

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE AGRONOMIA

ISABELA FRIEDRICH RIBAS

DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO

CERRO LARGO
2022

ISABELA FRIEDRICH RIBAS

**DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharel em Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

CERRO LARGO

2022

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Ribas, Isabela Friedrich
DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA SOB DIFERENTES
CONDIÇÕES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO / Isabela Friedrich
Ribas. -- 2022.
93 f.

Orientador: Doutor Douglas Rodrigo Kaiser

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Agronomia, Cerro Largo, RS, 2022.

1. Plantio direto. Escarificação. Produtividade da
soja.. I. Kaiser, Douglas Rodrigo, orient. II.
Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

ISABELA FRIEDRICH RIBAS

**DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharel em Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 04/04/2022.

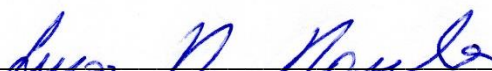
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser - UFFS
Orientador



Prof. Dr. Renan Costa Beber Vieira - UFFS
Avaliador



Doutorando Lucas Raimundo Rauber - UFSM
Avaliador

Dedico este trabalho ao meu pai Joelson
Brum Ribas (*in memorium*), que fez
história através da agricultura enquanto
viveu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pelas bênçãos que rodeiam a mim e todos que amo.

Agradeço aos meus pais, Joelson e Ângela, por me ensinarem os verdadeiros valores, agirem em prol da minha educação e me encorajarem a sonhar alto. Ao meu pai, Joelson Brum Ribas, por ser a minha referência e inspiração. A minha mãe, Ângela Friedrich, por ser minha fortaleza e incentivo.

Agradeço à família Gomes, principalmente à Clotilde de Fátima Teixeira Gomes, por ceder a área para que eu pudesse desenvolver as atividades práticas e me acolher em sua propriedade. Sentimento de gratidão à José Gabriel Pereira Gomes (Juca) que hoje já não está mais entre nós.

Agradeço ao Professor Doutor Douglas Rodrigo Kaiser pelo apoio imensurável. E além, pela confiança em mim e pelas inúmeras vezes em que me incentivou a fazer o meu melhor.

Agradeço ao meu namorado, Jonas Colling, pelo companheirismo e suporte.

Agradeço aos colegas de faculdade que possibilitaram uma ótima convivência acadêmica e pessoal ao longo da faculdade, tornando essa fase memorável. Muito obrigada, em especial, à Eduardo Schepke, Carolina Zimmermann, Nélio Clerici, Thiago Diel, Gabriel Dalcin, Henrique Aimi e Marcos Heck pela amizade construída.

Agradeço à equipe Fertisol pelo auxílio nas atividades e compreensão nos momentos em que estive ausente para me dedicar aos estudos.

Agradeço à Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) por colaborar com o desenvolvimento científico regional e viabilizar a experiência acadêmica com tamanha excelência. Parabéns pelo trabalho a direção do *campus*, em nome do Diretor Bruno Wenzel; os colaboradores, em nome de Francisco Angst; e os professores universitários, em nome do Coordenador Acadêmico do Curso de Agronomia, Douglas Rodrigo Kaiser.

“Mude suas opiniões, mantenha seus princípios.
Troque suas folhas, mantenha suas raízes.”
(Victor Hugo)

RESUMO

A soja (*Glycine max*) dispõe de funcionalidades diversas e é considerada uma importante cultura agrícola na alimentação humana e animal, na fabricação de produtos de origem vegetal e no abastecimento de biodiesel. O Brasil é protagonista diante deste cenário por possuir elevado potencial produtivo. Porém, a pressão sobre os recursos naturais oriunda da adoção de práticas inadequadas de manejo tem gerado insegurança alimentar e redução da biodiversidade. A simplificação do sistema plantio direto provoca a compactação das camadas superficiais do solo, o que prejudica a sustentabilidade dos sistemas produtivos e compromete a produtividade das culturas. O processo de escarificação das áreas de lavoura é realizado com a finalidade de resolução rápida de tais problemas. Sob este contexto, avaliou-se o efeito de diferentes manejos e níveis de compactação do solo sobre os atributos físico-hídricos do solo, bem como o desenvolvimento do sistema radicular e a produtividade da soja. O delineamento utilizado foi blocos ao acaso, sendo cinco blocos e quatro tratamentos: PD – plantio direto; ESC – escarificado; Ci3 – compactação induzida com 3 passadas; e Ci6 – compactação induzida com 6 passadas. O solo foi caracterizado como um Latossolo Vermelho, com teor de argila de 62%. Os manejos adotados possuíram efeitos até os primeiros 20 cm do solo. ESC apresentou efeitos positivos nos atributos físicos do solo, como redução da densidade e aumento da macroporosidade. Contudo, sobre o fator “água”, evidenciou-se malefícios ao escarificar o solo em relação à quantidade de água facilmente drenada, sobretudo. Foram identificados valores críticos de resistência do solo à penetração em todos os tratamentos. O método do perfil cultural permitiu a compreensão dos impedimentos físicos ao desenvolvimento radicular das plantas presentes no solo e evidenciado em todas as condições estudadas. O maior valor de produtividade de soja foi obtido em PD e o menor, em ESC e Ci6.

Palavras-chave: Plantio direto. Escarificação. Produtividade da soja.

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max*) has several functionalities and it's considered an important agricultural crop in human and animal nutrition, in the manufacture of products of plant origin and in the supply of biodiesel. Brazil is the protagonist in this scenario because it has high productive potential. However, the pressure on natural resources arising from the adoption of inadequate management practices has generated food insecurity and reduced biodiversity. The simplification of the no-tillage system causes compaction of the surface layers of the soil, which impairs the sustainability of production systems and compromises crop productivity. The scarification process of crop areas is carried out with the aim of quickly solving such problems. In this context, the effect of different managements and soil compaction levels on the physical-hydric attributes of the soil, as well as the development of the root system and soybean yield, was evaluated. The design used was randomized blocks, with five blocks and four treatments: PD – no-tillage; ESC – scarified; Ci3 – induced compaction with 3 passes; and Ci6 – induced compaction with 6 passes. The soil was characterized as a Red Latosol, with a clay content of 62%. The managements adopted had effects up to the first 20 cm of the soil. ESC showed positive effects on the physical attributes of the soil, such as a reduction in density and an increase in macroporosity. However, on the “water” factor, harm was observed when scarifying the soil in relation to the amount of water easily drained, above all. Critical values of soil penetration resistance were identified in all treatments. The cultural profile method allowed the understanding of the physical impediments to the root development of the plants present in the soil and evidenced in all the conditions studied. The highest soybean yield value was obtained in PD and the lowest in ESC and Ci6.

Keywords: No-tillage system. Scarification. Soybean productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Croqui da área experimental.....	37
Figura 2 - Demarcação das parcelas do experimento.....	37
Figura 3 - Escarificação das parcelas (12/12/20)	38
Figura 4 - Etapa de compactação induzida das parcelas (21/12/20).....	41
Figura 5 - Amostragem estratificada de solo para análise química (04/12/20).....	44
Figura 6 - Semeadura de soja na área experimental (30/12/20)	46
Figura 7 - Medição da RP após a escarificação das parcelas.....	47
Figura 8 - Avaliação da umidade volumétrica do solo com o equipamento TDR	48
Figura 9 - Coleta de amostras de solo com estrutura preservada (16/06/21)	49
Figura 10 - Amostra de solo com estrutura preservada	50
Figura 11 - Amostras de solo saturadas na mesa de tensão	50
Figura 12 - Amostras na Câmara de Richards	51
Figura 13 - Avaliação do sistema radicular de acordo com o Método do Perfil Cultural	52
Figura 14 - Ilustração das faixas de disponibilidade de água	61
Figura 15 - Distribuição radicular da soja em PD	72
Figura 16 - Distribuição radicular da soja em ESC.....	72
Figura 17 - Distribuição radicular da soja em Ci3.....	73
Figura 18 - Distribuição radicular da soja em Ci6.....	73
Figura 19 - Sistema radicular da soja conduzida sob PD.....	74
Figura 20 - Sistema radicular da soja conduzida sob ESC	74
Figura 21 - Sistema radicular da soja conduzida sob Ci6	75
Figura 22 - Sistema radicular da soja conduzida sob Ci3	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Umidade gravimétrica do solo no dia da escarificação (12/12/20)	39
Gráfico 2 - Resistência do solo à penetração no dia da escarificação (12/12/20)	40
Gráfico 3 - Umidade gravimétrica do solo no dia da compactação (21/12/20)	42
Gráfico 4 - Resistência do solo à penetração antes e depois de Ci3 (21/12/20)	43
Gráfico 5 - Resistência do solo à penetração antes e depois de Ci6 (21/12/20)	43
Gráfico 6 - Umidade volumétrica do solo ao longo dos dias após a semeadura da soja	64
Gráfico 7 - Índices pluviométricos durante todo o ciclo da cultura da soja, em dias após a semeadura	65
Gráfico 8 - Lâmina de água disponível no solo até a camada de 20 cm de profundidade	66
Gráfico 9 - Porosidade de aeração do solo sob diferentes condições físico-hídricas avaliadas até a profundidade de 20 cm do solo	67
Gráfico 10 - Resistência do solo à penetração no dia 22/01/2021	68
Gráfico 11 - Umidade gravimétrica do solo no dia 22/01/2021	69
Gráfico 12 - Resistência do solo à penetração no dia 31/03/2021	70
Gráfico 13 - Umidade gravimétrica do solo no dia 31/03/2021	71
Gráfico 14 - Altura de plantas da cultura da soja.....	77
Gráfico 15 - Biomassa vegetal da cultura da soja	78
Gráfico 16 - Número de legumes por planta.....	79
Gráfico 17 – Número de grãos por legume	80
Gráfico 18 - Número de grãos por planta	80
Gráfico 19 - Produtividade da soja	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área plantada de soja, produção (em 1.000 t) e produtividade (em kg ha ⁻¹) de grãos de soja no Brasil nas safras de 19/20 e 20/21.....	24
Tabela 2 - Dados da análise química do solo da área experimental	45
Tabela 3 - Propriedades físico-hídricas do solo sob as diferentes condições avaliadas	54
Tabela 4 - Retenção de água no solo (cm ³ cm ⁻³) em diferentes potenciais matriciais para distintas camadas de solo sob as condições de manejo e níveis de compactação avaliados	59
Tabela 5 - Faixas de disponibilidade de água em camadas estratificadas e ao longo do perfil do solo	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFFS	Universidade Federal da Fronteira Sul
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
SPD	Sistema plantio direto
ESC	Escarificado
Ci6	Compactação induzida com 6 passadas
Ci3	Compactação induzida com 3 passadas
CC	Capacidade de campo
PMP	Ponto de murcha permanente
N	Newton
MPa	Megapascal
kPa	Quilopascal
Mg	Megagrama
ton	Tonelada
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
DAS	Dias após a semeadura
RP	Resistência do solo à penetração
Pt	Porosidade total
Mi	Microporosidade
Ma	Macroporosidade
Ds	Densidade do solo
GC	Grau de compactação
Pa	Porosidade de aeração
U _g	Umidade gravimétrica do solo
CAD	Capacidade de água disponível no solo
MO	Matéria orgânica do solo

