foi realizada após a semeadura da soja e na metade do ciclo da cultura, respectivamente. Todas as amostragens foram feitas na entrelinha de cultivo e no centro do camalhão, para as parcelas que receberam esse tratamento. Amostras de solo com estrutura preservada (anéis volumétricos) foram coletadas no centro das camadas de 0 a 10; 10 a 20; 20 a 30 e 30 a 40 cm, após a abertura de uma trincheira em cada parcela. No total, foram coletadas 128 amostras em cada período de coleta.

No laboratório, as amostras foram preparadas (ajuste do solo ao volume do anel e fixação de pano permeável na base do anel com atílio de borracha), saturadas por elevação capilar, pesadas e submetidas às tensões de 10, 60 e 100 cm em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), 330 e 1000 cm em câmaras de Richards (KLUTE, 1986). Após cessar a drenagem em cada tensão, as amostras foram pesadas, submetidas ao teste de permeabilidade ao ar (descrito a seguir) e ressubmetidas à subsequente tensão. Ao final da tensão de 1000 cm, a condutividade hidráulica de solo saturado foi medida (descrita após a descrição da determinação da K_a).

A retenção de água entre as tensões de 5000 e 100000 cm foi obtida pela técnica da psicrometria, com a utilização do aparelho WP4 (DECAGON, 2000), conforme descrito por Klein et al. (2006).

A K_a (cm^2) foi medida em um permeâmetro de carga constante. O princípio da metodologia é baseado na quantificação do fluxo de ar que passa pela amostra de solo, mantendo-se um gradiente de pressão constante. A metodologia e equipamento foram adaptados de Vossbrink (2005). O ar é aplicado à pressão constante e baixa (0,1 kPa), a fim de evitar o fluxo turbulento. A condutividade do ar no solo (K_i) foi calculada usando a equação (1):

$$K_l = \rho_l g \frac{\Delta V l}{\Delta t \Delta p A} \quad (1)$$

Em que: K_l é a condutividade ao ar (cm s^{-1}); ρ_l é a densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3}); g é a aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}); ΔV é a quantidade de ar que passa na amostra na Δt (cm^3); Δt é a variação de tempo (s); l é a altura da amostra (cm); Δp é a pressão do ar que passa pela amostra ($1 \text{ cm de coluna de água} = 1000 \text{ dinas cm}^{-2}$; $\text{Dinas} = \text{g cm/s}^2$); A é a área do cilindro (cm^2).

A densidade do ar foi calculada com a equação 2:

$$\rho_l = \rho_n \left(\frac{T_n p}{p_n T} \right) \quad (2)$$

Em que: ρ_l é a densidade do ar (g cm^{-3}); ρ_n é a densidade padrão do ar ($1,293 \text{ g cm}^{-3}$); T_n é a temperatura padrão ($273,15 \text{ °K}$); p é a pressão atmosférica durante a medida (mbar); p_n é a pressão atmosférica (g cm s^{-2}); T é a temperatura do ar durante a medida (°K).

A partir da condutividade ao ar foi calculada a permeabilidade do solo ao ar (K_a) utilizando a equação 3.

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g} \quad (3)$$

Em que: K_a é a permeabilidade ao ar (cm^2); K_l é a condutividade ao ar (cm s^{-1}); η é a viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$); ρ_l é a densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3}); g é a aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}).

A K_s (mm h^{-1}) foi medida em um permeâmetro de carga constante, com o qual foi determinado o fluxo de água que passa pela amostra de solo quando atingida a condição de equilíbrio dinâmico, sob aplicação de carga hidráulica constante de 2 cm de coluna d'água, conforme descrito por Libardi (2005). A condutividade hidráulica do solo saturado foi calculada pelo rearranjo da equação de Darcy, conforme a equação 4:

$$K_s = \frac{V_l H}{At(H + h)} \quad (4)$$

Em que: V_l é o volume de água que passa pela amostra (mm^3); H é o comprimento da amostra de solo (mm); A é a área da seção transversal da amostra de solo (mm^2); t é o tempo de medição do fluxo de água (h); h é a altura da lamina de água sobre a amostra (mm).

Ao final da medição, as amostras foram colocadas em estufa a 105°C por 48 horas para a determinação da D_s (g cm^{-3}), com a equação 5:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (5)$$

Em que: M_s é a massa de solo seco (g); V é o volume da amostra de solo (cm^3).

A P_t ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foi calculada pela relação entre o conteúdo volumétrico de água na saturação e o volume da amostra; a M_i ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foi calculada pela relação entre o conteúdo volumétrico de água na tensão de 60 cm e o volume da amostra; e a M_a ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foi calculada pela diferença entre P_t e M_i .

A curva de retenção de água (CRA) foi gerada com o conjunto de dados de conteúdo volumétrico de água e respectivas tensões (descrito anteriormente). Ao conjunto de dados foi ajustado o modelo de Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (6)$$

Em que: θ , θ_s e θ_r são conteúdos volumétricos ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) estimado, na saturação e residual, respectivamente; ψ é a tensão aplicada durante a drenagem das amostras (cm); α (cm^{-1}), m , n são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$. Pela dificuldade de se definir o valor de θ_r , ele também foi ajustado a exemplo dos demais coeficientes de ajuste. O ajuste da equação (6) foi realizado com auxílio do suplemento Solver disponível no Microsoft Office Excel.

Juntamente com a primeira coleta das amostras foram instaladas sondas de TDR100 para monitoramento da umidade volumétrica do solo (θ) a intervalos de 30 min. Para isso, foi utilizado um TDR100, ao qual foram conectadas sondas metálicas (19 cm), que foram instaladas nas quatro camadas de todas as parcelas. A constante dielétrica medida pelo TDR100 foi

convertida em θ pela equação de calibração sugerida por Topp et al. (1980), $\theta = -0,053 + 0,0292Ka - 0,00055Ka^2 + 0,0000043Ka^3$. Foram feitas várias verificações a campo e a estimativa de θ com a equação acima era bem próxima de θ medido com coleta de amostras de solo.

O crescimento e a produção da cultura foram relacionados com a frequência dos índices indicadores de DH e DO. Os índices foram calculados por meio da função empírica de Feddes et al. (1978). A função relaciona a tensão da água no solo (ψ) com a taxa de transpiração (λ), que é definida pela relação da transpiração real (Ta) com a transpiração potencial (Tp), isto é, $\lambda = Ta/Tp$. Quando $\lambda = 0$ o estresse é máximo (cessa o crescimento) e quando $\lambda = 1$ o estresse é nulo (as condições para o crescimento são ótimas e as plantas se encontram com os estômatos abertos).

A função considera que $\lambda = 0$ se $\psi < \psi_1$ e se $\psi > \psi_4$, que $\lambda = 1$ se $\psi_2 < \psi < \psi_3$ e que λ varia linearmente entre de 0 e 1 se $\psi_1 < \psi < \psi_2$ ou se $\psi_3 < \psi < \psi_4$ (Figura 5). As tensões ψ_2 e ψ_3 indicam condições hídricas nas quais iniciam o estresse por DO e DH, respectivamente. O valor das tensões ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4 variam entre espécies vegetais e dependem também da demanda transpiratória (Feddes et al., 1978). Neste estudo, ao invés de usar tensão, foram usados valores de conteúdos de água (θ), correspondentes às diferentes ψ , e os θ foram definidos com base em critérios de solo. Optou-se por usar θ porque ele é o resultado direto da medição com o TDR, e porque a conversão de θ para ψ com a equação da CRA pode produzir erros expressivos. Assim, o conteúdo de água na saturação (θ_s) corresponde ao ψ_1 , o conteúdo de água para uma porosidade de aeração (θ_{ar}) de $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ($\theta_{ar} = \theta_s - 0,1$) corresponde ao ψ_2 , o conteúdo de água na tensão de 3000 cm (θ_{fd}) corresponde ao ψ_3 , que é uma aproximação para o que seria um valor de água no solo quando inicia o fechamento estomático da soja (SINCLAIR; LUDLOW, 1986), e o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) corresponde ao ψ_4 . Os valores de θ_{fd} e θ_{pmp} foram calculados usando a equação (6) ajustada aos dados experimentais de cada tratamento, camada e época de coleta (Apêndice B, C, D, E, F, G, H e I).

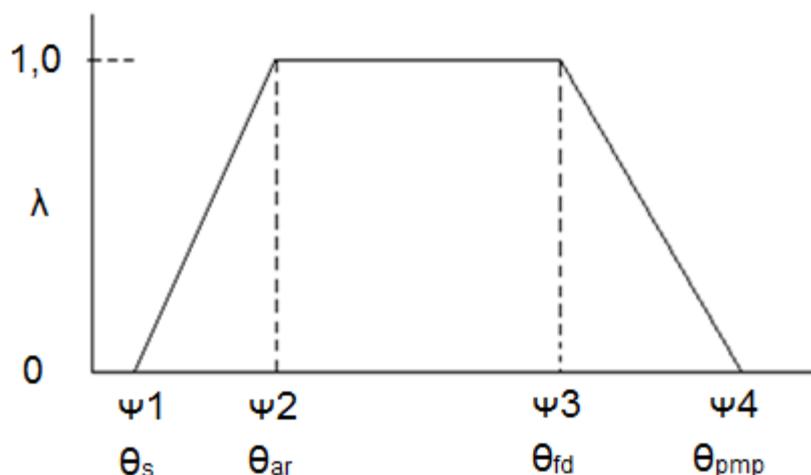


Figura 5 - Relação empírica que descreve a taxa de extração de água pelas raízes (λ) em função da tensão da água do solo (ψ) e seus correspondentes conteúdos de água (θ). Adaptado de Feddes et al. (1978).

O valor de λ para a condição de DO (λ_{DO}) foi calculado pela equação (7):

$$\lambda_{DO} = \left(\frac{1}{\theta_{ar} - \theta_s} \right) (\theta - \theta_s) \quad (7)$$

Em que, θ é o conteúdo de água no solo em cada medição.

O valor de λ para a condição de DH (λ_{DH}) foi calculado pela equação (8):

$$\lambda_{DH} = \left(\frac{-1}{\theta_{pmp} - \theta_{fd}} \right) (\theta - \theta_{pmp}) \quad (8)$$

Para cada camada, os valores de λ de todas as repetições de um mesmo tratamento foram agrupados em uma série contendo, primeiro, os valores de $\lambda = \lambda_{DH}$, depois os valores de $\lambda = 1$ e, por fim, os valores de $\lambda = \lambda_{DO}$. Nessa série, os valores de λ_{DH} foram ordenados em ordem crescente, e os valores de λ_{DO} foram ordenados em ordem decrescente. Com isso, a série ficou constituída pela sequência $\lambda_{DH} \rightarrow \lambda \rightarrow \lambda_{DO}$, com ordenação $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$. Para cada valor particular ($Y = \lambda_{DH}$, ou $Y = 1$, ou $Y = \lambda_{DO}$), foi calculada sua posição percentual (X) na série ordenada. Com isso, foram construídas curvas Y vs X para a análise da permanência e intensidade da DH e DO.

Para a medição da profundidade do lençol freático foram instalados poços de observação, semelhantes aos descritos por Cruciani (1987). No total foram instalados seis poços de observação em todo experimento, distribuídos aleatoriamente. O local para instalação na parcela foi definido fora da área útil de colheita da parcela e afastado um metro do local onde foram instaladas as sondas de umidade. A instalação dos poços de observação foi realizada através da perfuração do solo com trado. No orifício foi inserido um cano de PVC, com furos menores em sua lateral para permitir a entrada da água. Os furos foram revestidos por um filtro de bidim para evitar o entupimento com solo. No espaço entre o cano PVC e o solo foi adicionada areia (Figura 6). Cada poço foi fechado com auxílio de uma tampa, para evitar a entrada de águas superficiais e da chuva.

A profundidade do lençol freático foi medida a cada dois dias durante os meses de dezembro e janeiro. Depois desse período, foram feitas duas medidas por semana quando não ocorria precipitação e uma medida no dia seguinte à ocorrência de uma precipitação.

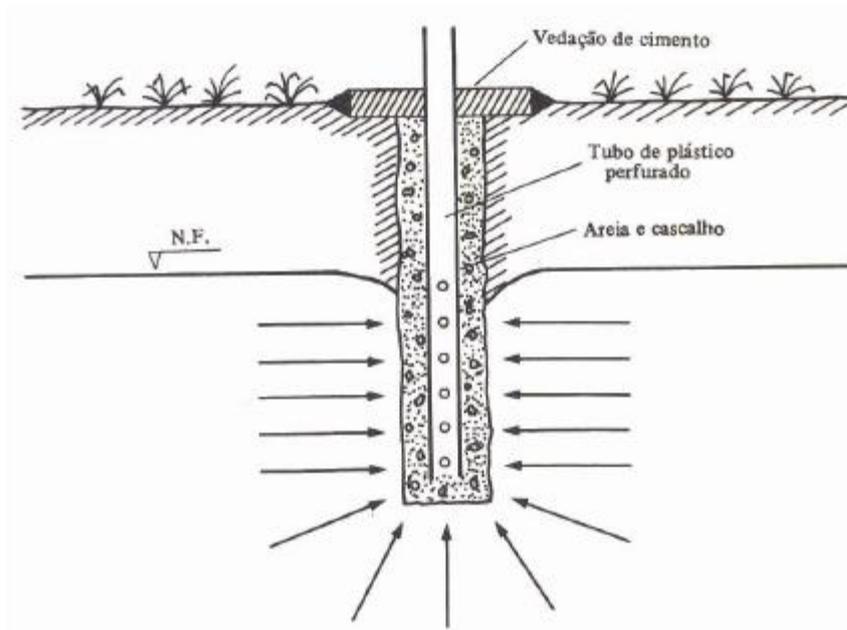


Figura 6 - Esquema de poço de observação. Fonte: Cruciani (1987).