LISTA DE SÍMBOLOS

- Subtração
- + Soma
- θ Umidade volumétrica do solo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
3.1	CULTURA DA SOJA.....	20
3.1.1	Características botânicas.....	20
3.1.2	Usos	21
3.1.3	Exigências edafoclimáticas para o cultivo	21
3.1.3.1	<i>Temperatura do ar e do solo.....</i>	21
3.1.3.2	<i>Fotoperíodo.....</i>	21
3.1.3.3	<i>Disponibilidade hídrica.....</i>	22
3.1.3.4	<i>Condições do solo</i>	23
3.2	ÁREA CULTIVADA, RENDIMENTO DE GRÃOS E PRODUÇÃO DE SOJA	24
3.3	ADOÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO (SPD).....	25
3.4	EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO SOBRE OS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO	27
3.4.1	Densidade do solo	28
3.4.2	Porosidade do solo.....	29
3.4.3	Resistência do solo à penetração	30
3.4.4	Retenção, disponibilidade e fluxo de água no solo	31
3.4.5	Aeração do solo	32
3.5	INFLUÊNCIA DO MANEJO DO SOLO SOBRE ÀS PLANTAS.....	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL.....	36
4.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	36
4.3	IMPLANTAÇÃO DA CULTURA DA SOJA E TRATOS CULTURAIS	44
4.4	AVALIAÇÕES NO SOLO	46
4.5	AVALIAÇÕES NAS PLANTAS.....	51
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	53

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1	PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO	54
5.1.1	Densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e grau de compactação	54
5.1.2	Curva de retenção de água e faixas de disponibilidade de água	59
5.2	DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO AO LONGO DO CICLO DA SOJA	63
5.3	RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO	68
5.4	DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DA SOJA.....	71
5.5	ALTURA DE PLANTAS DA SOJA	76
5.6	BIOMASSA VEGETAL DA SOJA	77
5.7	RENDIMENTO DA CULTURA DA SOJA.....	79
5.7.1	Componentes do rendimento	79
5.7.2	Produtividade	81
	CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda mundial de alimentos, fibras e biocombustíveis tem levado a necessidade de aumentar a produção agrícola em 60% até o ano de 2050, de acordo com relatório da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO). Este aumento da produção agrícola pode ser obtido pela ampliação das áreas cultivadas e pelo incremento na produtividade. No entanto, a pressão sobre os recursos naturais e a utilização de práticas de manejo inadequadas já tem acarretado a degradação de 33% dos solos do mundo, o que compromete as funções ecossistêmicas do solo, aumenta a insegurança alimentar, reduz a biodiversidade e compromete os recursos hídricos. Diante deste cenário, a melhoria das práticas de uso e manejo do solo se torna essencial para a sustentabilidade da agricultura.

O Brasil se destaca mundialmente na produção agrícola e é responsável por atender grande parte da demanda atual e futura de alimentos. Essa posição só foi atingida ao longo dos anos através de investimento em pesquisa e aplicação das informações geradas pelos agricultores nos diversos sistemas de produção. O Brasil apresenta uma grande diversidade de solos com aptidão agrícola e ocupa apenas 30% do seu território com agricultura (7%) e pecuária (23%) e tem potencial de aumentar significativamente a produtividade agrícola.

A soja é a principal cultura agrícola produzida e ocupa 38,51 milhões de hectares no território nacional, sendo 6,06 milhões de hectares no Rio Grande do Sul (RS) (CONAB, 2021). A produtividade média de soja no RS (3.330 kg ha^{-1}) é considerada baixa, em relação ao restante do país, bem como ao potencial que a cultura apresenta atualmente. Entre os fatores que podem comprometer a produtividade da cultura, salienta-se o manejo do solo, pois este interfere na disponibilidade de água e nutrientes que são essenciais para a cultura expressar o seu potencial produtivo.

O plantio direto é o sistema de manejo predominante para a produção de grãos no Rio Grande do Sul. Quando este sistema segue todas as suas premissas, é promovida a melhoria da qualidade química, física e biológica do solo e ocorre o incremento gradual na produtividade das culturas agrícolas ao longo do tempo. Contudo, nos últimos anos ocorreu a chamada simplificação do sistema plantio direto (SPD), principalmente pela falta de rotação e diversificação de culturas, o que levou a

menor produção de resíduos vegetais e de raízes, diminuindo a atividade biológica do solo, reduzindo os estoques de matéria orgânica e tornando o solo mais suscetível à erosão e à compactação.

A simplificação do SPD é, também, evidenciada em uma das maiores regiões produtoras de soja do estado gaúcho: região das Missões. Em estudo realizado nesta área, ao efetuar o diagnóstico da condição física dos solos em propriedades rurais de 32 municípios, observou-se que 69,6% destas possuíam índices de compactação acima do nível crítico na camada de 7 a 14 centímetros (FIORIN; SCHNELL; RUEDELL, 2007).

Os reflexos da compactação do solo constituem-se como um fator limitante ao rendimento de grãos pois afeta diretamente os atributos físicos do solo, responsáveis por gerar um ambiente favorável ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Assim, em muitas propriedades, adotou-se como solução rápida para descompactação do solo a escarificação, operação na qual as camadas compactadas são rompidas, favorecendo o ambiente para penetração e alongamento das raízes.

Como a compactação do solo é um problema comum nas lavouras missioneiras, torna-se necessário compreender como os diferentes níveis de compactação do solo afetam as propriedades físico-hídricas do solo e a produtividade da soja, esta considerada a principal cultura agrícola da região. Ademais, é imprescindível avaliar a eficiência da escarificação sobre estes atributos, associada ao desempenho da cultura da soja. Isto porque, esta prática tem sido frequentemente utilizada pelos agricultores, mesmo sem comprovação da sua eficácia na melhoria da condição física do solo e incremento em rendimento por meio de pesquisas locais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito de diferentes manejos e níveis de compactação do solo sobre os atributos físico-hídricos do solo, bem como o desenvolvimento do sistema radicular e a produtividade da cultura da soja.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Monitorar a umidade do solo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de compactação do solo ao longo do ciclo da cultura da soja;

- Avaliar o efeito de diferentes sistemas de manejo e níveis de compactação sobre a resistência a penetração, densidade, distribuição de poros e condutividade hidráulica ao longo do perfil do solo explorado pelas raízes da soja;

- Avaliar a distribuição do sistema radicular relacionando-a com a produtividade da cultura da soja sobre as diferentes práticas de manejo do solo propostas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CULTURA DA SOJA

3.1.1 Características botânicas

A cultura da soja (*Glycine max* L.) é originária da costa leste da Ásia e no decorrer do processo de domesticação adquiriu características diferentes das plantas selvagens. Primeiramente, as plantas eram rasteiras e com caule híspido, de acordo com a Embrapa Soja. Após cruzamentos naturais entre as espécies e ação antrópica, a soja aumentou o número de ramificações e passou a produzir maior quantidade de grãos, favorecendo o seu cultivo. Já a estatura das plantas varia de 60 a 110 centímetros e o seu crescimento pode ser tanto determinado como indeterminado (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

Pertencente à família Fabaceae, a soja é uma leguminosa de folhas trifolioladas, exceto o primeiro par (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Realiza fecundação autógama e possui flores que variam da cor branca à roxa. Desenvolve vagens que, ao amadurecer, tornam-se amarronzadas, podendo conter de uma a cinco sementes por legume. Além disso, a soja é uma planta de dia curto, ou seja, o estágio de florescimento ocorre a partir do momento em que as noites se tornam mais longas; é capaz de atrasar a floração caso o dia seja alongado, retardando seu ciclo produtivo.

A soja possui sistema radicular pivotante positivamente gravitrópico, cujo crescimento varia de 2,5 a 5 cm dia⁻¹ sob condições favoráveis de elementos essenciais, como água e oxigenação do solo (TERUEL, 1999). A raiz principal é capaz de penetrar mais de 150 cm de profundidade, entretanto, é válido ressaltar que sob compactação do solo, a penetração radicular é dificultada, concentrando-se nas camadas superficiais do solo (TERUEL, 1999). Ainda, pela circunferência da raiz pivotante, as raízes laterais emergem em ângulos de 90°. Existem, também, as raízes basais, originadas nos primeiros centímetros da principal e mais grossas que as laterais; ainda, estas crescem em ângulos característicos de cada cultivar.

3.1.2 Usos

A cultura da soja possui inúmeras funcionalidades, sendo importante na alimentação humana, animal e na fabricação de produtos de origem vegetal em função da sua característica calórico-proteica. É considerada a proteína de origem vegetal de melhor custo-benefício para a produção de carnes, ovos, leites e derivados, de acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Soja (Aprosoja Brasil). Além disso, a soja é amplamente utilizada nas cozinhas de todo o mundo, seja como óleo, farinha ou composição de outros pratos. Também é constituinte de rações animais e utilizada como farelo. Além de ser útil na produção de biodiesel para abastecimento de carros, caminhões, ônibus e outros veículos de motor ciclo Diesel.

3.1.3 Exigências edafoclimáticas para o cultivo

3.1.3.1 Temperatura do ar e do solo

Associados a disponibilidade hídrica, a temperatura e o fotoperíodo são os elementos climáticos que mais afetam o desenvolvimento e a produtividade da cultura da soja (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Com relação à temperatura, a soja se adapta melhor à regiões que variam de 20 a 30°C, especialmente, sob condição de 30°C (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). O crescimento da soja é nulo a temperaturas inferiores a 10°C. Além disso, temperatura do solo abaixo de 20°C é prejudicial à germinação e emergência, o que inviabiliza seu cultivo em zonas muito frias (FARIAS *et al.*, 2008).

3.1.3.2 Fotoperíodo

A cultura da soja é uma planta de dia curto; sendo assim, acima do fotoperíodo crítico que corresponde a quantidade de luminosidade diária máxima, o florescimento é retardado (FARIAS *et al.*, 2008). Sabe-se, também, que “cultivares que apresentam a característica “período juvenil longo” possuem adaptabilidade mais ampla” no que

diz respeito à latitude e época de semeadura (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007, p. 4). Além disso, a sensibilidade a este fator depende da variedade escolhida pelo agricultor (EMBRAPA SOJA, 2008). Este é um aspecto relevante por ser capaz de restringir a adaptação mais ampla da cultura da soja.

3.1.3.3 Disponibilidade hídrica

No sul do Brasil, principalmente, a disponibilidade hídrica é tida como a causa da variabilidade do rendimento de grãos de um ano para o outro (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Para exemplificar, o período de seca nos anos 2004 e 2005 gerou a diminuição da produtividade de soja em 78% no Rio Grande do Sul; este caso, associado ao cenário semelhante no Paraná no mesmo período, foi “responsável por mais de 80% das perdas totais na produção brasileira de soja para a safra 2004/2005” (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007, p.4).

A água desempenha diversas funções essenciais à planta, porém a presença deste elemento em quantidades adequadas nas fases de germinação e emergência, bem como no florescimento e enchimento de grãos é imprescindível (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Inclusive, a necessidade hídrica máxima ocorre durante a floração-enchimento de grãos, requerendo de 7 a 8 mm diários de água.

A dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera se dá em função da demanda evaporativa e absorção radicular afim de que o equilíbrio seja mantido. Isto posto, Farias, Nepomuceno e Neumaier (2007, p. 6) esclarecem:

Em regiões com distribuição irregular das chuvas e elevada demanda evaporativa da atmosfera (caracterizada pela ocorrência de elevada radiação solar, ventos fortes, altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar), a disponibilidade hídrica no solo passa a ser fundamental para assegurar sucesso à exploração agrícola, principalmente, na ausência de irrigação.