A população de plantas foi determinada aos 30 dias após a semeadura (DAS), por meio da contagem do total de plantas de dois metros lineares em

duas linhas escolhidas aleatoriamente em cada parcela. A massa da matéria seca da parte aérea foi avaliada em plantas de soja nos estádios R3, coletadas em uma área de 1 m² fora da área útil de colheita da parcela, no lado oposto a instalação das sondas de monitoramento de umidade. O material foi colocado em estufa a 65°C e, posteriormente, a massa do material seco foi mensurada.

O rendimento de grãos foi quantificado na maturação da cultura, colhendo-se as plantas de 5 m das quatro linhas centrais da parcela. As duas linhas laterais e uma faixa de 1 m de cada extremidade da parcela foram descartadas para minimizar o possível efeito bordadura. As plantas foram colhidas manualmente e suas vagens debulhadas mecanicamente com trilhadeira acoplada ao eixo cardan do trator.

5.3 Testes estatísticos

Inicialmente, os dados obtidos foram submetidos à análise de distribuição normal, usando o teste de Shapiro-Wilk. Quando não atendido o requisito de normalidade, os dados foram submetidos à transformação logarítmica.

O efeito dos preparos de solo, em cada camada, sobre as variáveis de solo (Ds, Pt, Ma, Mi, Ka, Ks) e sobre as de planta (PP, MS, PR e PG) foi avaliado pela análise de variância e, quando o teste F foi significativo, foi feita a comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Densidade e porosidade do solo

Com base nas medições realizadas na primeira coleta, aos 12 dias após o plantio, verifica-se que o EC e o E modificaram a estrutura do solo diminuindo a Ds e a Mi e aumentando a Pt e Ma, principalmente nas duas primeiras camadas (Tabela 2). Contudo, essas diferenças numéricas nem sempre puderam ser confirmadas como diferenças estatísticas. Estatisticamente, EC foi diferente de D e DC na primeira camada para Ds, Pt e Ma, mas não para a Mi. A microporosidade é pouco afetada por intervenções mecânicas (DRESCHER et al., 2011; PRADO et al., 2014), isso ocorre pois a permanência de agregados maiores, que preservam a estrutura mesmo após o preparo do solo, mantêm a microporosidade do solo. O que também se observa é que o camalhão diminuiu a Ds e a Mi e aumentou a Pt e a Ma, em comparação aos seus valores na camada superficial do respectivo tratamento sem camalhão, porém em magnitudes que não constituíram diferença estatística.

Na segunda coleta, aos 70 dias após o plantio, não houve diferenças significativas entre os tratamentos na primeira camada (Tabela 2). A reconsolidação do solo, após a ocorrência de precipitações, acomodou o solo nos tratamentos E e EC e conseqüentemente aumentou a Ds e reduziu Ma e Pt. Com o passar do tempo, os efeitos da escarificação tendem a desaparecer rapidamente, menos de um ano (REICHERT et al., 2009).

Ao se comparar as camadas, percebe-se que, nos dois períodos de coleta, os tratamentos com escarificação (EC e E) reduziram a Ds e aumentaram a Pt e a Ma da camada mais adensada que havia a 10 - 20 cm e que permaneceu nos tratamentos DC e D, nos quais foi preservada a estrutura adensada do solo causada pelas operações repetidas de gradagem e intenso tráfego de máquinas utilizado nas áreas de arroz irrigado (BAMBERG et al., 2009; MUNARETO et al., 2010; MENTGES et al., 2013).

Na primeira coleta da camada de 20 a 30 cm, apenas a Ma foi maior no EC, em relação ao D, e a Mi foi menor no D em relação ao EC (Tabela 2). Na segunda coleta, a Ma foi maior no tratamento E quando comparado a EC, D e DC. Já a Mi foi menor no E quando comparado aos demais tratamentos. No

entanto, os valores de Ds, Pt, Ma e Mi sofreram poucas alterações nessa camada. Isso indica que a escarificação alterou pouco as propriedades de estado da estrutura do solo abaixo de 20 cm, embora a haste do escarificador tenha atuado até a profundidade 40 cm.

Na camada mais profunda (30 - 40 cm), a haste do escarificador apenas criou uma fissura no solo e pressionou as camadas laterais do solo próximas de onde havia passado a haste. Com isso o EC e o E modificaram as propriedades de estado da estrutura do solo em sentido contrário ao das primeiras camadas, ou seja, o EC e o E aumentaram a Ds e a Mi e diminuíram a Pt e Ma (Tabela 2). O solo estava muito úmido nessa camada no momento da escarificação, devido o nível elevado do lençol freático (35 a 40 cm abaixo da superfície). Em solo na condição de friabilidade, há evidências que não ocorre compactação abaixo da profundidade de atuação do escarificador (MENTGES et al. 2010; ROSA et al., 2011). Porém, a compactação próximo ao limite inferior da haste do escarificador ainda é um tema controverso, em alguns casos a condição de plasticidade do solo promove o amassamento ao invés de romper os agregados do solo, podendo causar aumento da densidade (ROSA et al., 2008).

Tabela 2 - Densidade e porosidade do solo nos diferentes sistemas de manejo.

Coleta*	Camada (cm)	Sistemas de manejo								CV (%)
		EC		E		DC		D		
Densidade do solo (Mg cm ⁻³)										
1 ^a	0-10	1,27	a	1,40	ab	1,48	b	1,52	b	6
	10-20	1,42	a	1,34	a	1,57	b	1,61	b	4
	20-30	1,49	a	1,58	a	1,50	a	1,53	a	4
	30-40	1,61	ab	1,69	b	1,46	a	1,50	a	6
2 ^a	0-10	1,31	a	1,30	a	1,24	a	1,39	a	6
	10-20	1,46	a	1,52	ab	1,55	ab	1,60	b	4
	20-30	1,58	a	1,45	a	1,50	a	1,49	a	4
	30-40	1,62	ab	1,67	b	1,50	ab	1,48	a	6
Porosidade total (cm ⁻³ cm ⁻³)										
1 ^a	0-10	0,53	a	0,49	ab	0,45	b	0,44	b	7
	10-20	0,43	a	0,44	a	0,41	a	0,41	a	6
	20-30	0,44	a	0,42	a	0,45	a	0,43	a	5
	30-40	0,42	ab	0,39	b	0,46	a	0,44	a	6
2 ^a	0-10	0,47	a	0,48	a	0,50	a	0,46	a	7
	10-20	0,44	a	0,43	a	0,41	a	0,39	a	6
	20-30	0,41	a	0,41	a	0,42	a	0,42	a	5
	30-40	0,39	a	0,39	a	0,43	a	0,44	a	6
Macroporosidade (cm ⁻³ cm ⁻³)										
1 ^a	0-10	0,15	a	0,11	ab	0,07	b	0,05	b	40
	10-20	0,06	a	0,07	a	0,03	a	0,04	a	55
	20-30	0,06	a	0,04	ab	0,04	ab	0,03	b	34
	30-40	0,04	a	0,03	a	0,03	a	0,03	a	24
2 ^a	0-10	0,09	a	0,10	a	0,09	a	0,08	a	40
	10-20	0,08	a	0,08	a	0,02	b	0,02	b	55
	20-30	0,04	b	0,08	a	0,02	b	0,02	b	34
	30-40	0,03	a	0,03	a	0,02	a	0,03	a	24
Microporosidade (cm ⁻³ cm ⁻³)										
1 ^a	0-10	0,37	a	0,39	a	0,38	a	0,40	a	6
	10-20	0,38	a	0,37	a	0,38	a	0,37	a	4
	20-30	0,38	a	0,38	a	0,41	a	0,40	a	5
	30-40	0,38	ab	0,35	a	0,43	b	0,41	b	7
2 ^a	0-10	0,38	a	0,38	a	0,40	a	0,38	a	6
	10-20	0,36	a	0,37	a	0,38	a	0,38	a	4
	20-30	0,37	ab	0,34	a	0,40	b	0,40	b	5
	30-40	0,35	a	0,36	ab	0,41	b	0,41	b	7

*A primeira coleta foi realizada aos 12 dias e segunda aos 70 dias após o plantio. Em cada coleta, médias seguidas de mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. CV: coeficiente de variação. DC: semeadura direta com camalhão; D: semeadura direta; E: escarificação e EC: escarificação mais semeadura com camalhão.

6.2 Condutividade hidráulica e permeabilidade ao ar do solo

Com base nas medidas feitas aos 12 e 70 dias após o plantio, verifica-se que o EC e o E aumentaram a K_s , principalmente nas duas primeiras camadas (Tabela 3). Na coleta dos 12 dias após o plantio, verifica-se maiores valores de K_s em relação à coleta dos 70 dias, isso está relacionado com a reconsolidação da estrutura do solo, que diminui o espaço poroso principalmente nos tratamentos que receberam escarificação, como o E e EC (Tabela 2), o que causa redução da K_s (Tabela 3).

Nos tratamentos E e EC a K_a foi maior, com diferença estatística nas primeiras camadas da coleta dos 12 dias após o plantio (Tabela 4). Na segunda coleta, aos 70 dias, não são percebidas diferenças entre os tratamentos. Quando comparados os dois períodos de coleta, a K_a diminuiu nos tratamentos E e EC, enquanto que, no D e DC, principalmente na camada de 0-10 cm, a K_a aumentou na coleta dos 70 dias após o plantio.

Contudo, as diferenças numéricas de K_s e K_a nem sempre puderam ser confirmadas como diferenças estatísticas, pois K_s e K_a são propriedades com grande variabilidade (LIMA et al. 2006; RODRIGUES et al., 2011), cujos CV são relativamente altos (Tabela 3 e 4), o que dificulta a detecção de diferenças pelos testes estatísticos (MESQUITA; MORAES, 2004).

De maneira geral, as diferenças na K_s e K_a são coerentes com as mudanças na porosidade (Tabela 2), ou seja, quanto maior a P_t e a M_a maior a K_s (MESQUITA; MORAES, 2004; PREVEDELLO et al. 2013) e a K_a em uma dada tensão de água (RODRIGUES et al., 2011; PREVEDELLO et al. 2013). Em relação à K_a , verifica-se que o seu aumento com o aumento da tensão é mais pronunciado no EC e E, mas pouco no DC e D (Tabela 4). Experimentalmente verifica-se que a K_a aumenta expressivamente com o aumento da proporção de poros com diâmetro $>300 \mu\text{m}$ (PREVEDELLO et al., 2013), que é uma fração da classe macroporos ($>50 \mu\text{m}$). Assim, é coerente o aumento mais pronunciado da K_a nos tratamentos com escarificação, nos quais há mais macroporos (Tabela 2). Também verifica-se que a drenagem até 100 kPa muda pouco a capacidade de o solo conduzir ar no DC e D, sobretudo

na camada de 10-20 cm (Tabela 4), devido principalmente à baixa quantidade de macroporos nessa camada (Tabela 2).

No DC e no D, a baixa Ks, principalmente da camada 10-20 cm, pode favorecer o encharcamento do solo (FIORI et al, 2010), e as baixas Ka podem causar deficiência de oxigênio para o sistema radicular (VAN LIER, 2001). Devido a isso, a análise da Ks e Ka indica que, pelo menos, nas duas primeiras camadas, o EC e o E diminuiriam a ocorrência e duração do alagamento e da deficiência de oxigênio para a cultura da soja. Contudo, o regime de chuva e, por consequência, o nível do lençol freático podem anular esses benefícios da escarificação.

Tabela 3 - Condutividade hidráulica de solo saturado (Ks) nos diferentes sistemas de manejo.

Coleta*	Camada (cm)	Sistemas de manejo								CV (%)
		EC		E		DC		D		
Ks (mm h ⁻¹)										
1 ^a	0-10	300,6	a	383,8	a	38,9	b	1,8	c	23
	10-20	113,1	a	23,5	a	2,5	b	1,6	b	41
	20-30	147,7	a	1,8	b	9,4	b	13,1	b	52
	30-40	2,2	ab	2,3	ab	1,9	b	12,1	a	56
2 ^a	0-10	220,2	a	53,2	ab	15,4	b	6,3	c	23
	10-20	50,1	a	16,3	a	0,0	a	0,0	a	41
	20-30	13,2	a	1,0	a	2,6	a	3,5	a	52
	30-40	0,1	a	1,8	a	2,1	a	1,9	a	56

*A primeira coleta foi realizada aos 12 dias e segunda aos 70 dias após o plantio. Em cada coleta, médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. CV - coeficiente de variação. DC: semeadura direta com camalhão; D: semeadura direta; EC: escarificado com camalhão; E: escarificado.

Tabela 4 - Permeabilidade ao ar (Ka) nos diferentes sistemas de manejo.