Ademais, a semeadura das culturas de interesse agrônômico respeitando o zoneamento agrícola para determinada região é uma prática que auxilia o conhecimento acerca das condições de oferta e demanda hídrica, além de diminuir os riscos climáticos durante o ciclo.

3.1.3.4 Condições do solo

Solos profundos e bem drenados são considerados propícios ao cultivo da cultura da soja, além de possibilitar um melhor desenvolvimento às plantas quando de textura argilosa. Entretanto, na última década, por influência de diversos fatores como liquidez de mercado e baixa necessidade de mão de obra, a soja passou a ocupar áreas que possuem baixos teores de argila, sendo, inclusive, inferiores a 20% (FRANCHINI *et al.*, 2016). As problemáticas de solos arenosos são, em especial, a elevada suscetibilidade à erosão e baixa retenção de água, o que pode afetar o crescimento desta leguminosa. Estudos vêm sendo realizados e, talvez, tecnologias futuras poderão adequar o cultivo de soja em regiões de solos arenosos, porém, são necessários diversos ajustes nas práticas de manejo e avanço da biotecnologia, sobretudo.

Os custos com fertilizantes (NPK) e ureia podem representar mais da metade das despesas das lavouras na região das Missões. Por isso, é importante a compreensão destes requisitos para obtenção do maior custo-benefício possível. Não se recomenda adubação nitrogenada na cultura da soja em função da eficiência da fixação biológica de nitrogênio (N) do ar pelos rizóbios, segundo o Manual de Calagem e Adubação (2016). Tal mecanismo pode proporcionar a fixação de 100 a 160 kg de N por hectare (PEREIRA *et al.*, 2011).

No entanto, as necessidades de fósforo, potássio e demais nutrientes são calculadas a partir de uma análise prévia e representativa da área, visto que a cultura da soja exporta-os de forma distinta de acordo com a região (NETO *et al.*, 2019). Em experimento realizado pelos mesmos autores, observou-se que as cultivares de soja testadas exportaram 52,5, 5,3 e 20,8 g kg⁻¹ de N, P e K, respectivamente. Além disso, comprovou-se a hipótese de que “cultivares mais produtivas são exigentes em termos nutricionais” (NETO *et al.*, 2019, p. 4).

Os indicadores para tomada de decisão de calagem mais recomendados são: pH em água, saturação de bases, níveis de alumínio trocável no solo e CTC (NOLLA; ANGHINONI, 2006).

3.2 ÁREA CULTIVADA, RENDIMENTO DE GRÃOS E PRODUÇÃO DE SOJA

Mesmo que os relatos dos primeiros locais onde se cultivou soja no Brasil variem, sobretudo, acerca do ano, foi somente no final da década de 60 que dois fatores internos induziram o cultivo de soja no Estado, o que, posteriormente, consagrou o sucesso do país neste setor: o incremento da produção de suínos e aves gerou a necessidade de alimento animal, sendo o farelo de soja uma opção; e a soja surgiu como uma alternativa de verão para sucessão ao trigo, a principal cultura do sul do Brasil na época. A partir de incentivo estatal e “explosão” do preço da soja no mercado mundial, atualmente, o Brasil é consagrado como o principal produtor do grão, ocupando o primeiro lugar no *ranking* mundial, seguido dos Estados Unidos.

A área plantada de soja na última safra (2020/2021) apresentou crescimento de 4,2% em comparação à anterior, atingindo 38,51 milhões de hectares, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), 2021. A produtividade registrada obteve incremento de 4,5%, sendo 3.529 kg ha⁻¹, o que acarretou em produção recorde de 135,9 milhões de toneladas. Ressalta-se, ainda, que o aumento da área “foi incentivado principalmente pela alta dos preços internacionais, aliado ao dólar elevado de 2020” (CONAB, 2021, p. 79).

A Tabela 1 representa o comparativo entre área plantada, produção de grãos (em 1.000 t) e produtividade de grãos de soja (em kg ha⁻¹) nas safras 19/20 e 20/21 da cultura da soja no Brasil.

Tabela 1 - Área plantada de soja, produção (em 1.000 t) e produtividade (em kg ha⁻¹) de grãos de soja no Brasil nas safras de 19/20 e 20/21

Soja	Área plantada		Produção		Produtividade	
	19/20	20/21	19/20	20/21	19/20	20/21
	36.949,7	38.508,7	124.844,8	135.861	3.379	3.528

Fonte: CONAB (2021, [p. 12-14]).

A demanda interna total é estimada em 49,95 milhões de toneladas; já as exportações do grão em maio de 2021 ano foram 12,74% superior a quantidade exportada no mesmo período do ano interior, reafirmando a importância da soja brasileira em todo o mundo (CONAB, 2021).

Segundo dados da Embrapa Soja, entre as unidades da federação nacional, o Rio Grande do Sul é o terceiro maior produtor de soja em grão, superado somente

pelos estados de Mato Grosso e Paraná. A produção gaúcha na safra 20/21 foi de 20,16 milhões de toneladas. Além disso, é sabido que as áreas mais produtivas do RS se encontram, especialmente, no norte e noroeste do estado, onde localiza-se a região das Missões, de acordo com o Atlas Socioeconômico do Governo. Entre os anos de 2016 a 2018, no estado do Rio Grande do Sul, 48 municípios apresentam produção superior a 100.000 toneladas ao ano, com destaque à Tupanciretã, Cachoeira do Sul, Cruz Alta, Palmeira das Missões e Júlio de Castilhos.

Mais especificamente acerca do estado gaúcho, na safra 20/21, a precipitação variou de 120 a 300 mm, sendo esta quantidade pluviométrica suficiente para alcançar ou, até mesmo, ultrapassar a média histórica na maioria das localidades (CONAB, 2021). Além disso, manteve-se na fase neutra das anomalias de temperatura da superfície do mar durante todo o ciclo da cultura, sem, portanto, a ocorrência de El Niño e La Niña.

3.3 ADOÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO (SPD)

O Sistema Plantio Direto (SPD) refere-se a um conjunto de tecnologias que possuem por finalidade incrementar a produção agrícola mundial com mínima ou nula degradação das áreas (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998). Este sistema consolidou-se na década de 80 no Brasil, cerca de 10 anos após o seu surgimento em território nacional. E, apesar de a sua adoção ter sido em larga escala nos anos iniciais, gerando, inclusive, resultados positivos aos produtores rurais; é de comum conhecimento que as práticas recomendadas pelo SPD não são conduzidas de maneira integrada à campo, muitas vezes.

O SPD caracteriza-se, sobretudo, pela realização de semeadura direta, sem preparo prévio do solo, com a presença de cobertura vegetal e rotação de culturas. Para mais, conceitua-se como “a forma de manejo conservacionista que envolve todas as técnicas recomendadas para aumentar a produtividade, conservando ou melhorando continuamente o ambiente” (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998, p. 18); visa-se, portanto, o beneficiamento dos fatores planta-solo-ambiente-homem. Isto posto, justifica-se o fato de a adesão a este método ter sido progressista.

Já a evolução da área de lavoura sob SPD no estado do Rio Grande do Sul foi definida por Denardin *et al.* (2001, p. 12) como “uma típica curva exponencial no

período de 1976 a 1998” e “por uma reta no período de 1998 a 2000”. Os primeiros conhecimentos técnicos gerados pela pesquisa logo após a introdução do plantio direto relacionavam esta metodologia ao controle de erosão. Então, a partir da noção de conservação das áreas de lavoura e pelas experiências vivenciadas pelos produtores da época, difundiu-se o plantio direto sob o enfoque conservacionista. Neste primeiro momento houve adoção por parte significativa dos produtores rio-grandenses; porém, após, ocorreu o processo chamado de “descontextualização” do plantio direto, onde exigia-se que as propriedades rurais fossem capitalizadas, possuísem grandes extensões de áreas e fosse realizada a compra de implementos específicos para rotacionar as culturas. Isto tudo fez com que o manejo se tornasse “elitizado”. Em consequência desta inaplicabilidade a pequenas unidades produtivas, dominantes no estado, a adesão ao plantio direto diminuiu.

Então, com o auxílio de instituições de pesquisa, a partir do ano agrícola de 1993, ocorreu, novamente, progressão da área de lavoura sob sistema plantio direto no Rio Grande do Sul: “semeadoras para plantio direto, tecnicamente compatíveis com propriedades rurais de porte médio e economicamente acessíveis passaram a ser adaptadas, validadas e disponibilizadas” (DENARDIN *et al.*, 2001, p. 23). Atualmente, portanto, o plantio direto é o sistema de manejo predominante para a produção de grãos no Rio Grande do Sul.

Ainda, nas safras de 1998 a 2000, a produtividade de soja no RS decresceu. Foi atribuída esta queda ao sistema plantio direto na época, contudo, dados científicos comprovaram que a diminuição da rentabilidade em grãos das propriedades sulistas não possuía influência do manejo do solo e, sim, das variações ocorridas nos anos agrícolas, exclusivamente (DERNARDIN *et al.*, 2001).

No entanto, a Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto afirma que mais de 30 milhões de hectares estão sob plantio direto no Brasil e menos da metade destas realizam o autêntico SPD, seguindo todas as suas premissas. A simplificação do sistema gerou problemas como a compactação do solo e, agora, diferentemente do período de 1998 a 2000, práticas incorretas têm afetado os atributos físicos do solo, desfavorecendo o ambiente para o desenvolvimento das plantas e possuindo reflexo na rentabilidade da produção, afinal “a produtividade da cultura é definida como a integração da planta com o ambiente e o manejo” (PEREIRA *et al.*, 2011, p. 1).

3.4 EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO SOBRE OS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO

A necessidade de compreensão sobre o processo de compactação do solo, bem como a busca por soluções para este problema têm motivado diversos trabalhos em inúmeros países (DRESCHER *et al.*, 2016). Explicam Reichert, Reinert e Braida (2003, p. 38):

A compactação é um processo resultante do histórico de tensões recebidas em uma área, através da mecanização ou pelo pisoteio animal. A principal causa da compactação em solos argilosos é o tráfego de máquinas em operações de preparo, semeadura, tratos culturais e colheita. A compactação superficial é causada basicamente pela pressão de inflação do ar dos pneus e a compactação subsuperficial pelo peso por eixo.

Em resumo, a compactação do solo limita o crescimento e o desenvolvimento das culturas por meio da alteração da fertilidade física do solo. A compactação ocorre com maior intensidade em solos de textura argilosa, como é o caso dos Latossolos Vermelhos presentes na região das Missões do estado do Rio Grande do Sul (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003; BONINI *et al.*, 2011). Com a compactação, há aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração; também, ocorre redução da porosidade, especialmente, a macroporosidade e efeitos nocivos sobre a condutividade hidráulica, permeabilidade e infiltração de água (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003). Ainda, solos compactados apresentam menor aproveitamento de nutrientes e maiores taxas de perdas dos mesmos, através de volatilização de amônia, por exemplo em função da alta capacidade de adsorção das partículas (COLLARES *et al.*, 2008).