Coleta*	Camada (cm)	Sistemas de manejo								CV (%)
		EC		E		DC		D		
Ka (μm^2) na tensão de 0,6 kPa										
1 ^a	0-10	6,63	a	3,84	a	0,39	b	0,15	b	51
	10-20	1,66	a	0,93	a	0,00	a	0,18	a	100
	20-30	1,19	a	0,14	a	0,05	a	0,04	a	102
	30-40	0,25	a	0,00	a	0,05	a	0,06	a	127
2 ^a	0-10	3,27	a	1,93	a	2,23	a	1,34	a	51
	10-20	2,62	a	4,99	a	0,12	a	0,07	a	100
	20-30	0,43	ab	6,50	a	0,21	b	0,02	b	102
	30-40	0,33	a	0,45	a	0,01	a	0,06	a	127
Ka (μm^2) na tensão de 10 kPa										
1 ^a	0-10	7,67	a	5,42	a	0,47	b	0,21	b	50
	10-20	2,81	a	1,60	a	0,00	a	0,38	a	83
	20-30	2,15	a	0,36	a	0,08	a	0,14	a	73
	30-40	0,61	a	0,17	a	0,12	a	0,21	a	90
2 ^a	0-10	3,31	a	2,70	a	2,59	a	2,10	a	50
	10-20	2,93	ab	5,60	a	0,09	ab	0,07	b	83
	20-30	1,09	ab	7,08	a	0,27	ab	0,02	b	73
	30-40	0,72	a	0,53	a	0,15	a	0,06	a	90
Ka (μm^2) na tensão de 33 kPa										
1 ^a	0-10	8,38	a	5,77	a	0,53	b	0,26	b	48
	10-20	2,24	a	3,06	a	0,00	b	0,53	ab	64
	20-30	2,04	a	0,51	a	0,08	a	0,15	a	58
	30-40	0,95	a	0,19	a	0,14	a	0,25	a	64
2 ^a	0-10	3,50	a	4,22	a	2,47	a	2,19	a	48
	10-20	3,49	a	7,06	a	0,12	b	0,07	b	64
	20-30	0,98	ab	8,11	a	0,27	b	0,09	b	58
	30-40	0,81	a	0,83	a	0,27	a	0,42	a	64
Ka (μm^2) na tensão de 100 kPa										
1 ^a	0-10	7,91	a	8,87	a	0,73	b	0,73	b	43
	10-20	7,62	a	9,14	a	0,12	b	1,79	ab	49
	20-30	5,98	a	1,52	a	0,61	a	0,77	a	34
	30-40	1,88	a	1,08	a	0,70	a	0,60	a	53
2 ^a	0-10	3,94	a	5,72	a	3,71	a	2,48	a	43
	10-20	4,46	ab	9,16	a	0,32	b	0,08	b	49
	20-30	2,32	ab	16,08	a	0,36	ab	0,14	b	34
	30-40	1,31	a	1,81	a	0,32	a	0,77	a	53

*A primeira coleta foi realizada aos 12 dias e segunda aos 70 dias após o plantio. Em cada coleta, médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. CV - coeficiente de variação. DC: semeadura direta com camalhão; D: semeadura direta; EC: escarificado com camalhão; E: escarificado.

6.3 Precipitação, nível do lençol freático e conteúdo de água no solo

A precipitação total durante o período de estudo (dezembro de 2014 a início de abril de 2015) foi de 747 mm (Figura 7). Nos meses de dezembro e janeiro, o acumulado mensal foi de 324 e 190 mm, respectivamente, valor acima da normal climatológica (INMET, 2015) para esses meses (142 e 163 mm, respectivamente). As chuvas foram bem distribuídas em todo período, com menores acumulados no mês de fevereiro (91 mm). Neste mês e no mês de março (142 mm), a diminuição da precipitação possibilitou o rebaixamento do nível médio do lençol freático para profundidades entre 75 e 110 cm de (Figura 7). Nos meses de dezembro e janeiro, de elevada precipitação, o nível médio do lençol freático variou entre 10 e 50 cm na maior parte do tempo, estando por vezes dentro das camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm (Figura 7), comprometendo os benefícios de aeração promovidos pela escarificação.

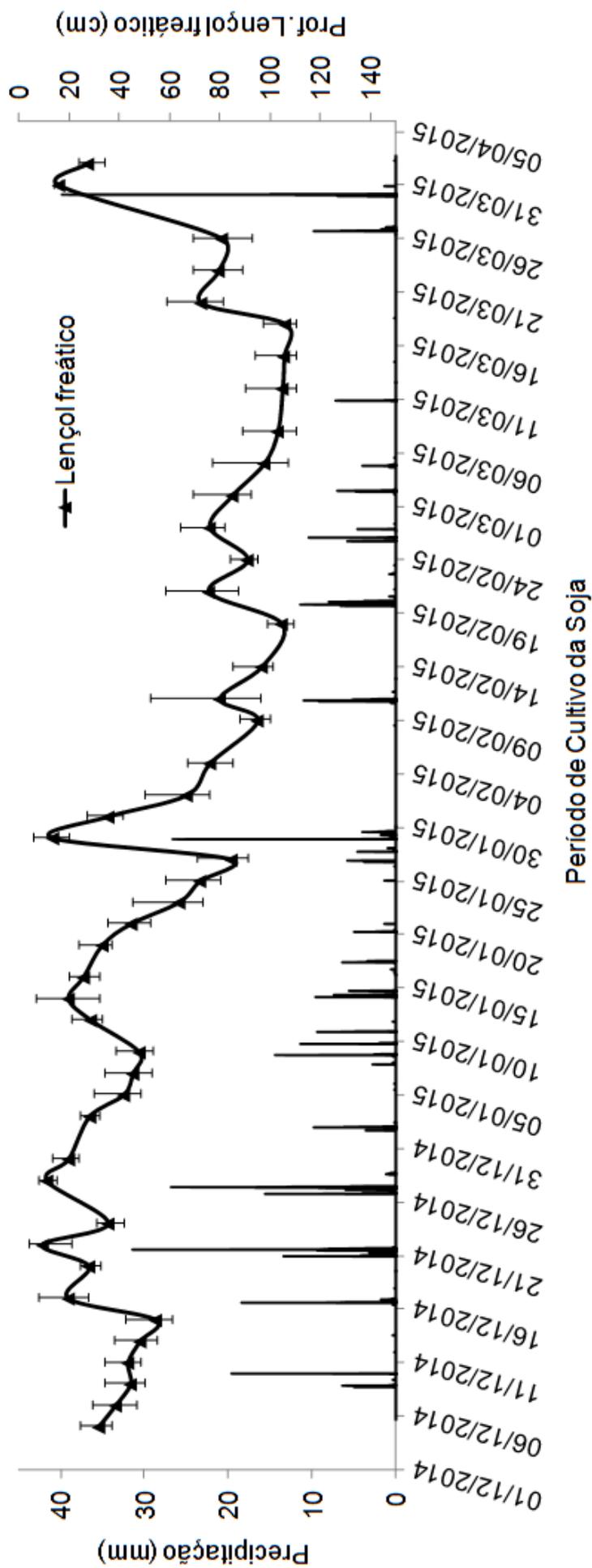


Figura 7 - Precipitação e nível do lençol freático no período de cultivo, de dezembro a início de abril de 2015.

A influência da precipitação e do nível do lençol freático no conteúdo de água do solo (θ) foi mais pronunciada nos tratamentos DC e D, nos quais o θ decresceu mais lentamente após o término de cada precipitação (Figura 8, 9, 10 e 11). Conseqüentemente, no DC e no D, o solo permaneceu com θ próximo ao de saturação (θ_s) na maior parte do tempo, sobretudo nas camadas de 20 - 30 e 30 - 40 cm. A manutenção de elevado θ nessa camada pode estar condicionada à sua baixa condutividade hidráulica do solo, que implica em drenagem lenta após o período de chuva. Esses resultados estão de acordo com os de Ronen et al. (2000), que indicam que a drenagem lenta pode contribuir para elevados θ em uma faixa vertical de 10 cm acima do lençol freático.

Nos meses de fevereiro a março, houve redução do θ e rebaixamento do lençol freático com a diminuição das chuvas, e a redução de θ foi maior no EC e E, em relação ao DC e D. Com o rebaixamento do lençol freático para próximo dos 100 cm, a manutenção de θ elevado nas camadas acima do nível do lençol freático pode ser causada pela ascensão capilar. Para Ronen et al. (2000), esse fenômeno ocorre devido ao arranjo das partículas e a formação de microporos. Assim, nos tratamentos DC e D, a manutenção da condição estrutural que havia antes da semeadura preservou o arranjo dos microporos e pode ter favorecido a ocorrência da ascensão capilar, aumentando o θ , mesmo nas camadas mais próximas da superfície.

Nos meses de janeiro e fevereiro, o θ permaneceu alto também no EC e no E (Figura 8 9, 10 e 11), devido ao nível elevado do lençol freático (Figura 7). Isso indica que os benefícios da escarificação para a drenagem e aeração, em decorrência do aumento da K_s e K_a (Tabela 3), são condicionados pelo nível do lençol freático. Durante esses meses, a única camada que diminuiu o θ , favorecendo o fluxo de ar nos poros foi a camada de 0-10 cm, enquanto as demais camadas permaneceram com θ próximo ao θ_s .

Outra observação interessante é que, mesmo com o aumento da densidade do solo nos tratamento E e EC na camada mais profunda, a haste do escarificador formou um canal que, provavelmente, tenha sido o fator responsável facilitar o escoamento e drenagem da água ao longo do perfil, diminuindo a retenção de água na camada.

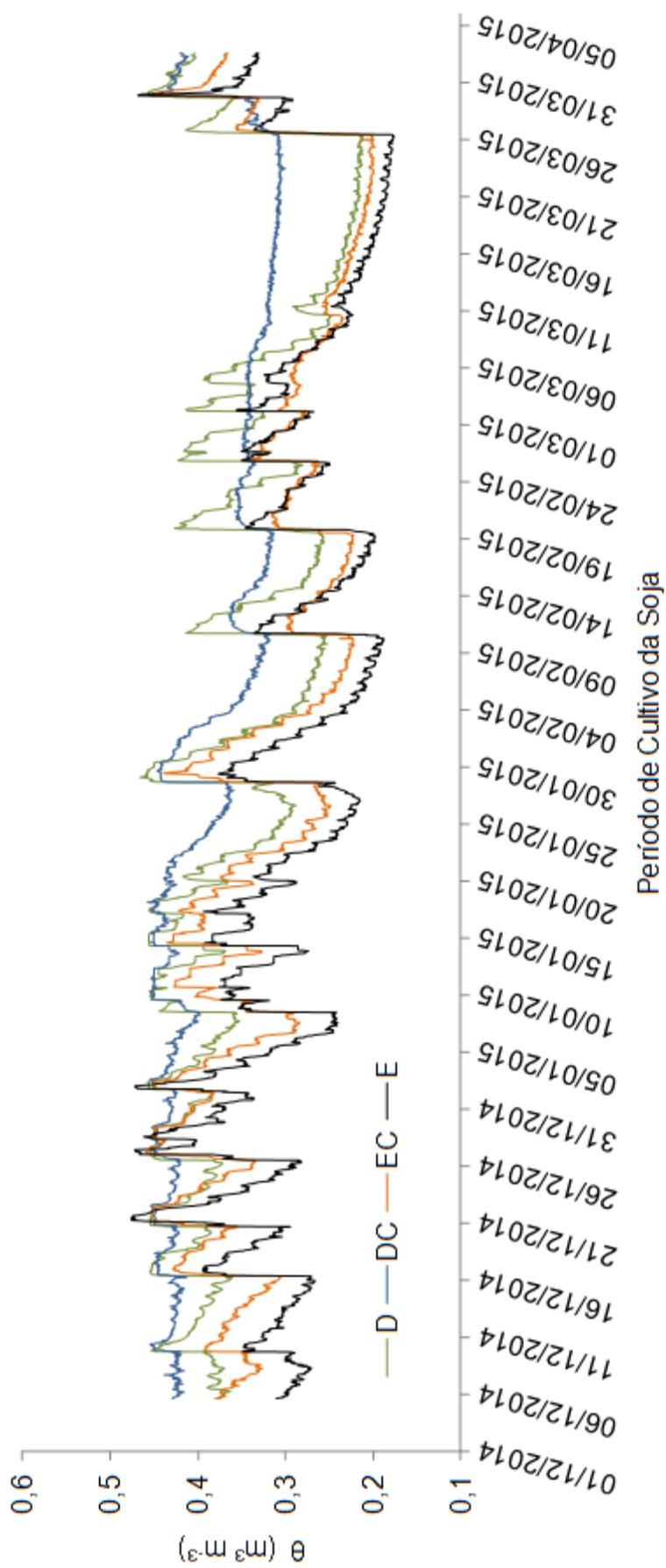


Figura 8 - Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) nos diferentes tratamentos na camada de 0-10 cm ao longo do período de cultivo. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão.

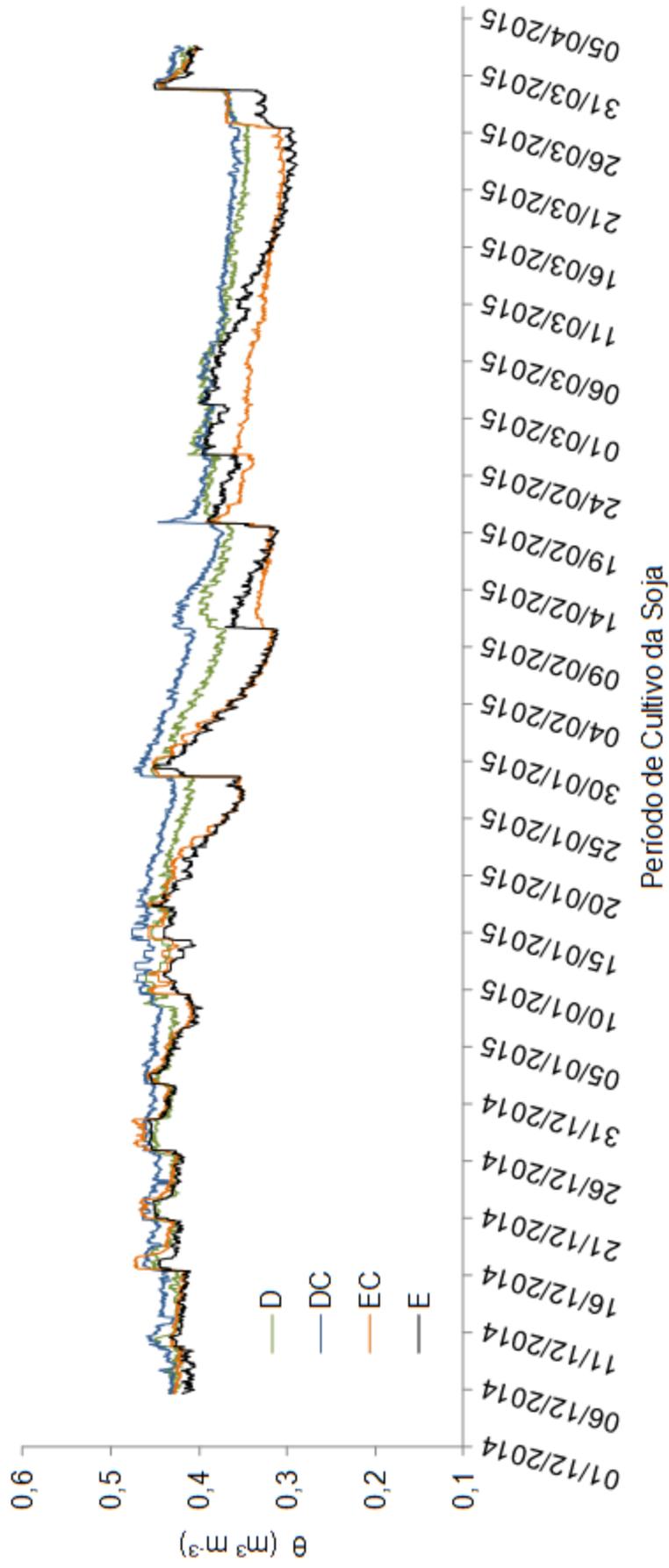


Figura 9 - Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) nos diferentes tratamentos na camada de 10-20 cm ao longo do período de cultivo. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão.