Além disso, associada às práticas de manejo adotadas, os fenômenos climáticos podem favorecer a degradação física do solo, uma vez que, no Rio Grande do Sul, em anos de El Niño, comumente as precipitações são acima do normal, fazendo com que o solo permaneça ao longo de vários dias com elevada umidade, o que “reduz sua capacidade de suporte de carga e aumenta a suscetibilidade à compactação pelo tráfego de máquinas” (REICHERT *et al.*, 2009, p. 2). Por outro lado, em safras marcadas por La Niña, a quantidade pluviométrica é escassa, reduzindo a

disponibilidade de água às plantas, o que aumenta a resistência do solo ao crescimento das raízes. Efeitos como os citados anteriormente são mais pronunciados em áreas cujo solo está compactado.

Os métodos mais utilizados para descompactação em sistemas onde há predominância de semeadura direta são: mecânicos ou biológicos. Com relação às práticas mecânicas, frisa-se a escarificação. A escarificação esporádica do solo reduz de forma imediata os efeitos da compactação (REICHERT *et al.*, 2009). Entretanto, apesar de aumentar a taxa de infiltração de água e melhorar a condutividade hidráulica saturada em solos compactados, tem-se percebido que o processo de escarificar não proporciona melhores condições físicas ao crescimento das plantas em áreas sob sistema plantio direto bem conduzido (REICHERT *et al.*, 2009). Ademais, Secco *et al.* (2009) salientam que em estudo realizado “a escarificação do solo aumentou o rendimento de grãos da cultura do milho, porém não modificou o rendimento da soja”, corroborando com demais autores.

Acerca dos métodos biológicos visando a descompactação do solo, faz-se destaque à rotação e diversificação de culturas. Uma alternativa com a finalidade de amenizar os efeitos da compactação é o cultivo de espécies com sistema radicular vigoroso, capaz de criar bioporos que propiciem o desenvolvimento das raízes subsequentes (SILVA; ROSOLEM, 2002). Sendo assim, de maneira estratégica, sugere-se a semeadura de espécies de crescimento inicial rápido e agressivo.

Isto posto, é possível afirmar que a persistente ocorrência dos níveis elevados de compactação do solo é oriunda do não cumprimento dos princípios estabelecidos pelo Sistema Plantio Direto, sobretudo (DENARDIN *et al.*, 2008). Já, a avaliação da qualidade física é fundamental na determinação do estado de certa gleba. Para isso, a identificação dos indicadores físicos do solo é parte eminente de um projeto de melhoramento do rendimento de grãos das culturas agrícolas.

3.4.1 Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco e o volume do mesmo, considerando o espaço poroso, explica (PEREIRA *et al.*, 2013). A D_s não é uma propriedade física que depende dos processos

pedogenéticos em ambientes não cultivados necessariamente (REINERT *et al.*, 2008).

Este atributo está relacionado à estruturação do solo e, conseqüentemente, à compactação, uma vez que se pode correlacionar densidade e porosidade, sendo ambas inversamente proporcionais. Ademais, é comum associar o crescimento radicular à densidade do solo. “A relação entre a densidade atual do solo e a densidade de referência ou compactação máxima é útil na caracterização da compactação e da resposta das culturas em diferentes tipos de solos” (SUZUKI *et al.*, 2007, p. 1). A densidade do solo crítica é dependente, sobretudo, da classe textural do solo e do manejo adotado; para exemplificar, Reichert *et al.* (2003) propuseram D_s limite de 1,30 a 1,40 Mg m⁻³ para solos argilosos; 1,40 a 1,50 Mg m⁻³ para franco-argilosos; e 1,70 a 1,80 Mg m⁻³ para franco-arenosos. A partir destes níveis, é possível verificar efeitos na queda de produtividade.

Também, trabalhos científicos comprovam que ao associar cobertura vegetal e diversificação de espécies no sistema plantio direto é possível diminuir a densidade do solo de maneira significativa.

3.4.2 Porosidade do solo

A porosidade do solo faz menção ao espaço ocupado por água e ar e desempenha papel essencial no que diz respeito ao comportamento físico-hídrico do solo, como: aeração, condução, retenção de água e penetração das raízes (PEREIRA *et al.*, 2013). Estes fatores, quando favoráveis, proporcionam o aproveitamento dos nutrientes presentes no solo, sobretudo. Considera-se 30% de porosidade total como limite mínimo aceitável (CASÃO JÚNIOR *et al.*, 2006).

Os microporos são responsáveis pela retenção de água contra gravidade, após serem saturados; enquanto que os macroporos realizam a drenagem e a aeração do solo, além de operarem como indicadores da estruturação do solo (PEREIRA *et al.*, 2013). Os valores de macroporosidade dependem da cimentação entre os agregados do solo, contudo, permite-se afirmar que níveis entre 0,05 e 0,10 m³ m⁻³ tornam-se restritivos ao rendimento da cultura da soja, sendo estes números mínimos para o crescimento e desenvolvimento satisfatório das plantas (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). Ainda, em estudo realizados pelos mesmos autores, constatou-se que em 97%

das amostras realizadas em relação à porosidade de aeração, a capacidade de campo foi sempre superior ao limite.

3.4.3 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) busca expressar a força necessária para penetrar o perfil do solo que as raízes de determinada cultura agrícola realizam em solos sob condições físicas distintas. Inclusive, Reinert *et al.* (2008, p. 3) esclarecem:

A habilidade das raízes penetrarem no perfil diminui quando a densidade e a resistência do solo aumentam. Em solos com menor umidade, a coesão e a resistência do solo à penetração aumentam e a pressão hidrostática das células das raízes diminui, como consequente redução da força da coifa e na região meristemática para superar a resistência do solo.

Em especial, no caso da RP, este atributo deve ser analisado de maneira integrada com os demais fatores que envolvem a qualidade do solo, bem como a sua estruturação e agregação. A resistência do solo à penetração não pode caracterizar um solo como compactado de maneira imediata, pois possui relação direta com a umidade do solo no momento da medição à campo. Reforçando a importância de correlacionar os diferentes aspectos físicos ao realizar algum estudo, em pesquisa realizada por Klein e Libardi (2002), houve limitação da RP somente quando a densidade do solo atingiu $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$.

Há evidências que ocorre impedimento de crescimento radicular quando a RP é igual ou maior a 2 Mpa (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003). Solos de sequeiro, cujas características são intermediárias entre mata e irrigado, apresentam maior intervalo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) (KLEIN; LIBARDI, 2000).

3.4.4 Retenção, disponibilidade e fluxo de água no solo

Uma vez que todos os elementos do sistema agrícola nos quais a planta interage controlam a circulação de água, a disponibilidade hídrica às culturas depende não somente da quantidade infiltrada, em milímetros, como também da quantidade que pode ser acessada pelo sistema radicular (REICHERT *et al.*, 2000).

A capacidade de campo (CC) refere-se à quantidade de água retida pelo solo após o excesso ter sido drenado (REICHERT *et al.*, 2000; KLEIN; REICHERT; REINERT, 2006). No momento em que o solo encontra-se na CC, cerca de dois a três dias depois de uma chuva ou irrigação, os macroporos do solo ficam livres de água e os microporos cheios, uma vez que os últimos são responsáveis pela retenção de água. Já o ponto de murcha permanente (PMP) corresponde ao teor de água do solo mínimo onde há desenvolvimento das plantas (KLEIN; REICHERT; REINERT, 2006). Em estudo realizado por Camara e Klein (2005), foi possível concluir que a escarificação do solo em plantio direto aumentou a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água no solo. Os efeitos imediatos da escarificação, portanto, são positivos; para mais, o incremento da rugosidade superficial provocado pela mobilização do solo com o uso de escarificadores é capaz de reduzir o escoamento superficial de água em até 77% (SECCO; REINERT, 1997).

Mesmo que água no solo seja um assunto complexo e dependente de diversos fatores, é sabido que as práticas de manejo do solo devam favorecer a infiltração e a permanência desta água no solo, especialmente em camadas mais profundas (REICHERT *et al.*, 2000). Diante deste cenário, cultivo em nível, faixas de cultivo, cobertura permanente do solo, tráfego com condição de umidade adequada, uso de máquinas que exerçam menores pressões e alta produção de biomassa são maneiras de aumentar a disponibilidade de água, fazendo com a superfície do solo permaneça protegida e somente uma fração mínima de água infiltrada seja perdida por evaporação.

Entre os impactos decorrentes da compactação do solo são ressaltadas as alterações no volume e distribuição dos poros. Ao ocorrer a compactação do solo, o fluxo de água é reduzido devido ao decréscimo do diâmetro dos poros; de forma semelhante, o fluxo de gás é diminuído pelo mesmo motivo (MACHADO, 2003). Frise-se que o fluxo de água acontece, preferencialmente, nos macroporos. Além disso, ao

passo que ocorre o aumento do grau de compactação de determinado solo, a sua condutividade hidráulica é reduzida, especialmente, nas profundidades de 8 a 15 centímetros (MACHADO, 2003). Assim como é recorrente em outros atributos, a taxa de infiltração de água no solo também é condicionada pela estrutura do mesmo. Desta forma, a curva de retenção de água no solo possui papel imprescindível na detecção da condição do solo; esta, expressa a relação entre o conteúdo de água, com base na massa ou volume e o potencial matricial da água no solo, ou seja, a força de ligação entre as moléculas e as partículas do solo (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2007).

A curva de retenção de água, por sua vez, apresenta inúmeras aplicações técnicas práticas, como: determinação da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e disponibilidade total de água no solo (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2007). Também, através desta curva pode-se determinar faixas de disponibilidade de água no solo que caracterizam o movimento interno, bem como a disponibilidade da água presente no perfil às plantas. Estas são variáveis indispensáveis ao realizar o manejo da irrigação de uma área ou buscar compreender acerca do balanço hídrico do solo, por exemplo.

3.4.5 Aeração do solo

Os espaços livres de água e sólido no solo são fundamentais nos processos de trocas gasosas e equilíbrio de gás oxigênio (O_2) disponível, em especial, na rizosfera (MACHADO, 2003). No caso do oxigênio, os microrganismos consomem este gás, resultando em diminuição da pressão parcial do mesmo, o que gera um gradiente de pressão entre O_2 , ar atmosférico e ar do solo; então, por meio de difusão, o equilíbrio é promovido (LIER, 2001). Caso haja diminuição da porosidade de aeração do solo devido à compactação do solo, processos metabólicos das plantas e dos organismos podem ser prejudicados, constituindo-se como um fator limitante ao desempenho da cultura, sobretudo.

“Quanto maior a umidade do solo, menor a sua condutividade gasosa e maiores gradientes de pressão são requeridos para manter o fluxo necessário”, explica Lier (2001). Desta forma, o crescimento radicular em profundidade pode ser afetado com a falta de oxigênio, bem como situações de alta umidade serem nocivas ao bom funcionamento deste atributo físico. Então, com a finalidade de incorporar ambos

fatores na estimativa de água disponível e ponto ótimo para as plantas, adotou-se o conceito de “*non-limiting water range*”, traduzido como “intervalo hídrico ótimo”, em português (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

A partir de diversos estudos, fixou-se o valor de porosidade de aeração mínimo de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (LIER, 2001). Entretanto, o mesmo autor frisa que a porosidade total do solo, a profundidade a ser aerada e o nível de consumo de oxigênio afetam na porosidade de aeração mínima necessária para uma completa oxigenação do sistema radicular de uma cultura e produtividade adequada.

3.5 INFLUÊNCIA DO MANEJO DO SOLO SOBRE ÀS PLANTAS

Técnicas responsáveis por expor o solo através da mobilização da sua estrutura, como é o caso da escarificação, acarretam, muitas vezes, em menor quantidade de água disponível às plantas (REICHERT *et al.*, 2006). Contudo, em estudo realizado em um Latossolo Vermelho que visava avaliar os indicadores físicos da qualidade do solo, observou-se que o plantio direto escarificado possui vantagem em situação de deficiência hídrica, se comparado ao plantio direto, por ser capaz de restringir em menor nível a penetração das raízes (KLEIN; BASEGGIO; MADALOSSO, 2009). Corroboram com estes autores, Nogueira e Mandredini (1983), ao afirmarem que a compactação do solo influencia o desenvolvimento radicular em soja através de variações na densidade e porosidade do solo; no entanto, este fato não influencia a absorção de água e nutrientes sob condições hídricas normais.

Uma grande dúvida que persiste é relacionada à duração dos efeitos da escarificação sobre os atributos físico-hídricos do solo; Nicoloso *et al.* (2008), pesquisando acerca da eficiência de dois tipos de escarificação (mecânica e biológica) em um Latossolo muito argiloso concluíram que em época de elevada de precipitação, o efeito da escarificação mecânica foi temporário, não contribuindo de maneira significativa para a melhoria das condições físicas do solo nove meses após a operação. Além disso, os maiores rendimentos de grãos de soja foram evidenciados após a escarificação biológica do solo.

A diversificação de espécies, através do uso de culturas que possuem raízes mais agressivas visa, sobretudo, explorar camadas compactadas do solo e melhorar o ambiente para o desenvolvimento das próximas plantas. Este método biológico tem

sido uma alternativa para solucionar a compactação dos solos de maneira prolongada; entretanto, “a eficiência do método biológico também depende do estado inicial de compactação do solo” (NICOLOSO *et al.*, 2008, p. 3).

Há registros, em diversos casos, de camadas superficiais adensadas sob plantio direto. Porém, os solos de áreas manejadas sob SPD, apesar de mais firmes quando secos, não tem sua continuidade dos poros afetada, devido ao favorecimento da alta quantidade de material orgânico associada à atividade microbiana (MACHADO, 2003). Além de que “uma limitada compactação na superfície do solo é considerada benéfica para a semeadura porque promove melhor contato semente-solo e rápida germinação” (SUZUKI, 2005, p. 50). Isto posto, considera-se como uma das maiores causas da compactação dos solos: o desrespeito às condições de friabilidade e umidade no momento do preparo do solo e operações de cultivo (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Ao utilizar máquinas agrícolas pesadas e intensificar a trafegabilidade sobre solo úmido e plástico, as propriedades físicas são afetadas, acarretando compactação e desencadeando a construção de um ambiente inviável ao crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas. Para exemplificar, em uma área cultivada há três anos sob SPD, houve restrição ao crescimento das raízes de milho nas camadas de 30 a 40 centímetros em razão do tráfego intenso de um trator agrícola com peso de 39.227 N (MACHADO, 2003).

O sistema radicular das culturas percebe todas as condições existentes à campo; sendo assim, caso haja algum impedimento físico ao seu crescimento as plantas criam mecanismos de defesa, expandindo suas raízes lateralmente ou contornando os agregados (MACHADO, 2003). Para isto, energia metabólica é gasta na procura de camadas menos resistentes, o que reflete negativamente na expressão do potencial produtivo da cultura. Além de impedir o acesso à água e nutrientes disponíveis no perfil do solo.

À vista disto, respostas são dadas: o crescimento da parte aérea é afetado. Experimentos demonstraram que a compactação induzida por meio de maquinário agrícola provocou a redução da altura de plantas de soja e milho (SUZUKI, 2005). Ademais, nem mesmo a escarificação neste caso favoreceu o crescimento aéreo da cultura. Apesar de a produtividade das culturas depender de inúmeros aspectos, como atributos físicos do solo, manejo da cultura e fator climático; “de modo geral, o produtor só percebe o efeito da compactação quando contabiliza a produtividade e esquece

que o crescimento radicular é o melhor indicador da qualidade do solo e o primeiro a sofrer os efeitos da compactação” (MACHADO, 2003, p. 86).

Ao correlacionar a compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja, Beulter e Centurion (2004) concluíram que o aumento da concentração de raízes na camada superficial, até cinco centímetros, e a alteração na penetração em profundidade são considerados fatores limitantes na produtividade da soja, principalmente, sob escassez hídrica. O grau de compactação ótimo para a cultura da soja em um Latossolo é 86% (SUZUKI *et al.*, 2007).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

O experimento foi instalado em uma propriedade rural na localidade de Vista Alegre, pertencente ao município de Caibaté – RS. As coordenadas geográficas do local são 28°19'23.03" ao sul e 54°45'32.17" ao oeste, a uma altitude de 266 metros. José Gabriel Gomes (*in memorium*), proprietário da área, foi um dos pioneiros da adoção do Sistema Plantio Direto na região. A partir dos anos 90, não revolvimento do solo e plantio sobre a palhada têm sido práticas utilizadas na lavoura. Na safra 19/20 foi implantada a cultura da soja no verão e no inverno foi cultivado trigo. Entretanto, espécies como girassol, canola e aveia preta já foram semeadas. Historicamente, a área apresenta boa fertilidade e rendimentos considerados satisfatórios pelo produtor.

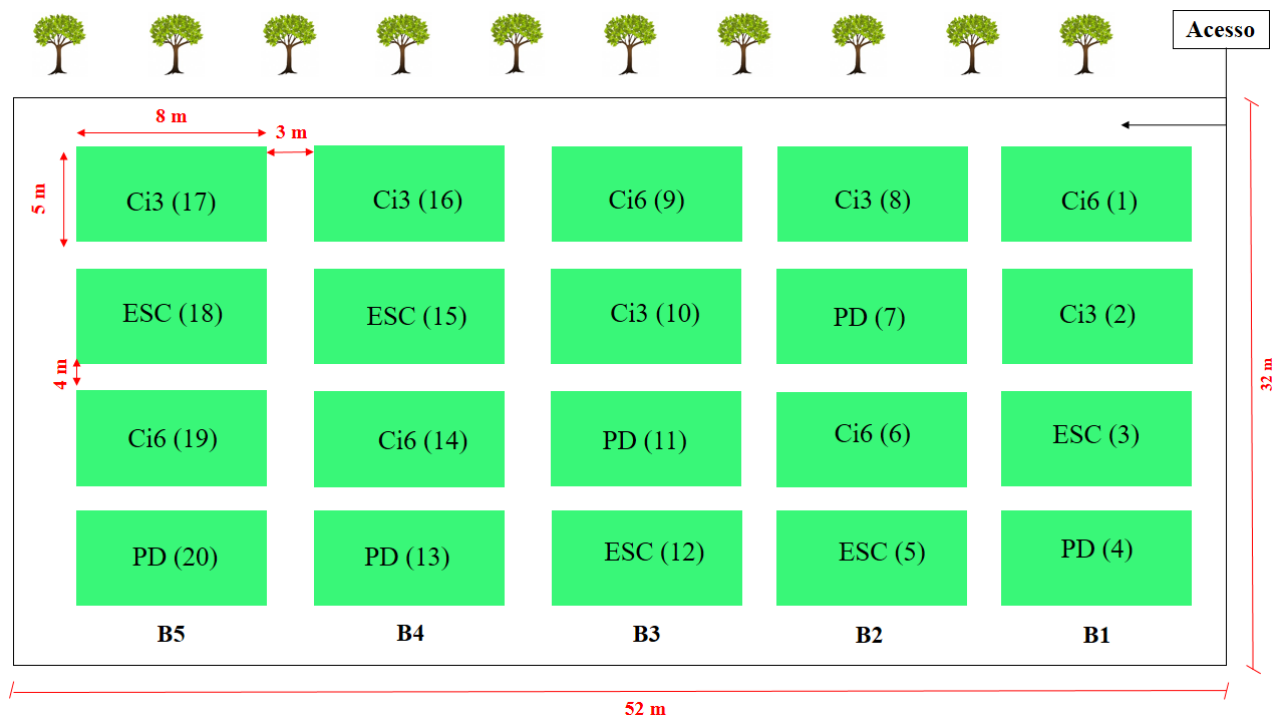
O solo da área é classificado como um Latossolo Vermelho e contém 62% de argila, 24% de silte e 14% de areia na camada de 0 a 20 cm de profundidade. De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) este solo é classificado como solo do Tipo 3, em função do seu teor de argila ser superior a 35%.

O clima é temperado do tipo subtropical, de acordo com a classificação de Köppen. A Organização Meteorológica Mundial (OMM), em publicação realizada no site das Nações Unidas Brasil, constatou a presença do fenômeno La Niña no ano de 2020, sendo anunciado o fim da sua influência em primeiro de junho de 2021.

4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, sendo cinco blocos e quatro tratamentos, totalizando 20 parcelas (Figura 1). Cada parcela possui 8 m de comprimento e 5 m de largura, totalizando 40 m² (Figura 2). Entre as parcelas deixou-se a bordadura de 4 m e entre os blocos, 3 m. O experimento apresentou comprimento de 52 m e largura de 32 m, totalizando 1.664 m² de área.

Figura 1 - Croqui da área experimental



Fonte: Autora (2022).

Figura 2 - Demarcação das parcelas do experimento



Fonte: Autora (2022).

Foram aplicados quatro tratamentos neste experimento, com a finalidade de representar os diferentes manejos e níveis de compactação do solo recorrentes na região das Missões. Em sequência, a descrição dos tratamentos:

1. PD – Plantio Direto; este tratamento caracteriza o histórico do manejo da área.
2. ESC – Escarificado; representando a prática utilizada por diversos agricultores com a finalidade de reduzir os efeitos nocivos da compactação do solo às culturas. O equipamento IBL As7 acoplado ao trator agrícola realizou a escarificação até, aproximadamente, 20 cm de profundidade (Figura 3).
3. Ci3 – Compactação Induzida com 3 passadas; tratamento no qual o solo da parcela, em sua condição plástica, foi compactado através da passagem dos rodados de um trator agrícola 4x2 TDA da marca Valtra modelo BM 100, cujo peso conhecido é de 4.160 kg. Este procedimento foi repetido três vezes. Ci3 assemelha-se a condições de preparação de silagem, prática comum na região missioneira em função da necessidade de alimento aos animais.
4. Ci6 – Compactação Induzida com 6 passadas; a metodologia deste tratamento é exatamente igual ao tratamento Ci3, sendo a única diferença o fato de que em Ci6 o trator agrícola realiza o tráfego dos seus rodados por seis vezes em cada parcela.

O processo de escarificação das parcelas foi realizado no dia 12 de dezembro de 2020 com o uso de um escarificador da marca IBL, modelo As7 (Figura 3). Cada haste é capaz de atingir a profundidade de, aproximadamente, 20 cm; além disso, a haste possui largura de 9 cm da ponteira e 5 cm de ponta. O implemento é composto por 7 hastes, cujo espaçamento entre hastes é de 60 cm.