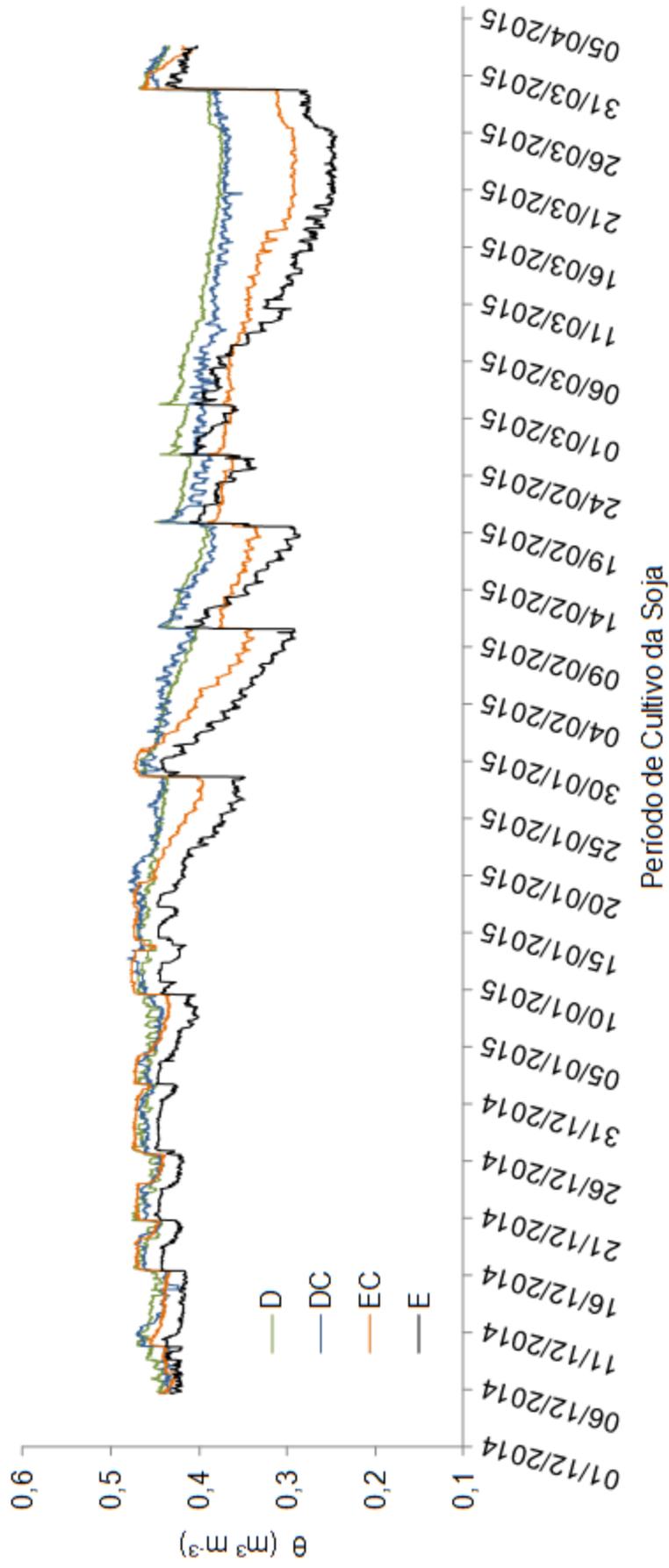


Figura 10 - Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) nos diferentes tratamentos na camada de 20-30 cm ao longo do período de cultivo. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão.

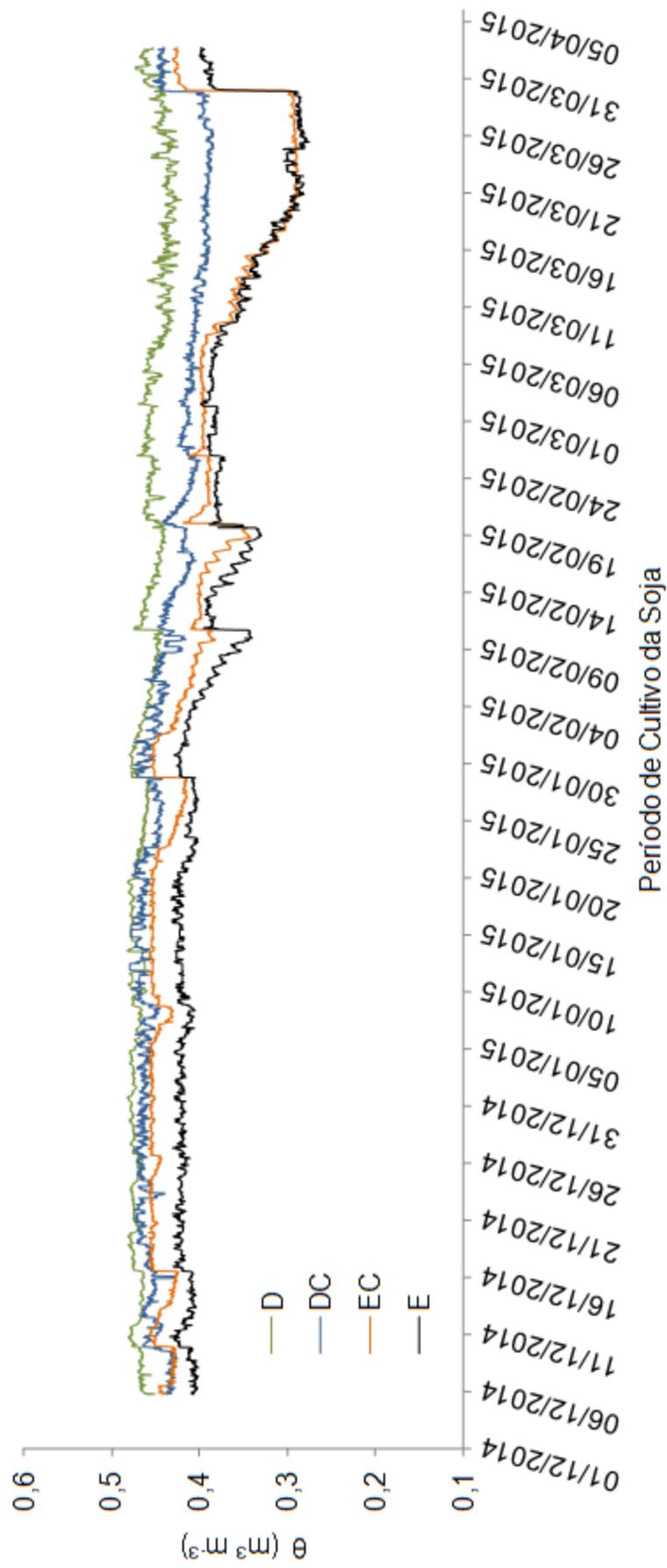


Figura 11 - Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) nos diferentes tratamentos na camada de 30-40 cm ao longo do período de cultivo. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão.

6.4 Indicadores de deficiência hídrica e por oxigênio

Para interpretar os resultados de λ_{DH} e de λ_{DO} é necessário ter claro alguns detalhes da maneira como foram apresentadas as Figuras 12 a 15:

a) as linhas correspondentes ao λ_{DH} estão posicionadas à esquerda na figura; quanto mais para a direita estiverem deslocadas essas linhas maior é a permanência de λ_{DH} e de condições hídricas que indicam ocorrência de DH; a permanência de um dado valor de λ_{DH} é dada diretamente pelo seu correspondente valor X.

b) as linhas correspondentes ao λ_{DO} estão posicionadas à direita na figura; quanto mais para a esquerda estiverem deslocadas essas linhas maior é a permanência de λ_{DO} e de condições hídricas que indicam ocorrência de DO; a permanência de um dado valor de λ_{DO} é dada pela diferença $100-X$ correspondente ao valor de λ_{DO} .

c) para ambos os índices, λ_{DH} e λ_{DO} , quanto mais para baixo estiverem suas linhas (mais próximas de zero) maior é a intensidade de λ_{DH} e λ_{DO} e de condições que indicam ocorrência de DH e DO.

A expectativa era que o EC e o E reduzissem a permanência e intensidade de λ_{DO} e aumentassem a permanência e intensidade de λ_{DH} em relação ao DC e D. Também era esperado que os tratamentos com camalhão, EC e DC, reduzissem a permanência e intensidade de λ_{DO} quando comparados ao E e D, respectivamente.

Na camada 0-10 cm (Figura 12), a permanência (X) de λ_{DH} foi menor que 15 % para todos os tratamentos. A permanência de λ_{DH} diminuiu na ordem EC, E, D e DC. No DC, a menor permanência de λ_{DH} está associada à redução mais lenta do θ nele, em relação aos demais tratamentos. A permanência ($100-X$) de λ_{DO} foi de aproximadamente 60, 50, 35, e 15%, respectivamente para os tratamentos DC e D, EC e E. Em todos os tratamentos, λ_{DO} atingiu o limite que indica máxima DO ($\lambda_{DO} = 0$), devido ao elevado θ principalmente nos meses de dezembro e janeiro (Figura 8). Assim, em vários momentos o solo permaneceu com θ igual ao θ_s , que determina $\lambda_{DO} = 0$. Decorrente da permanência de λ_{DH} e λ_{DO} , a condição ótima ($\lambda=1$) foi de aproximadamente 37, 45, 50, 75 %, respectivamente para os tratamentos D, DC, EC e E (Figura 12).

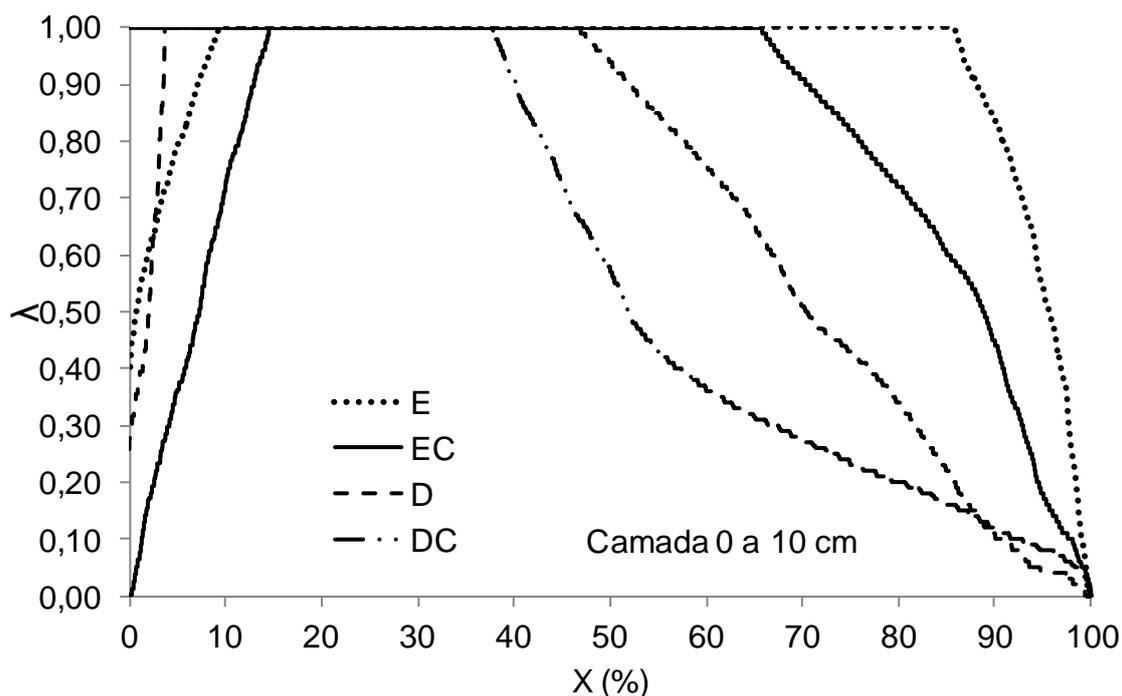


Figura 12 - Relação da permanência (X) de λ_{DH} (linhas à esquerda) e da permanência (100-X) de λ_{DO} (linhas à direita), para a camada de 0-10 cm, nos diferentes tratamentos em todas repetições. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão.