Figura 3 - Escarificação das parcelas (12/12/20)

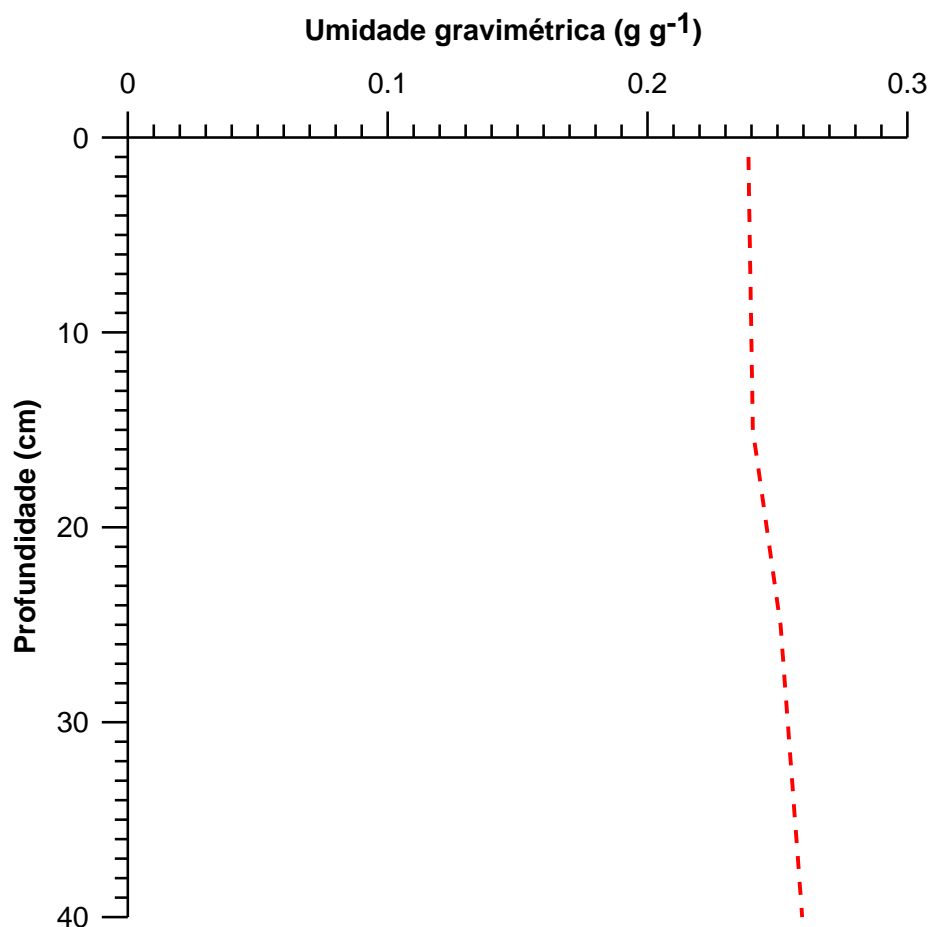


Fonte: Autora (2022).

Na mesma data (12/12/20) realizou-se a coleta das amostras para análise da umidade gravimétrica do solo e foi medida a resistência do solo à penetração antes e após a escarificação.

O Gráfico 1 representa a umidade gravimétrica do solo no dia da escarificação das parcelas do experimento até 40 cm. Observou-se que a umidade gravimétrica do solo possuiu valores contínuos ao longo da profundidade de solo amostrada, variando de 0,24 a 0,26 g g⁻¹.

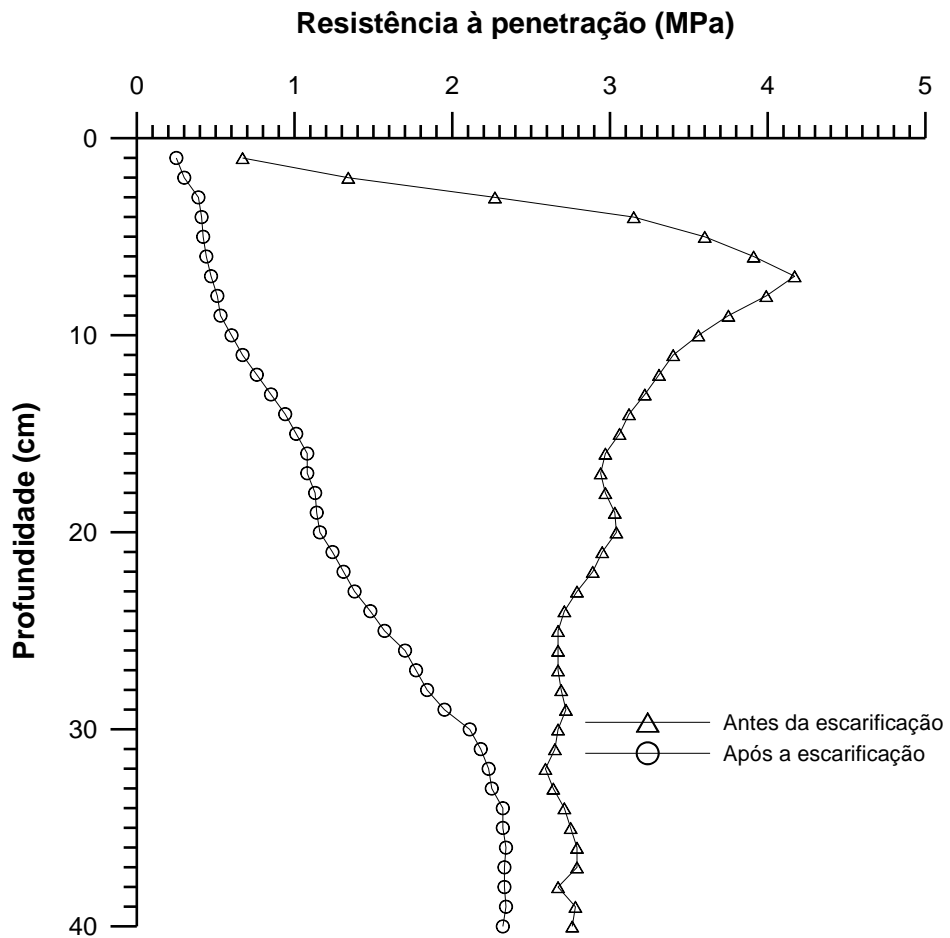
Gráfico 1 - Umidade gravimétrica do solo no dia da escarificação (12/12/20)



Fonte: Autora (2022).

Já, o Gráfico 2 representa a resistência do solo à penetração antes e depois da escarificação das parcelas até a profundidade de 40 cm. Tal propriedade física foi afetada de maneira expressiva pelo uso deste equipamento até, aproximadamente, 30 cm, o que corrobora com a informação oriunda de diversos manuais de preparação do solo com o uso de grades.

Gráfico 2 - Resistência do solo à penetração no dia da escarificação (12/12/20)



Fonte: Autora (2022).

A preparação do solo para os tratamentos Ci3 e Ci6 exigiam condição de solo plástico; sendo assim, somente após uma chuva de 40 mm foi possível realizar a etapa de compactação induzida. No dia 21 de dezembro de 2020, então, por meio do tráfego do trator agrícola 4x2 TDA da marca Valtra modelo BM 100 realizou-se a passagem sobre as parcelas para induzir o aumento do nível de compactação do solo. Ci3 corresponde a três passadas de trator em cada parcela, enquanto que Ci6, a 6 passadas. A massa total do trator é de 4.160 kg.

A Figura 4 ilustra o trator utilizado nesta etapa do experimento.

Figura 4 - Etapa de compactação induzida das parcelas (21/12/20)

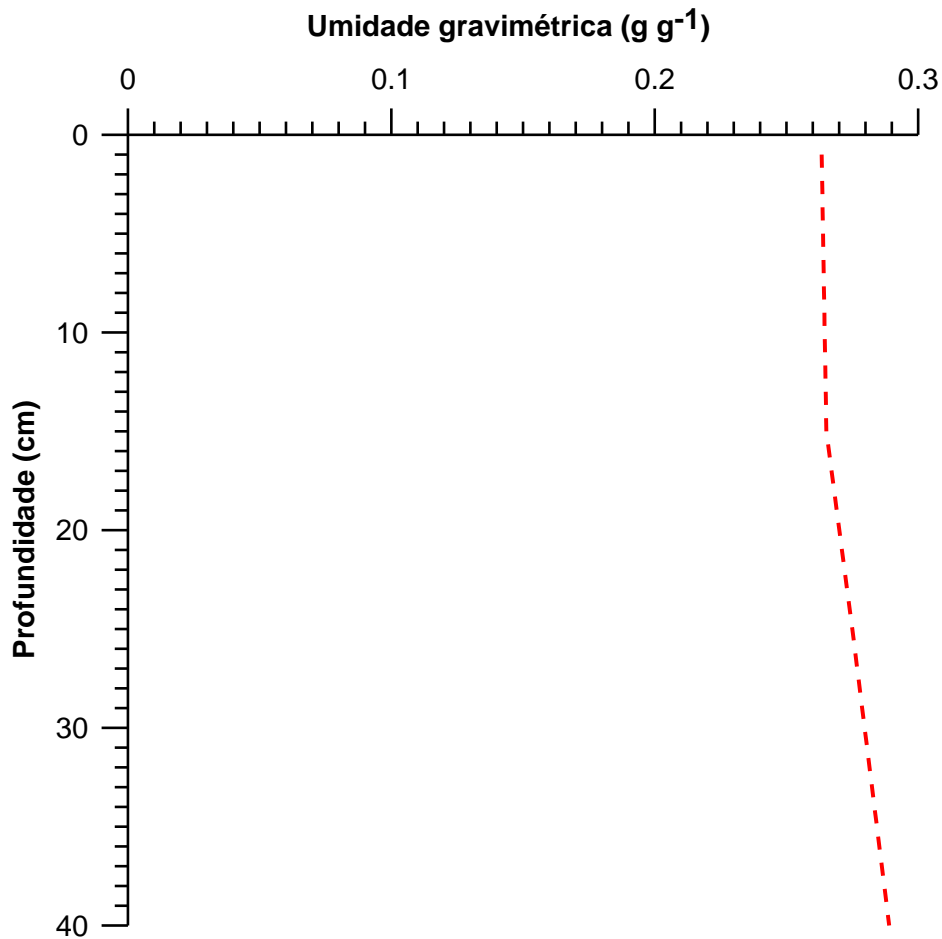


Fonte: Autora (2022).

Assim como no dia escarificação, nesta oportunidade foi avaliada a umidade gravimétrica do solo e resistência do solo à penetração das parcelas compactadas.

Ressalta-se que para determinação da umidade gravimétrica do solo nos dias 12 e 21 de dezembro de 2020, coletou-se amostras de solos com estrutura preservada nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm em todas as parcelas que seriam avaliadas; estas foram colocadas em latas de alumínio. Foi mensurada a massa da lata, a massa da lata + solo úmido e a massa da lata + solo seco, em gramas, após a secagem na estufa por 24 horas a uma temperatura de 100°C.

O Gráfico 3 representa a U_g na data da operação. Verifica-se que a umidade gravimétrica do solo no dia da compactação é maior que a observada no dia da escarificação, em função, justamente, da necessidade de solo plástico e, portanto, precipitação pluviométrica antes.