Na camada 10-20 cm (Figura 13), houve permanência (X) de λ_{DH} apenas nos tratamentos que receberam escarificação, com aproximadamente 12 e 3 %, respectivamente para o E e EC. A intensidade de λ_{DH} foi mais acentuada no E quando comparado ao EC. A permanência de λ_{DO} (100-X) foi de aproximadamente 88, 80, 62 e 60%, respectivamente para os tratamentos D, DC, E e EC. Também em todos os tratamentos o λ_{DO} atingiu o limite que indica máxima DO ($\lambda_{DO} = 0$). A permanência de condições ótimas ($\lambda = 1$) foi de aproximadamente 12, 20, 26, 37%, respectivamente para os tratamentos D, DC, E e EC. Comparativamente à primeira camada, verifica-se que na segunda camada diminui a permanência e intensidade de λ_{DH} e aumenta a permanência e intensidade de λ_{DO} . Também verifica-se que os tratamentos se diferenciam menos na segunda camada.

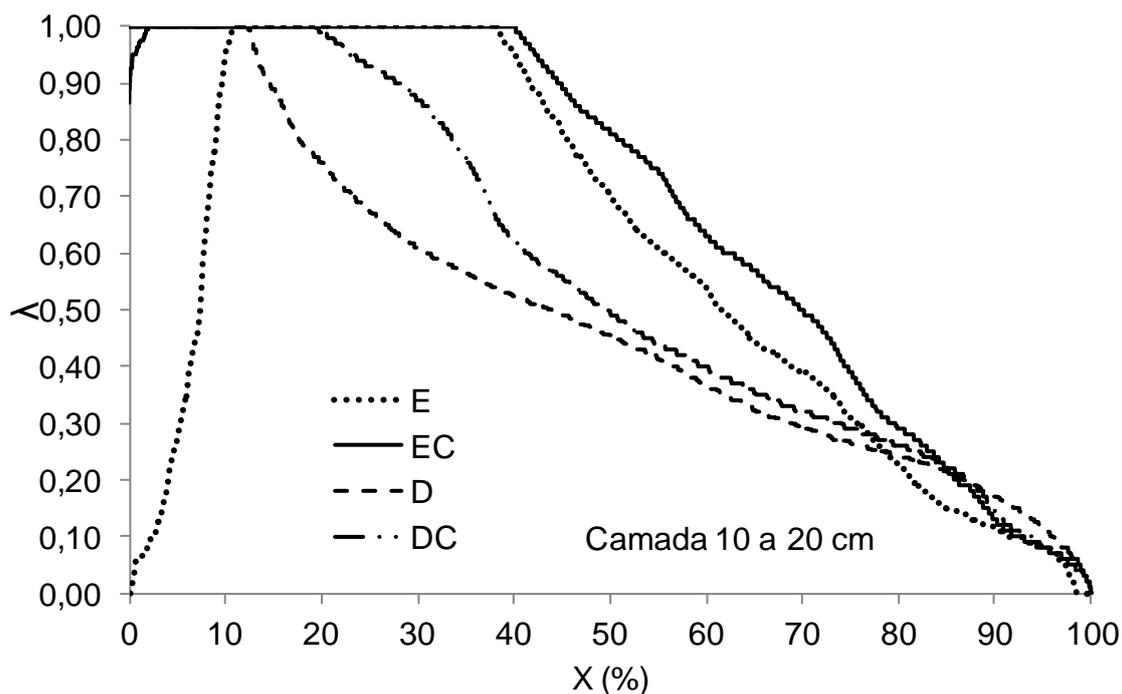


Figura 13 - Relação da permanência (X) de λ_{DH} (linhas à esquerda) e da permanência (100-X) de λ_{DO} (linhas à direita), para a camada de 10-20 cm, nos diferentes tratamentos em todas as repetições. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão.

Na camada 20-30 cm (Figura 14), ocorreu permanência (X) de λ_{DH} em E e EC, de aproximadamente 12 e 3%, respectivamente. No entanto, a permanência de λ_{DO} (100-X) foi de aproximadamente 90, 89, 65 e 62%, respectivamente para os tratamentos D e DC, E e EC. A permanência de condições ótimas ($\lambda=1$) foi de aproximadamente 10, 11, 23, 35%, respectivamente para os tratamentos D, DC, E e EC. Ao se comparar as três camadas, verifica-se que progressivamente diminuiu a permanência e intensidade de λ_{DH} , aumentou a permanência e intensidade de λ_{DO} e diminuiu a permanência de condições ótimas.

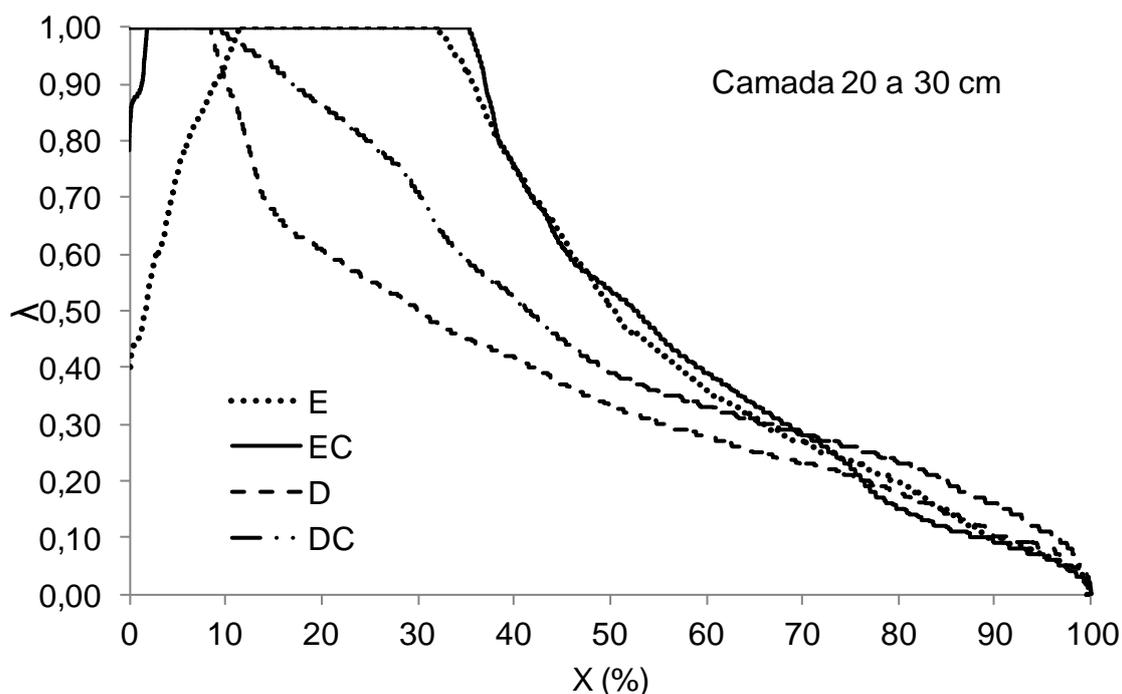


Figura 14 - Relação da permanência (X) de λ_{DH} (linhas à esquerda) e da permanência (100-X) de λ_{DO} (linhas à direita), para a camada de 20-30 cm, nos diferentes tratamentos em todas repetições. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão.

Na camada 30-40 cm (Figura 15), no E e EC verifica-se permanência (X) de λ_{DH} , de aproximadamente 5% para ambos tratamentos. A permanência de λ_{DO} (100-X) foi de aproximadamente 99, 92, 82 e 80%, respectivamente para os tratamentos D e DC, E e EC. A intensidade de λ_{DO} foi semelhante para todos os tratamentos. A permanência de condições ótimas ($\lambda=1$) foi de aproximadamente 1, 8, 13, 15%, respectivamente para os tratamentos D, DC, E e EC (Figura 15).

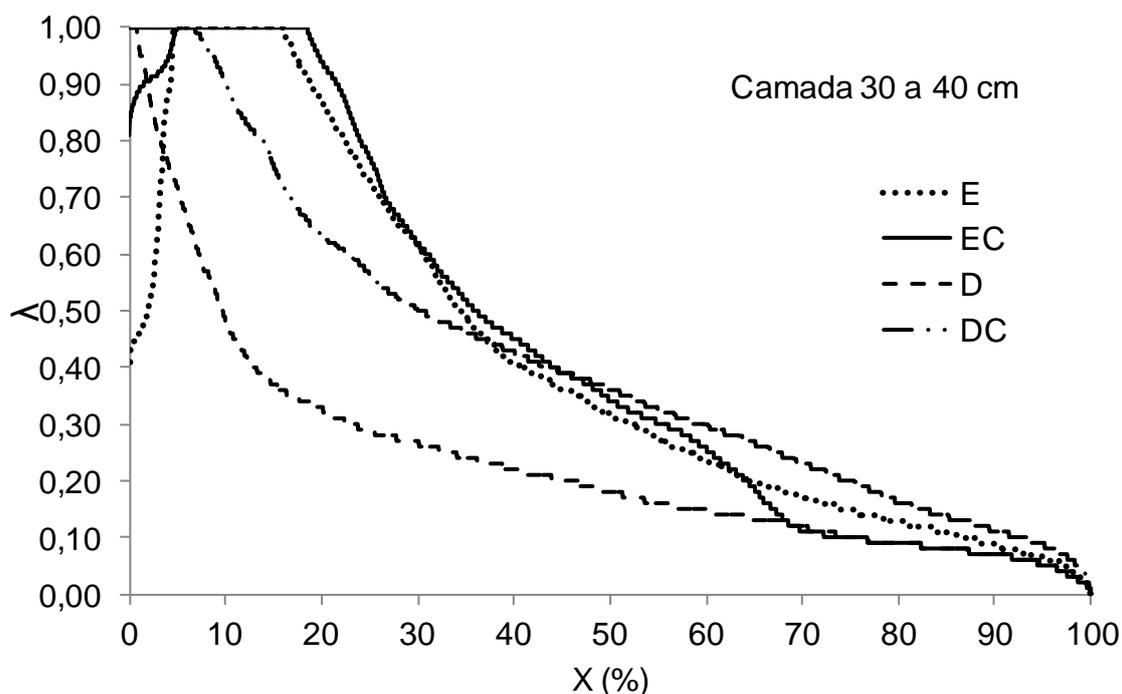


Figura 15 - Relação da permanência (X) de λ_{DH} (linhas à esquerda) e da permanência (100-X) de λ_{DO} (linhas à direita), para a camada de 30-40 cm, nos diferentes tratamentos em todas repetições. D: semeadura direta, DC: direto com camalhão, E: escarificado e EC: escarificado com camalhão.

Os valores de λ_{DH} e λ_{DO} são índices associados com estresse por deficiência hídrica (DH) e por deficiência por oxigênio (DO) no solo, respectivamente. Assim, com base nos resultados, verifica-se que a escarificação (E e EC) modificou a condição estrutural, de retenção e fluxo de água do solo, favorecendo a ocorrência de DH e diminuindo a ocorrência de DO, em comparação aos tratamentos D e DC, como era a expectativa. Para Klein et al. (2008) o aumento do diâmetro de poros proporcionado pela escarificação foi capaz de melhorar as condições físico-hídricas do solo para o desenvolvimento de trigo em períodos de elevada precipitação e excesso de água no solo. Porém, o aumento de macroporos reflete em maior K_s e menor retenção de água no solo, que em situações de pouca precipitação favorece a DH (ABREU et al., 2004).

A formação do camalhão (EC e DC), cujos efeitos podem ser considerados apenas na camada 0-10, não foi eficiente para reduzir a DO, quando comparados aos tratamentos sem camalhão (E e C, respectivamente)

da mesma camada. Nas demais camadas, os tratamentos EC e DC reduziram a DO, quando comparados aos tratamentos E e D, respectivamente. A formação do camalhão resulta uma camada de solo mobilizada de no máximo 12 cm de profundidade. Por isso, não seria de se esperar diferenças entre os tratamentos com e sem camalhão nas camadas abaixo da de 0-10 cm. Contudo, a formação do camalhão eleva a superfície do solo. Conseqüentemente, a posição de amostragem e monitoramento do conteúdo de água nos tratamentos com camalhão fica deslocada para cima, em relação a posição dos demais tratamentos. Nas posições mais elevadas, a estrutura do solo pode ser mais permeável à água (sobretudo na EC), e o lençol freático fica mais distante, o que proporciona melhor aeração (Tabela 2 e 3).

A DH ocorreu principalmente nas camadas até 20 cm, onde a interferência mecânica da escarificação alterou significativamente as propriedades do solo, reduzindo a D_s e aumentando a P_t e a M_a (Tabela 2). Essa modificação na densidade e na porosidade do solo reduz a retenção de água no solo (BEUTLER et al., 2002; REICHERT et al., 2007).

A redução da DO pela escarificação foi mais expressiva na camada até 10 cm, no entanto, também houve uma redução de DO nas camadas 10 a 20 e 20 a 30 cm quando comparado com D e DC. Isso se deve a maior variação no θ nessas camadas (Figura 8, 9, 10 e 11). Além disso, a K_s (Tabela 3) e a M_a (Tabela 2) nas camadas até 30 cm dos tratamentos E e EC foi maior, conseqüentemente a água drena mais rapidamente nesses tratamentos, reduzindo o θ e diminuindo a permanência de condições sem DO. Concordando com os resultados de Klein et al. (2008), onde a escarificação aumentou o diâmetro de poros, proporcionou benefício à drenagem e aumentou o tempo de porosidade livre de água durante o ciclo da cultura, facilitando as trocas gasosas com a atmosfera.

No entanto, a diminuição da DO como um benefício proporcionado pela escarificação está condicionada ao nível do lençol freático e à frequência de chuvas (Figura 7). Uma vez que o lençol próximo da superfície do solo mantém o θ elevado e, assim, proporciona a condição para a ocorrência de DO. Gomes et al (2012) cita que a elevação do lençol freático está condicionado à frequência de precipitações e sua oscilação está relacionada com a estrutura do solo. Mas como o lençol freático permanece próximo à superfície do solo, o

impedimento do fluxo vertical de água no perfil eleva a zona saturada, que ocupa o espaço aéreo sobrejacente (PINTO et al., 1976).

A condição ótima ($\lambda=1$) decresceu consideravelmente com a profundidade, sobretudo nos tratamentos D e DC, e devido, principalmente, ao aumento de condições indicadoras de DO. Isso indica que o sistema radicular tenha ficado mais superficial no D e DC, onde a condição favorável predominou.

6.5 Parâmetros da cultura

A expectativa inicial era que o tratamento EC reduzisse mais a ocorrência de estresses e possibilitaria maior produtividade da soja. Porém, as diferenças de λ_{DH} e λ_{DO} entre EC e E foram pequenas, sem indicar qual o melhor tratamento para reduzir a DO. Por isso, a maior produtividade foi obtida no E (4610 kg ha⁻¹), seguida pelo EC, DC e D (Tabela 5), uma ordenação que indica claramente a presença forte de DO e a importância da escarificação para reduzir a DO. Estes resultados estão de acordo com os verificados por Klein et al (2008) que, ao comparar a produtividade de trigo em um Latossolo Vermelho com escarificação e sob sistema plantio direto, verificaram aumento do rendimento de grãos após a escarificação, em um ano de elevada precipitação.

No tratamento E, o conteúdo de água no solo na camada mais superficial 0-10 cm (Figura 8) decresceu mais rapidamente e reduziu consideravelmente a DO (Figura 12). Isso se deve às melhorias físicas verificadas nesse tratamento, como aumento da M_a , K_s e K_a (Tabela 1 e 2). No entanto, mesmo com as melhorias físicas no solo até 20 cm, o sistema radicular das plantas ficou restrito à camada até 15 cm, com poucas raízes abaixo até 20 cm e nenhuma nas camadas abaixo de 20 cm (Tabela 5). O crescimento limitado do sistema radicular indica ocorrência de estresse por DO que aumenta com a profundidade. Isso indica que a camada superficial é de grande importância para o desenvolvimento da soja em solos de várzea. A DO, altera os níveis metabólicos da soja e, conseqüentemente, altera o sistema radicular, como o desenvolvimento de aerênquima, raízes adventícias e hipertrofia do caule das plantas (PIRES et al., 2002; FANTE et al., 2010). A raiz principal tem um menor

desenvolvimento, e aumenta a quantidade de raízes laterais (PIRES et al., 2002), que ocupam a superfície do solo.

Nos tratamentos E e EC verifica-se maior crescimento da raiz principal da soja, com diferenças estatísticas significativas quando comparado com os tratamentos D e DC (Tabela 5). A elevada condição de umidade na camada superficial afetou o desenvolvimento adequado do sistema radicular da soja, sendo mais agravado nos tratamentos onde a permanência de DO foi mais intensa, com em D e DC.

O tratamento EC produziu em média 600 kg a menos por hectare que E (Tabela 5). Conseqüentemente, a formação de camalhão em solo escarificado não se justificaria, além de aumentar custos e tempo operacional na etapa de formação do camalhão. Com base nas alterações da estrutura do solo (Tabelas 2 e 3) e na dinâmica do conteúdo de água (Figura 8, 9, 10 e 11), a escarificação sem camalhão (E) foi suficiente para melhorar a drenagem, reduzir a condição de estresses por DO e garantir alta produtividade.

No tratamento DC, mesmo com a condição de DO menos favorável na camada superficial (Figura 12), a produtividade e a matéria seca da parte aérea superaram significativamente as do tratamento D (Tabela 5). A condição ótima no tratamento DC foi superior à do tratamento D nas duas primeiras camadas (Figura 12 e 10), uma vez que no tratamento DC não ocorreu DH, somente DO. Esses resultados são concordantes com os de Marchesan et al. (2013), que verificaram que o sistema de microcamalhão proporcionou maior acúmulo de massa seca na parte aérea da soja, entretanto não houve diferença na produtividade das plantas em relação a outros preparos, o que pode ter sido condicionado pelo ano agrícola do estudo que não apresentou excessos hídricos. Já Pilon et al. (2013) constataram que a produtividade do sistema de cultivo com microcamalhão foi superior ao sistema sem microcamalhão. Por outro lado, no presente estudo um dos fatores que limitou a produtividade no tratamento D foi a população de plantas.

Tabela 5 - População de plantas, massa da matéria seca da parte aérea e produtividade de grãos nos diferentes sistemas de preparo do solo.

Sistemas de manejo	População de plantas		Massa da matéria seca		Produtividade		Profundidade da raiz principal	
	Plantas m ⁻²		kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹		cm	
E	21	a	4647,9	a	4610,0	a	13,4	a
EC	22	a	4276,0	b	4001,0	b	15,8	a
DC	21	a	2891,5	c	3565,3	c	9,1	b
D	16	b	1426,1	d	2841,7	d	8,3	b
CV (%)	9,37		7,36		4,90		5,8	

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. CV - coeficiente de variação.

A população de plantas foi significativamente menor no tratamento D (Tabela 4), e esteve associada ao estresse por DO na fase inicial do cultivo. O excesso de chuva no período inicial e a baixa Ks no tratamento D (Tabela 3) favoreceram o encharcamento do solo por várias horas (Apêndice J) e assim provocando a redução da população de plantas. Essa condição reduz o vigor e emergência das sementes e causa morte de plântulas (Wuebker et al., 2001; Githiri et al., 2006). Nos tratamentos EC e E, com alta Ks (Tabela 3), logo após cessar a precipitação toda água infiltrava rapidamente no solo. No tratamento DC a água concentrava no sulco entre os camalhões, drenando lentamente e mantendo uma condição favorável para o desenvolvimento das plântulas sobre o camalhão.

7. CONCLUSÕES

Embora os índices de deficiência hídrica e por oxigênio não tenham sido alterados exatamente da maneira que foi proposto nas hipóteses em todas as camadas, de maneira geral a escarificação diminui a chance de ocorrência de deficiência por oxigênio, mas aumenta a chance de ocorrência de deficiência hídrica. Ambos os efeitos foram condicionados pela profundidade de lençol freático.

A escarificação aumenta significativamente a produtividade da soja em solo de várzea. O uso de camalhão combinado com escarificação não é uma alternativa vantajosa, mas seu uso no plantio direto aumenta a produtividade da soja. Contudo, a combinação de escarificação com camalhão ou a combinação de plantio direto com camalhão altera de forma não muito clara os indicadores de estresse hídrico e por deficiência de oxigênio, em relação à escarificação e plantio direto sem camalhão.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.519-531, 2004

AFFEK, H.P.; RONEN, D.; YAKIR, D. About production of CO₂ in the capillary fringe of a deep phreatic aquifer. **Water Resources Research**, v. 34, p. 989–996, 1998.

BAILEY-SERRES J.; LEE S.C.; BRINTON E. Waterproofing Crops: Effective Flooding Survival Strategies **Plant Physiology**, v.160, pg.1698-1709, 2012.

BAMBERG, A.L.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; TIMM, L.C.; PINTO, L.F.S.; LIMA, A.C.R.; SILVA, T.R. Densidade de um planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1079-1086, 2009.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.681-691, 2010.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p .829-834, 2002

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. ESALQ. Agromensal – **Soja**. Análise Conjuntural, Séries Estatísticas e Gráficos. Disponível em: < http://cepea.esalq.usp.br/agromensal/2015/06_junho/Soja.htm >. Acesso em: julho, 2015.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS. **Manual de adubação e de calagem para os estados do RS e SC**. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2004. 394p.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento safra brasileira de grãos. Safra 2014/15**. Décimo Levantamento Julho/2015 Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/>

15_07_09_08_59_32_boletim_graos_julho_2015.pdf > Acesso em: 25 julho 2015.

CORNELIUS, B.; CHEN, P.; HOU, A.; SHI, A., SHANNON, J.G. Yield potential and waterlogging tolerance of selected near-isogenic lines and recombinant inbred lines from two southern soybean populations. **Journal of Crop Improvement**, v.16, p. 97-110, 2006.

CORREA, M.F. et al. Diferentes Genótipos de Soja Nodulada sob Influência do Alagamento no Acúmulo de Massa Seca. In: **Anais**: 15º Congresso de iniciação científica; 8º Encontro de pós-graduação, 2006, Pelotas. Editora da UFPel, 2006.

COSTAMILAN, L.M.; CARRÃO-PANIZZI, M.C.; STRIEDER, M.L.; BERTAGNOLLI, P.F. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2012/2013 e 2013/2014**. Passo Fundo: Embrapa Trigo (Embrapa Trigo. Documentos, 107), 2012a. 142 p.

CRUCIANI, D. E. **A drenagem na agricultura**. São Paulo: Nobel, 4ª Ed., 1987, 337p.

DALLA ROSA, A. D. **Práticas mecânicas e culturas na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo - solo Santo Angelo (Latosolo Roxo Distrófico)**. Porto Alegre: UFRGS, 1981. 136 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1981.

DECAGON, D. **Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter**. USA, 2000, 70p.

DRESCHER, M.S.; ELTZ, F.L.F.; DENARDIN J.E.; FAGANELLO, A.. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v35, pg.1713-1722, 2011.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Editores: dos Santos H.G. et al. - 3 ed. rev. ampl. – Brasília, 2013.

FANTE, C.A.; ALVES, J.D.; GOULART, P.F.P.; DEUNER, S.; SILVEIRA, N.M. Respostas fisiológicas em cultivares de soja submetidas ao alagamento em diferentes estádios. **Bragantia**, vol. 69, núm. 2, p. 253-261, 2010.

FEDDES, R.A.; KOWALIK, P.J.; ZARADNY, H. **Simulation of field water use and crop yield**. Simulation monographs. Wageningen, Pudoc, 1978. p.189.

FIORI, J.P.O.; CAMPOS J.E.G.; ALMEIDA, L.. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do estado de Goiás. **Geociências**, v. 29, n. 2, p. 229-235, 2010

FIORIN, T.T.; CARLESSO, R.; MICHELON, C.J.; KÜNZ, C.J.; ANDRADE, J.G.D.; SPOHR, R.B. Profundidade do lençol freático em solos de várzea cultivado com milho em camalhões. In: **Anais XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do solo**, Solo: Alicerce dos Sistemas de Produção, Ribeirão Preto, 2003.

FIORIN, T.T.; SPOHR, R.B.; CARLESSO, R.; MICHELON, C.J.; SANTA, C.D.; DE DAVID, G. Produção de silagem de milho sobre camalhões em solos de várzea. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v.2, 2009.

GITHIRI, S. M.; WATANABE, S.; HARADA, K.; TAKAHASHI, R. QTL analysis of flooding tolerance in soybean at an early vegetative growth stage; **Plant Breeding**, v.125, p. 613-618, 2006.

GOMES, A.S.; PAULETTO, E.A.; SOUSA, R.O. Sistemas de Cultivo - Plantio Direto e Cultivo Mínimo em Arroz Irrigado. In: MAGALHÃES JR. A. M; GOMES, A.S.; SANTOS, A.B. **Sistema de Cultivo de Arroz Irrigado no Brasil**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, p. 121-132. 2006.

GOMES, M.A.; LANI, J.L.; COSTA, L.M.; PONTES, L.M.; FIGUEREDO, N.A.; BARDALES N.G. Solos, manejo e aspectos hidrológicos na bacia hidrográfica do araujos, Viçosa – MG. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.1, p.93-102, 2012.

GUBIANI, P.I.; GOULART, R.Z.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v.37, p. 1502-1511, 2013.

GUBIANI, P.I.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v.37, p. 1-10, 2013a.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 364 p.

HOU, F.F.; THSENG, F.S. Studies on the flooding tolerance of soybean seed: varietal differences. **Euphytica**, v. 57, 169-173, 1991.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas do brasil 1961-1990**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: julho, 2015.

IRFAN M.; HAYAT S.; HAYAT Q.; AFROZ S.; AHMAD A. Physiological and biochemical changes in plants under waterlogging. **Protoplasma**, v. 241, p. 3-17, 2010.

JAMES, E.K.; CRAWFORD R.M.M. Effect of oxygen availability on nitrogen fixation by two Lotus species under flooded conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 49, n° 320, p. 599–609, 1998.

JORENUSH, M.H.; SEPASKHAH, A.R. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions. **Agricultural Water Management**, v. 61, p. 125–141, 2003.

KISEKKA, I.; MIGLIACCIO, K.W.; MUÑOZ-CARPENA, R.; SCHAFFER B. Dynamic factor analysis of surface water management impacts on soil and bedrock water contents in Southern Florida Lowlands. **Journal of Hydrology**, v. 488, p. 55-72, 2013.

KLEIN, V.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Água disponível em um latossolo vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.646-650, 2006.

KLEIN, V.A.; VIEIRA, M.L.; DURIGON, F.F.; MASSING, J.P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n-2, p.365-371, 2008

KLUTE, A. Water retention: Laboratory Methods. In: A. KLUTE, ed. **Methods of soil analysis**: Part I-Physical and mineralogical methods. 2 ed. Madison, p.635-662, 1986.

KOWALIK, P.J. Drainage and capillary rise components in water balance of alluvial soils. **Agricultural Water Management**, v. 86, p. 206 – 211, 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advanced in Soil Science.**, 1:277-294, 1985.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo: Edusp, 2005. 335p.

LIMA, C.R.L.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; HARTWIG, M.P.; PASSIANOTO C.C.. Compactação de um planossolo em função de sistemas de manejo. **Revista Brasileira Agrociência**, Pelotas, v. 12, n. 2, p. 179-182, 2006.

LOUZADA, J.A.; CAICEDO, N. & HELFER, F. Condições de drenagem relacionadas ao trânsito de máquinas em solo de várzea (RS-Brasil). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 98 - 106, 2008.

MACHADO, R. L. T.; TURATTI, A. L.; MACHADO, A. L. T.; ALONÇO, A. S.; REIS, Â.V. Estudo de parâmetros físicos em solo de várzea, antes e após a escarificação. **Revista Brasileira de Agrociência.** v.2, n. 3, p.175-178, 1996.