Gráfico 3 - Umidade gravimétrica do solo no dia da compactação (21/12/20)

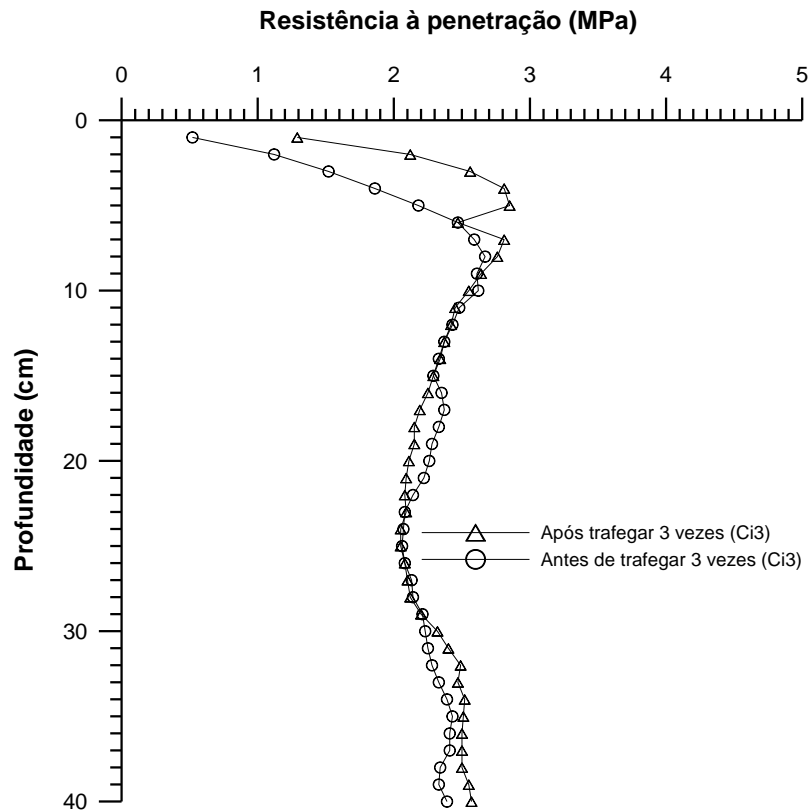
Fonte: Autora (2022).

A resistência do solo à penetração após o tráfego dos rodados do trator por três vezes está representada pelo Gráfico 4, enquanto que a resistência do solo à penetração após o tráfego dos rodados do trator por seis vezes, pelo Gráfico 5.

É possível perceber, através da ilustração (Gráficos 4 e 5), que os efeitos da compactação induzida sobre o atributo “RP” ocorreram até, aproximadamente, 8 cm de profundidade logo após o procedimento.

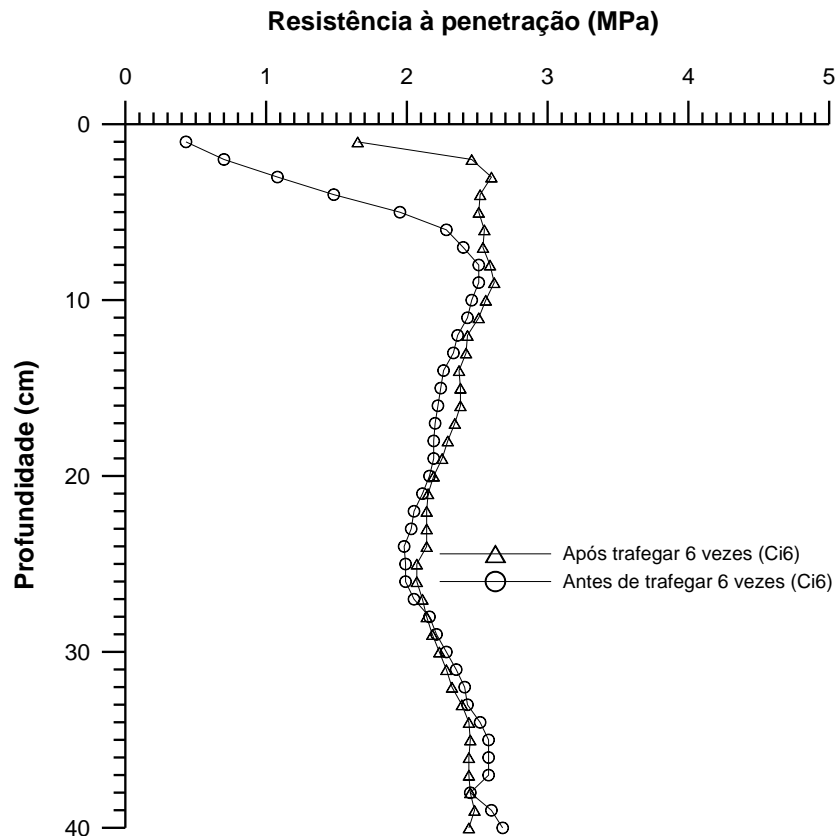
Os valores de resistência do solo à penetração tornaram-se superiores após a compactação das parcelas amostradas. Ainda, em menos de 3 cm de profundidade de solo, os valores de RP, após o tráfego dos rodados do trator (3 e 6 vezes) são maiores que 2 MPa, considerado limite crítico por inúmeros autores. Também, ressalta-se que em Ci6, após a compactação, já no primeiro centímetro de solo avaliado a RP aproxima-se de 2 MPa.

Gráfico 4 - Resistência do solo à penetração antes e depois de Ci3 (21/12/20)



Fonte: Autora (2022).

Gráfico 5 - Resistência do solo à penetração antes e depois de Ci6 (21/12/20)



Fonte: Autora (2022).

4.3 IMPLANTAÇÃO DA CULTURA DA SOJA E TRATOS CULTURAIS

Para recomendação da quantidade de corretivo e fertilizantes, foi realizada a coleta de amostras de solo estratificadas, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm em cinco pontos da área (Figura 5). Esta etapa do experimento realizou-se no dia 4 de dezembro de 2020. Após a coleta, o solo amostrado foi homogeneizado e deixado secar ao ar em bandejas.

Figura 5 - Amostragem estratificada de solo para análise química (04/12/20)



Fonte: Autora (2022).

As amostras de solo foram enviadas à Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC). Calculou-se a quantidade de fertilizantes necessários de acordo com o Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (2016).

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise química do solo da área.

Tabela 2 - Dados da análise química do solo da área experimental

Elemento/propriedade química	Camada	
	0 a 10 cm	10 a 20 cm
Argila (%)	62	65
Classe	1	1
pH _{H2O}	5,7	5,5
SMP	6,3	6,2
P (mg dm ⁻³)	27,8	11,3
K (mg dm ⁻³)	240	124
MO (%)	3,3	2,4
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,0	0,0
Ca (cmol _c dm ⁻³)	4,4	4,6
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,9	1,5
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	3,2	3,7
CTC _{efetiva} (cmol _c dm ⁻³)	7,0	6,4
CTC _{pH7} (cmol _c dm ⁻³)	10,2	10,1
Saturação de Al (%)	0,0	0,0
Saturação de Bases (%)	68,4	63,5
S (mg dm ⁻³)	9,0	12,0
Zn (mg dm ⁻³)	3,0	1,2
Cu (mg dm ⁻³)	7,1	8,4
B (mg dm ⁻³)	0,45	0,41
Mn (mg dm ⁻³)	9	175

Fonte: Central Analítica – UNISC (2020).

A cultivar de soja DonMario 64i63 foi implantada no dia 30 de dezembro de 2020. A semeadora-adubadora utilizada é da marca Stara, modelo Sphil de 8 linhas, cujo sulcador é do tipo discos (Figura 6); o espaçamento entre linhas foi de 45 cm, a profundidade de semeadura foi de 4 cm e distribui-se 14 sementes por metro linear. A densidade de semeadura utilizada foi de 311.111 sementes por hectare.

Antes da semeadura, as sementes de soja foram inoculadas com o inoculador líquido a base de Bradyrhizobium, denominado comercialmente de Biagro NG. A velocidade de semeadura utilizada na operação foi de 4 km h⁻¹.

Em função do nível muito alto e alto dos nutrientes, foi feita adubação de base para reposição nas quantidades de 1 kg de N ha⁻¹, 11,5 kg de P ha⁻¹ e 11,5 kg de K ha⁻¹. Utilizou-se 50 kg do adubo de formulação 2-23-23, marca Coxilha.

Devido a incidência de plantas invasoras, foi realizada a primeira dessecação no dia 6 de janeiro de 2021 com pulverizador autopropelido da marca Jan modelo Power Jet 2500 a uma velocidade de 10 km h⁻¹. Durante a preparação da calda foi feita a mistura de Cletodim, a uma dosagem de 400 mL ha⁻¹, Roundup WG, 1,5 kg ha⁻¹ e adjuvante A-20+, 50 mL ha⁻¹. A segunda aplicação de herbicida Roundup WG ocorreu no dia 19 de março de 2021, com equipamento costal e nas entrelinhas das

parcelas. Nesta mesma data (19/03/2021) foi realizada a aplicação dos produtos químicos FOX XPro + Abamectina + Connect + Áureo + A-20 para controle fitossanitário.

Figura 6 - Semeadura de soja na área experimental (30/12/20)



Fonte: Autora (2022).

4.4 AVALIAÇÕES NO SOLO

Para compreender o efeito de diferentes manejos e níveis de compactação sobre os atributos físicos do solo e seus impactos na dinâmica da água no solo e no desempenho da soja, foram avaliados os parâmetros: resistência do solo à penetração (RP), umidade volumétrica do solo e umidade gravimétrica do solo, densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, grau de compactação, curva de retenção de água e porosidade de aeração do solo.

A resistência do solo à penetração foi medida com auxílio de um penetrômetro portátil da marca Falker, modelo PLG 1020. As medidas foram feitas a cada um centímetro até a camada de 40 cm de profundidade (Figura 7). Foram feitas medidas em seis pontos de cada parcela, espaçados a uma distância de 10 cm entre eles. Esta

avaliação foi feita nas seguintes datas: 12 e 21 de dezembro, pré e pós-escarificação, respectivamente; 22 de janeiro de 2021, momento em que a cultura se encontrava no estágio V3/V4; e 31 de março de 2021, onde realizou-se a medição em três pontos de cada parcela na fase final do ciclo.

Figura 7 - Medição da RP após a escarificação das parcelas



Fonte: Autora (2022).

A umidade volumétrica do solo foi mensurada através do equipamento denominado Refletômetro no Domínio do Tempo (TDR) (Figura 8). Foram instaladas sondas até 20 cm de profundidade em todas as parcelas e as medidas foram feitas semanalmente durante todo o ciclo da cultura, com o objetivo de determinar o conteúdo de água no solo. A última medida com TDR foi realizada no dia 23 de abril de 2021 ao constatar que a cultura da soja atingiu a sua maturação fisiológica. Conjuntamente com a avaliação da umidade do solo, foram acompanhados os índices pluviométricos na área experimental. Foi utilizado um pluviômetro de precisão, o qual ficou instalado junto à lavoura.

Figura 8 - Avaliação da umidade volumétrica do solo com o equipamento TDR



Fonte: Autora (2022).

Com os dados de umidade volumétrica do solo, calculou-se a capacidade de água disponível no solo (CAD) nos primeiros 20 cm de profundidade ao longo de todo o ciclo da cultura da soja, conforme a equação abaixo (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2012):

- CAD: $(\theta_{\text{observada}} - \theta_{1500\text{kPa}}) \times p \times 10$, onde p refere-se à profundidade e a multiplicação por 10 é feita para transformação em mm da CAD.