MANZKE, E.M.; MORAES, C.L.; NEBEL, Á. Água disponível em solos de terras baixas da região sul do RS. **Anais. XX Congresso de Iniciação Científica. III Amostra Científica.** 2011. Disponível em: < www2.ufpel.edu.br/cic/2011/anais/pdf/CA/CA_01562.pdf> Acesso em: 15 maio 2014.

MARCHESAN, E.; ARAMBURU, B.B.; VIZZOTTO, V.R.; OLIVEIRA, M.L.; CASTRO, I.A.; TONETTO, F.; GIACOMELI, G. Sistemas de implantação e seus efeitos na resistência mecânica do solo à penetração de raízes e na produtividade de soja em área de várzea. In: **Anais VIII Congresso Brasileiro do Arroz Irrigado**, Santa Maria. Avaliando cenários para a produção sustentável de arroz. Santa Maria: UFSM; Porto Alegre: Sosbai, 2013.

MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; XAVIER, A. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v37, pg.221-231, 2013.

MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; ROSA, D.P.; VIEIRA, D.A.; ROSA, V.T.; REINERT D.J.. Propriedades físico- hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.45, n.3, p.315-321, 2010.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

MILLAR, A. A. **Drenagem de Terras Agrícolas: Bases Agronômicas**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1978. 276 p.

MORAES, M.T.; SILVA, V.R.; ZWIRTES, A.L.; CARLESSO, R. Use of penetrometers in agriculture: A review. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.1, p.179-193, jan./fev. 2014.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, 42p. 1961.

MUNARETO J.D.; BEUTLER A.N.; RAMÃO C.J.; DIAS N. P.; RAMOS P.V.; POZZEBON B.C.; ALBERTO C.M.; HERNANDES G.C. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado por inundação no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.12, p.1499-1506, dez. 2010.

MUNDSTOCK, C.M.; THOMAS, A.L. **Soja**: fatores que afetam o crescimento e rendimento de grãos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 31p. 2005.

NETO, M.B.O.; SILVA, M.S.L. **Gleissolos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, 2011. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7k02wx7ha087apz2kfhpkns.html> Acesso em: 13 fevereiro 2014.

OLDROYD, G.E.D. Dissecting symbiosis: developments in Nod factor signal transduction. **Annals of Botany**: Oxford Journals, v.87, p.709–718, 2001.

PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S. & PINTO, L.F.S. Física de solos de várzea cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JR., A.M., eds. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.119-142.

PAZZIN D. **Comportamento de cultivares de soja cultivadas em solos de várzea submetidas a períodos de excesso hídrico**. Pelotas: UFPel, 2012. 35p. Dissertação Mestrado.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; TURATTI, A.L. & CRESTANA, S. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.709-715, 2001.

PILON, M., ZUGE, E., & FERREIRA, J. L. Avaliação de cultivares de soja semeadas com e sem microcamalhão em rotação com arroz irrigado. In: **Anais VIII Congresso Brasileiro do Arroz Irrigado**, Santa Maria. Avaliando cenários para a produção sustentável de arroz. Santa Maria: UFSM; Porto Alegre: Sosbai, 2013.

PINTO, L.F.S.; GOMES, A.S.; NETO, L.A.J.; PAULETTO, E.A. Solos cultivados com Arroz Irrigado na Região Subtropical: RS e SC. In: MAGALHÃES JR., A. M; GOMES, A. da S.; SANTOS, A. B. (Ed.) **Sistema de Cultivo de Arroz Irrigado no Brasil**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, p. 59-72, 2006.

PINTO, L.F.S.; LAUS NETO, J.A. & PAULETTO, E.A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A.S. & MAGALHÃES JR., A.M., eds. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.75-95.

PINTO, L.F.S.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; SOUSA, R.O. Caracterização de solos de várzea. In: GOMES, A. S.; PAULETTO, E. A. (Ed.). **Manejo de solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa-CPACT, p. 11-36, 1999.

PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia básica**. São Paulo, Edgard Blücher, 1976. 278 p.

PIRES, J.L.F.; SOPRANO, E.; CASSOL, B. Adaptações morfofisiológicas da soja em solo inundado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.41-50, 2002.

PRADO, E.A.F.; GARBIATE, M.V.; VITORINO, A.C.T.; BERGAMIN, A.C.; ENSINAS, S.C.. Efeito da escarificação de um latossolo vermelho em pós colheita de cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, v.37, n.4, Lisboa, 2014.

PREVEDELLO, J.; VOGELMANN, E.S.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J. A funcionalidade do sistema poroso do solo em floresta de eucalipto sob Argissolo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 557-566, 2013.

Reichert J.M.; Kaiser D.R.; Reinert D.J.; Riquelme U.F.B Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, vol.44, no.3, 2009

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. & REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação In: CERRETA, C.A.; SILVA, L.S. & REICHERT, J.M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.v.5. p.49-134.

REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo protótipos e testes. **Ciência Rural**, v.36, p.1931-1935, 2006.

RODRIGUES, S.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; ROSA, J.A. Permeabilidade ao ar em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.35, pg.105-114, 2011.

RONEN, D.; SCHER, H.; BLUNT, M. Field observations of a capillary fringe before and after a rainy season. **Journal of Contaminant Hydrology**, v.44, p.103-118, 2000.

ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; MENTGES, M.I.. Cultivo mínimo: Efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.15, n.11, p.1199–1205, 2011

ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; SATTTLER, A.; REINERT, D.J.; MENTGES, M.I.; VIEIRA, D.A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.395-400, 2008.

ROUGHLEY, R.J.; SIMANUNGKALIT, R.D.M.; GEMELL, L.G.; HARTLEY E.J.; CAIN, P. Growth and survival of root-nodule bacteria in legume inoculants stored at high temperatures. **Soil Biology & Biochemistry**, v.27, n.415, p.707-712, 1995.

SAIRAM, R.K.; KUMUTHA, D.; EZHILMATHI, K.; DESHMUKH, P.S.; SRIVASTAVA, G.C. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. **Biologia Plantarum**. v.52, p.401-412, 2008.

SANTOS, H.G.; ZARONI, M.J. **Planossolos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, 2011. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_14_2212200611542.html> Acesso em: 20 janeiro 2014.

SCHOFFEL, E.T.; SACCOL, A.V.; MANFRON, P.A.; MEDEIROS, S.L.P. Excesso hídrico sobre os componentes do rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 31, n. 1, 2001.

SILVA, C.A.S.; PARFITT, J.M.B. **Drenagem Superficial para diversificação do uso dos solos de várzea do Rio grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. 10 p.

SILVA, J.J.C.; SOUZA, R.M. de; ALMEIDA, J.C.; CORRÊA, R.; RAUPP, A.A.A.; COELHO, R.W.; RODRIGRES, R.C. BASANESI, J.C. Camalhões: **uma opção para o problema de drenagem das Terras baixas na região costeira da Lagoa Mirim**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 36 p, 2002.

SILVEIRA, M. H. D.; KLAR, A. E. Produção de matéria seca e evapotranspiração real da aveia preta (*Avena strigosa* S.) em seis níveis freáticos. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 6, n. 2, p.64-69, abr./mar. 2001.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS, **Vadose Zone J.**, 7:782-797, 2008.

SINCLAIR, T.R.; LUDLOW, M.M. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.13, p.329-340, 1986.

SINKE, A.J.C.; DURY, O.; ZOBRIST, J. Effects of a fluctuating water table: column study on redox dynamics and fate of some organic pollutants. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 33, p. 231–246, 1998.

SOSBAI. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil / XXX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado, 06 a 08 de agosto de 2014, Bento Gonçalves, RS, Brasil. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. Santa Maria, 2014.192 p.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Gleissolo** Háplico. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, 2007. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_95_10112005101956.html> Acesso em: 13 fevereiro 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. Universitat Jaume, 2006.

TAVARES, L.C.; RUFINO, C.A.; BRUNES, A.P.; TUNES, L.M.; BARROS, A.C.S.A.; PESKE, S.T. Desempenho de sementes de soja sob deficiência hídrica: rendimento e qualidade fisiológica da geração F1. **Ciência Rural** vol.43, Santa Maria, 2013

THOMAS, A.L.; GUERREIRO, S.M.C.; SODEK L. Aerenchyma Formation and Recovery from Hypoxia of the Flooded Root System of Nodulated Soybean. **Annals of Botany**. v.96: p. 1191–1198, 2005

THOMAS, A.L.; PIRES, J.L.F.; MENEZES, V.G. Rendimento de grãos de cultivares de soja em solo de várzea. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.6, n.1, p.107-112, 2000.

TOPP, G.C., J.L. DAVIS, AND A.P. ANNAN. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**. v.16 pg.574-582, 1980.

VAN GENUCHTEN, M.TH. A Closed-Form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, 44:892-897, 1980.

VAN LIER, J.Q. Oxigenação do sistema radicular: Uma abordagem física. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, pg.233-238, 2001.

VAN LIER, J.Q.,org. **Física do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. v.1. p.103-152.

VAN TOAI, T.T.; BEUERLEIN, J.E. Genetic variability for flooding tolerance in soybeans. **Crop Science**, Madison, v.34, p.1112-1115, 1994.

VAN TOAI, T.T.; THI, T.C.H.; THI, N.N.H.; NGUYEN, H.T.; SHANNON, J.G.; RAHMAN, M.A. Flooding Tolerance of Soybean [Glycine max (L.) Merr.] Germplasm from Southeast Asia under Field and Screen-House Environments. **The Open Agriculture Journal**, v.4, p.38-46. 2010.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und deformationen in waldböden durch ernteverfahren**. 2005. 107 p. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Kiel.

WUEBKER, E.F.; MULLEN, R.E.; KOEHLER K. Flooding and Temperature Effects on Soybean Germination. **Crop Science**, v. 41, p. 1857-1861, 2001.

ZENZEN, I.L.; AMARANTE, L.; COLARES, D.S.; OLIVEIRA, M.L.; BERNARDI, E.; COSTA, E.L.G.; NASCIMENTO, J.S. Nodulação em Soja Inoculada com Diferentes Estirpes de Bradyrhizobium Sob Alagamento. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, supl. 2, p. 606-608, jul. 2007.

9. APÊNDICE

Apêndice A – Análise química do solo da área do experimento.

Diagnostico para macronutrientes						
Arg (%)	SMP	P ----- mg L ⁻¹ -----	K	K ----- cmolc L ⁻¹ -----	CTC pH 7	M.O. (%)
28	5,8	9,3	100	0,256	14,1	1,7

Diagnostico para acidez do solo e calagem							
pH água	Al	Ca	Mg	H+Al	CTC ef.	Bases (%)	Al (%)
	----- Cmol dm ⁻³ -----						
4,8	1,2	6,1	2,2	5,5	9,8	61,1	12,2

Apêndice B - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento direto com camalhão, primeira coleta aos 12 dias após plantio.

Prof (cm)	α (cm^{-1})	n -	m -	θ_r -----	θ_s -----	θ_{ar} -----	θ_{fd} -----	θ_{pmp} -----
(cm ³ cm ⁻³)								
Repetição 1								
0-10	0,00058	1,34	0,25	0,00	0,485	0,385	0,291	0,184
10-20	0,00081	1,36	0,26	0,00	0,488	0,388	0,289	0,172
20-30	0,00066	1,66	0,40	0,07	0,519	0,419	0,292	0,153
30-40	0,00114	1,33	0,25	0,00	0,507	0,407	0,280	0,170
Repetição 2								
0-10	0,03038	1,19	0,16	0,00	0,536	0,436	0,215	0,157
10-20	0,00069	1,36	0,26	0,00	0,467	0,367	0,291	0,176
20-30	0,00065	1,48	0,32	0,04	0,454	0,354	0,296	0,168
30-40	0,00061	2,49	0,60	0,07	0,419	0,319	0,212	0,084
Repetição 3								
0-10	0,01101	1,21	0,17	0,00	0,477	0,377	0,226	0,162
10-20	0,00075	1,33	0,25	0,00	0,450	0,350	0,284	0,178
20-30	0,00122	1,32	0,24	0,00	0,453	0,353	0,276	0,170
30-40	0,00072	1,60	0,38	0,06	0,447	0,347	0,284	0,150
Repetição 4								
0-10	0,00146	1,29	0,22	0,00	0,482	0,382	0,269	0,174
10-20	0,00084	1,32	0,25	0,00	0,488	0,388	0,288	0,180
20-30	0,00117	1,34	0,25	0,00	0,444	0,344	0,279	0,168
30-40	0,00064	1,63	0,39	0,06	0,488	0,388	0,298	0,156

θ_s é o conteúdo volumétrico na saturação; θ_r é o conteúdos volumétricos residual; $\theta_{ar}=\theta_s-1$; θ_{fd} é o conteúdo volumétrico no $\psi=3000$; θ_{pmp} é o conteúdo volumétrico no $\psi=15000$; α , m , n são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$.

Apêndice C - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento direto, primeira coleta aos 12 dias após plantio.

Prof (cm)	α (cm^{-1})	n -	m -	θ_r -----	θ_s -----	θ_{ar} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{fd} -----	θ_{pmp} -----
Repetição 1								
0-10	0,00044	1,42	0,30	0,02	0,491	0,391	0,298	0,183
10-20	0,00150	1,28	0,22	0,00	0,492	0,392	0,270	0,176
20-30	0,00070	1,47	0,32	0,04	0,487	0,387	0,295	0,167
30-40	0,00070	2,30	0,56	0,06	0,465	0,365	0,204	0,083
Repetição 2								
0-10	0,00209	1,28	0,22	0,00	0,455	0,355	0,259	0,167
10-20	0,00252	1,23	0,19	0,00	0,484	0,384	0,257	0,179
20-30	0,00121	1,30	0,23	0,00	0,505	0,405	0,272	0,173
30-40	0,00091	1,43	0,30	0,02	0,479	0,379	0,281	0,157
Repetição 3								
0-10	0,00585	1,24	0,19	0,00	0,454	0,354	0,239	0,164
10-20	0,00065	1,33	0,25	0,00	0,455	0,355	0,288	0,183
20-30	0,00124	1,31	0,24	0,00	0,446	0,346	0,273	0,172
30-40	0,00099	1,35	0,26	0,00	0,434	0,334	0,289	0,172
Repetição 4								
0-10	0,01175	1,20	0,16	0,00	0,448	0,348	0,233	0,171
10-20	0,00088	1,34	0,25	0,00	0,457	0,357	0,284	0,175
20-30	0,00086	1,45	0,31	0,03	0,454	0,354	0,284	0,158
30-40	0,00072	1,36	0,26	0,00	0,482	0,382	0,290	0,175

θ_s é o conteúdo volumétrico na saturação; θ_r é o conteúdos volumétricos residual; $\theta_{ar}=\theta_s-1$; θ_{fd} é o conteúdo volumétrico no $\psi= 3000$; θ_{pmp} é o conteúdo volumétrico no $\psi=15000$; α , m , n são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$.

Apêndice D - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento escarificado com camalhão, primeira coleta aos 12 dias após plantio.

Prof (cm)	α (cm^{-1})	n -	m -	θ_r	θ_s	θ_{ar}	θ_{fd}	θ_{pmp}
					----- ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) -----			
Repetição 1								
0-10	0,19118	1,16	0,14	0,00	0,463	0,363	0,202	0,155
10-20	0,03718	1,15	0,13	0,00	0,487	0,387	0,224	0,176
20-30	0,00303	1,27	0,21	0,00	0,486	0,386	0,249	0,164
30-40	0,00106	1,36	0,27	0,00	0,495	0,395	0,286	0,166
Repetição 2								
0-10	0,05237	1,18	0,15	0,00	0,411	0,311	0,207	0,155
10-20	0,00216	1,26	0,21	0,00	0,469	0,369	0,258	0,172
20-30	0,01512	1,16	0,14	0,00	0,495	0,395	0,228	0,176
30-40	0,00354	1,32	0,24	0,00	0,494	0,394	0,195	0,118
Repetição 3								
0-10	0,20558	1,16	0,14	0,00	0,484	0,384	0,197	0,152
10-20	0,00130	1,31	0,23	0,00	0,457	0,357	0,269	0,170
20-30	0,00243	1,26	0,21	0,00	0,425	0,325	0,252	0,167
30-40	0,00202	1,36	0,26	0,00	0,426	0,326	0,197	0,113
Repetição 4								
0-10	0,02418	1,18	0,15	0,00	0,489	0,389	0,221	0,165
10-20	0,00112	1,32	0,24	0,00	0,475	0,375	0,275	0,170
20-30	0,00116	1,36	0,26	0,00	0,474	0,374	0,282	0,165
30-40	0,00113	1,34	0,25	0,00	0,445	0,345	0,276	0,167

θ_s é o conteúdo volumétrico na saturação; θ_r é o conteúdos volumétricos residual; $\theta_{ar}=\theta_s-1$; θ_{fd} é o conteúdo volumétrico no $\psi= 3000$; θ_{pmp} é o conteúdo volumétrico no $\psi=15000$; α , m , n são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$.

Apendice E - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento escarificado, primeira coleta aos 12 dias após plantio.

Prof (cm)	α (cm^{-1})	n -	m -	θ_r -----	θ_s -----	θ_{ar} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{fd} -----	θ_{pmp} -----
Repetição 1								
0-10	0,04132	1,16	0,14	0,00	0,450	0,350	0,225	0,174
10-20	0,00142	1,28	0,22	0,00	0,453	0,353	0,271	0,178
20-30	0,00125	1,29	0,23	0,00	0,470	0,370	0,272	0,175
30-40	0,00045	1,28	0,22	0,00	0,469	0,369	0,282	0,199
Repetição 2								
0-10	0,00332	1,28	0,22	0,00	0,459	0,359	0,252	0,161
10-20	0,00069	1,34	0,25	0,00	0,470	0,370	0,292	0,181
20-30	0,00207	1,23	0,19	0,00	0,490	0,390	0,259	0,182
30-40	0,00122	1,50	0,33	0,03	0,505	0,405	0,204	0,109
Repetição 3								
0-10	0,08793	1,16	0,14	0,00	0,462	0,362	0,207	0,159
10-20	0,02712	1,16	0,14	0,00	0,493	0,393	0,225	0,175
20-30	0,00168	1,28	0,22	0,00	0,480	0,380	0,265	0,172
30-40	0,00148	1,47	0,32	0,02	0,431	0,331	0,202	0,107
Repetição 4								
0-10	0,09942	1,15	0,13	0,00	0,456	0,356	0,211	0,167
10-20	0,01931	1,19	0,16	0,00	0,480	0,380	0,226	0,167
20-30	0,00152	1,30	0,23	0,00	0,510	0,410	0,273	0,172
30-40	0,00081	1,88	0,47	0,06	0,464	0,364	0,210	0,098

θ_s é o conteúdo volumétrico na saturação; θ_r é o conteúdos volumétricos residual; $\theta_{ar}=\theta_s-1$; θ_{fd} é o conteúdo volumétrico no $\psi=3000$; θ_{pmp} é o conteúdo volumétrico no $\psi=15000$; α , m , n são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$.

Apendice F - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento direto com camalhão, segunda coleta aos 70 dias após plantio.

Prof (cm)	α (cm^{-1})	n -	m -	θ_r -----	θ_s -----	θ_{ar} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{fd} -----	θ_{pmp} -----
Repetição 1								
0-10	0,01073	1,23	0,19	0,00	0,502	0,402	0,212	0,146
10-20	0,00069	1,38	0,28	0,01	0,483	0,383	0,291	0,174
20-30	0,00063	1,57	0,36	0,06	0,504	0,404	0,285	0,158
30-40	0,00067	1,51	0,34	0,04	0,505	0,405	0,292	0,162
Repetição 2								
0-10	0,04322	1,20	0,17	0,00	0,518	0,418	0,190	0,137
10-20	0,00040	1,54	0,35	0,05	0,459	0,359	0,301	0,176
20-30	0,00061	1,61	0,38	0,06	0,439	0,339	0,292	0,155
30-40	0,00063	2,35	0,57	0,07	0,414	0,314	0,207	0,085
Repetição 3								
0-10	0,01893	1,21	0,18	0,00	0,421	0,321	0,210	0,149
10-20	0,00106	1,35	0,26	0,00	0,441	0,341	0,267	0,159
20-30	0,00043	1,58	0,37	0,06	0,447	0,347	0,300	0,169
30-40	0,00071	1,41	0,29	0,02	0,436	0,336	0,288	0,169
Repetição 4								
0-10	0,02639	1,21	0,17	0,00	0,476	0,376	0,200	0,143
10-20	0,00078	1,34	0,25	0,00	0,488	0,388	0,287	0,176
20-30	0,00086	1,34	0,25	0,00	0,445	0,345	0,280	0,171
30-40	0,00062	1,51	0,34	0,04	0,490	0,390	0,289	0,162

θ_s é o conteúdo volumétrico na saturação; θ_r é o conteúdos volumétricos residual; $\theta_{ar}=\theta_s-1$; θ_{fd} é o conteúdo volumétrico no $\psi=3000$; θ_{pmp} é o conteúdo volumétrico no $\psi=15000$; α , m , n são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$.

Apendice G - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento direto, segunda coleta aos 70 dias após plantio.

Prof (cm)	α (cm^{-1})	n -	m -	θ_r -----	θ_s -----	θ_{ar} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{fd} -----	θ_{pmp} -----
Repetição 1								
0-10	0,00094	1,30	0,23	0,00	0,487	0,387	0,265	0,170
10-20	0,00053	1,54	0,35	0,05	0,484	0,384	0,291	0,166
20-30	0,00075	1,52	0,34	0,04	0,486	0,386	0,284	0,155
30-40	0,00076	1,85	0,46	0,06	0,460	0,360	0,210	0,100
Repetição 2								
0-10	0,06808	1,18	0,15	0,00	0,382	0,282	0,195	0,147
10-20	0,00036	1,62	0,38	0,06	0,445	0,345	0,304	0,172
20-30	0,00065	1,58	0,37	0,06	0,494	0,394	0,286	0,156
30-40	0,00076	1,53	0,35	0,04	0,478	0,378	0,279	0,152
Repetição 3								
0-10	0,00735	1,22	0,18	0,00	0,455	0,355	0,237	0,167
10-20	0,00043	1,47	0,32	0,04	0,453	0,353	0,301	0,180
20-30	0,00059	1,42	0,29	0,02	0,446	0,346	0,291	0,173
30-40	0,00081	1,52	0,34	0,04	0,435	0,335	0,289	0,156
Repetição 4								
0-10	0,02452	1,19	0,16	0,00	0,450	0,350	0,209	0,153
10-20	0,00056	1,37	0,27	0,01	0,444	0,344	0,294	0,180
20-30	0,00066	1,41	0,29	0,02	0,450	0,350	0,277	0,164
30-40	0,00068	1,58	0,37	0,05	0,474	0,374	0,289	0,154

θ_s é o conteúdo volumétrico na saturação; θ_r é o conteúdos volumétricos residual; $\theta_{ar}=\theta_s-1$; θ_{fd} é o conteúdo volumétrico no $\psi=3000$; θ_{pmp} é o conteúdo volumétrico no $\psi=15000$; α , m , n são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$.

Apendice H - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento escarificado com camalhão, segunda coleta aos 70 dias após plantio.

Prof (cm)	α (cm^{-1})	n -	m -	θ_r -----	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{ar} -----	θ_{fd} -----	θ_{pmp} -----
Repetição 1								
0-10	0,00417	1,25	0,20	0,00	0,459	0,359	0,233	0,156
10-20	0,01203	1,19	0,16	0,00	0,470	0,370	0,228	0,167
20-30	0,00246	1,28	0,22	0,00	0,478	0,378	0,252	0,164
30-40	0,00045	1,37	0,27	0,01	0,489	0,389	0,294	0,185
Repetição 2								
0-10	0,10487	1,17	0,14	0,00	0,420	0,320	0,194	0,148
10-20	0,02898	1,18	0,15	0,00	0,477	0,377	0,221	0,166
20-30	0,00070	1,31	0,24	0,00	0,471	0,371	0,284	0,183
30-40	0,00084	1,73	0,42	0,05	0,490	0,390	0,206	0,104
Repetição 3								
0-10	0,01606	1,21	0,17	0,00	0,470	0,370	0,208	0,149
10-20	0,00102	1,30	0,23	0,00	0,449	0,349	0,274	0,176
20-30	0,00101	1,30	0,23	0,00	0,413	0,313	0,284	0,183
30-40	0,00086	1,74	0,42	0,05	0,422	0,322	0,202	0,101
Repetição 4								
0-10	0,01386	1,21	0,17	0,00	0,481	0,381	0,214	0,153
10-20	0,04416	1,15	0,13	0,00	0,462	0,362	0,207	0,163
20-30	0,00076	1,35	0,26	0,00	0,473	0,373	0,282	0,170
30-40	0,00160	1,29	0,22	0,00	0,437	0,337	0,260	0,168

θ_s é o conteúdo volumétrico na saturação; θ_r é o conteúdos volumétricos residual; $\theta_{ar}=\theta_s-1$; θ_{fd} é o conteúdo volumétrico no $\psi= 3000$; θ_{pmp} é o conteúdo volumétrico no $\psi=15000$; α , m , n são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$.

Apendice I - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (α , n , m , θ_r e θ_s) e limites de conteúdo de água no solo usados para calcular os índices de deficiência hídrica e por oxigênio (θ_{ar} , θ_{fd} e θ_{pmp}), para cada camada de solo do tratamento escarificado, segunda coleta aos 70 dias após plantio.

Prof (cm)	α (cm^{-1})	n -	m -	θ_r -----	θ_s -----	θ_{ar} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{fd} -----	θ_{pmp} -----
Repetição 1								
0-10	0,00912	1,19	0,16	0,00	0,447	0,347	0,227	0,167
10-20	0,07851	1,15	0,13	0,00	0,441	0,341	0,217	0,170
20-30	0,02232	1,19	0,16	0,00	0,464	0,364	0,212	0,157
30-40	0,00082	1,36	0,27	0,00	0,469	0,369	0,285	0,169
Repetição 2								
0-10	0,04210	1,20	0,17	0,00	0,445	0,345	0,192	0,138
10-20	0,00257	1,23	0,19	0,00	0,469	0,369	0,257	0,180
20-30	0,04465	1,13	0,11	0,00	0,485	0,385	0,204	0,166
30-40	0,00169	1,33	0,25	0,00	0,496	0,396	0,203	0,122
Repetição 3								
0-10	0,04505	1,18	0,16	0,00	0,452	0,352	0,198	0,147
10-20	0,10046	1,13	0,12	0,00	0,492	0,392	0,192	0,155
20-30	0,29743	1,11	0,10	0,00	0,474	0,374	0,183	0,153
30-40	0,00126	1,51	0,34	0,03	0,444	0,344	0,200	0,106
Repetição 4								
0-10	0,02128	1,21	0,17	0,00	0,469	0,369	0,208	0,150
10-20	0,00106	1,30	0,23	0,00	0,480	0,380	0,276	0,176
20-30	0,00136	1,28	0,22	0,00	0,500	0,400	0,267	0,174
30-40	0,00078	1,86	0,46	0,06	0,461	0,361	0,207	0,099

θ_s é o conteúdo volumétrico na saturação; θ_r é o conteúdos volumétricos residual; $\theta_{ar}=\theta_s-1$; θ_{fd} é o conteúdo volumétrico no $\psi=3000$; θ_{pmp} é o conteúdo volumétrico no $\psi=15000$; α , m , n são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$.

Apêndice J – Encharcamento do solo no tratamento direto após 24 horas da ocorrência da precipitação.