- Água facilmente disponível: $(\theta_{10\text{kPa}} - \theta_{500\text{kPa}}) \times p \times 10$

Segregou-se a água disponível no solo em faixas de disponibilidade de água: água facilmente drenada, água facilmente disponível, água disponível sob estresse e água indisponível. Para a determinação da quantidade de água em cada faixa, conforme os potenciais matriciais, utilizou-se as seguintes equações:

- Água facilmente drenada: $(\theta_{\text{sat}} - \theta_{10\text{kPa}}) \times p \times 10$

- Água facilmente disponível: $(\theta_{10\text{kPa}} - \theta_{500\text{kPa}}) \times p \times 10$

- Água disponível sob estresse: $(\theta_{500\text{kPa}} - \theta_{1500\text{kPa}}) \times p \times 10$

- Água indisponível: $\theta_{1500\text{kPa}} \times p \times 10$

A porosidade de aeração do solo ao longo do ciclo da cultura foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a umidade volumétrica do solo nos primeiros 20 cm da camada superficial do solo.

Para determinação da densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e curva de retenção de água, coletou-se amostras de solo com estrutura preservada nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm de profundidade (Figuras 9 e 10).

Ainda sobre a porosidade total, esta foi calculada através da densidade de partículas, seguindo a metodologia descrita em Marcolin e Klein (2011), onde correlaciona-se a $D_{s\text{máx}}$ que determinado solo pode obter através do seu teor de argila e matéria orgânica do solo (MO). Segue a equação de pedrotransferência (MARCOLIN; KLEIN, 2011):

$$- D_{s\text{máx}} = 2,03133855 - 0,00320878\text{MO} - 0,00076508 \text{ argila}$$

A coleta foi feita no dia 16 de junho de 2021, utilizando anéis de aço inox com 4 cm de altura e 6 cm de diâmetro.

Figura 9 - Coleta de amostras de solo com estrutura preservada (16/06/21)



Fonte: Autora (2022).

Figura 10 - Amostra de solo com estrutura preservada



Fonte: Autora (2022).

As amostras de solo com estrutura preservada foram, inicialmente, preparadas em laboratório e saturadas. Após a saturação, foram pesadas e submetidas às tensões de 6 e 10 kPa em mesa de tensão para que os parâmetros microporosidade e umidade do solo na capacidade de campo fossem determinados (Figura 11). As amostras foram submetidas à tensões de 33, 100, 500, 1000 e 1500 kPa na Câmara de Richards. O conjunto de dados de umidade para cada tensão foi utilizado a fim de determinar a curva de retenção de água no solo. Todo o procedimento analítico e os cálculos de densidade, distribuição de poros e curva de retenção de água foram feitos seguindo a metodologia descrita em Teixeira *et al.* (2017).

Figura 11 - Amostras de solo saturadas na mesa de tensão



Fonte: Autora (2022).

Figura 12 - Amostras na Câmara de Richards



Fonte: Autora (2022).

O grau de compactação do solo foi calculado pela divisão da densidade do solo observada em cada camada e pela densidade máxima que o solo da área pode atingir.

4.5 AVALIAÇÕES NAS PLANTAS

Para avaliar a resposta da cultura da soja submetida a diferentes condições físico-hídricas do solo, avaliou-se a altura de plantas, distribuição do sistema radicular ao longo do perfil do solo, massa seca da parte aérea, produção de grãos, número de legumes e grãos por planta e massa de 1000 grãos.

Para determinação da massa seca da parte aérea da cultura, foram coletadas todas as plantas de soja dispostas em 1 metro linear em cada parcela. Estas foram cortadas com foice e colocadas em sacos identificados, em 31 de março de 2021, quando a cultura estava em fase final do florescimento. Os sacos permaneceram na estufa a uma temperatura de 60°C por, aproximadamente, duas semanas e foram pesados (massa do saco + biomassa seca). Por fim, pesou-se a massa dos sacos e pela diferença foi possível calcular a biomassa seca de cada parcela.

A altura de plantas foi mensurada no dia 17 de abril de 2021, onde foram escolhidas, de maneira aleatória, cinco plantas de cada parcela e estas foram medidas com trena, da superfície do solo até a o ápice da planta, onde se encontrava o último nó da soja.

A avaliação da distribuição do sistema radicular foi feita pelo Método do Perfil Cultural no dia 28 de abril de 2021 (Figura 13). Primeiramente, foi aberta uma trincheira de 60 cm de largura e 50 cm de profundidade em cada parcela. As raízes foram cuidadosamente expostas no perfil, com o auxílio de uma chave de fenda. Para melhor verificação da distribuição radicular, as raízes foram lavadas com água colocada em um borrifador. Foi utilizado um quadro de PVC de 50x50 cm, delimitado por fios de nylon a cada 5 cm, de forma a ser criada uma malha. Este quadro foi colocado rente às raízes da soja, a fim de servir de referência e orientar a avaliação das raízes laterais, bem como verticais. Foram fotografadas, com câmera digital da marca Nikon, as raízes de acordo com bloco, tratamento e parcela.

Figura 13 - Avaliação do sistema radicular de acordo com o Método do Perfil Cultural



Fonte: Autora (2022).

O procedimento para avaliar a massa de grãos e a produtividade da cultura da soja ocorreu da seguinte forma: foram selecionados 2 metros lineares em duas linhas aleatórias de cada parcela, totalizando 4 metros lineares por parcela; todas as plantas dispostas nestes 4 metros lineares foram cortadas e ensacadas com identificação. Após, foram selecionadas 5 plantas por parcela, onde contou-se o número de legumes

e grãos de cada planta. Destas 5 plantas, selecionou-se a quantidade de 100 grãos para pesagem. Esta etapa aconteceu em 15 de maio de 2021.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Os dados foram analisados com o auxílio do *software* SAS.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO

5.1.1 Densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e grau de compactação

Uma vez que os sistemas de preparo do solo promovem modificações nos parâmetros físico-hídricos do solo, é imprescindível a avaliação de propriedades como densidade do solo, porosidade e grau de compactação para que seja possível caracterizar o ambiente físico em que as raízes de determinada cultura estão inseridas (TORMENA *et al.*, 2002). Dessa forma, a Tabela 3 representa os dados de tais propriedades na condução da cultura da soja e nos seguintes tratamentos: plantio direto (PD), escarificado (ESC), Ci6 (compactação induzida com 6 passadas) e Ci3 (compactação induzida com 3 passadas).

Tabela 3 - Propriedades físico-hídricas do solo sob as diferentes condições avaliadas

Camada (cm)	PD	ESC	Ci6	Ci3
Densidade do solo (Mg m⁻³)				
0 - 10	1,18bc*	1,06c	1,40ab	1,42a
10 - 20	1,48a	1,25b	1,51a	1,44a
20 - 30	1,40a	1,39a	1,41a	1,40a
30 - 40	1,35a	1,32a	1,33a	1,36a
Porosidade do solo (m³ m⁻³)				
0 - 10	0,59ab	0,63a	0,52bc	0,51c
10 - 20	0,48b	0,57a	0,48b	0,50b
20 - 30	0,51a	0,52a	0,51a	0,51a
30 - 40	0,53a	0,54a	0,54a	0,53a
Microporosidade (m³ m⁻³)				
0 - 10	0,38b	0,36b	0,45a	0,41ab
10 - 20	0,42a	0,37b	0,43a	0,42a
20 - 30	0,43a	0,41a	0,42a	0,43a
30 - 40	0,44a	0,42a	0,43a	0,44a
Macroporosidade (m³ m⁻³)				
0 - 10	0,21ab	0,28a	0,07c	0,10bc
10 - 20	0,07b	0,20a	0,04b	0,09b
20 - 30	0,10a	0,11a	0,10a	0,09a
30 - 40	0,09a	0,12a	0,11a	0,09a

Grau de compactação (%)				
0 - 10	79,97bc	71,54c	94,69ab	95,77a
10 - 20	100,00a	84,36b	102,19a	97,34a
20 - 30	94,88a	94,00a	95,03a	94,72a
30 - 40	91,56a	89,27a	90,16a	91,58a

*Médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

PD refere-se a plantio direto; ESC, a escarificado; Ci6, compactação induzida com 6 passadas; e Ci3, compactação induzida com 3 passadas.

Fonte: Autora (2022).

Em todos os parâmetros físico-hídricos avaliados (densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e grau de compactação), os efeitos dos diferentes manejos adotados no experimento foram observados somente até os 20 cm de profundidade do solo. A variação da profundidade de atuação de um escarificador de hastes de dimensões semelhantes ao equipamento utilizado no projeto em questão (0,03 m de largura e ângulo em relação ao solo de 30°, caracterizando modelo de haste reta), situou-se na faixa de 0,18 a 0,28 m, o que justifica a espessura de solo afetada (0-20 cm) (GIRARDELLO *et al.*, 2014). Esta condição corrobora com os resultados obtidos em experimento feito com plantio direto, preparo convencional e preparo mínimo em um Latossolo Vermelho Distrófico, onde os autores salientam que o tipo de implemento utilizado afeta diretamente a estrutura do solo logo após a aplicação (TORMENA *et al.*, 2002).

A compactação induzida interferiu de forma imediata na resistência do solo à penetração logo após a operação (Gráficos 4 e 5), o que alterou o ambiente físico durante todo o desenvolvimento da soja e resultou, ao final do ciclo da cultura, em aumento da densidade do solo para estes tratamentos. Além disso, na camada superficial, de 0 a 10 cm de profundidade, Ci3 possuiu a maior densidade do solo (1,42 Mg m⁻³) não diferindo significativamente de Ci6 (1,40 Mg m⁻³); Ci6, por sua vez, não diferiu significativamente de PD (1,18 Mg m⁻³), apresentando valores intermediários; enquanto ESC possuiu a menor densidade (1,06 Mg m⁻³), entretanto, não diferiu significativamente de PD. Na camada de 0 a 20 cm de profundidade, ESC diferiu significativamente dos demais tratamentos, apresentando a menor densidade (1,25 Mg m⁻³).

A escarificação mecânica diminui a densidade do solo e propicia aumento dos poros imediatamente após a operação, contudo, há divergências acerca do tempo de duração destes efeitos sobre o solo. No experimento avaliado, efeitos residuais foram

percebidos até 6 meses após a operação. Girardello *et al.* (2014) alerta sobre o uso de escarificadores sem diagnóstico prévio da área ou necessidade de operação: o processo de escarificação demanda elevada potência de maquinário e alto consumo de combustível e tempo. Para Drescher *et al.* (2016), o tempo de duração da escarificação mecânica foi de 18 meses; já, para Secco e Reinert (1997), o efeito residual da escarificação sobre as propriedades do solo foi de até 10 meses após a operação.

Em áreas de lavoura manejadas sob PD, a camada superficial do solo, de 0 a 5 cm, pode apresentar maiores valores de densidade do solo, devido a ocorrência sistemática do tráfego de máquinas e não revolvimento do solo (TORMENA *et al.*, 2002; FURTADO, 2008). Porém, no decorrer do tempo e através da adoção de práticas como rotação de culturas e diversificação de espécies, ocorre, em muitos casos, acréscimo de matéria orgânica na superfície do solo neste sistema de manejo, o que resulta em redução da densidade do solo e aumento do volume de poros (BARROS, 2017). Em concordância com a situação descrita, a densidade do solo em PD não apresentou valores superiores na camada superficial, visto que o sistema de manejo de solo adotado há mais de 30 anos no local do experimento é plantio direto.

Reinert *et al.* (2003), ao avaliar o crescimento radicular de diferentes culturas sob aspectos físicos do solo distintos, constatou: o crescimento normal das plantas ocorre até a densidade de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$; a partir deste valor podem ocorrer restrições e deformações na morfologia das raízes, gerando queda de produtividade. A maior densidade do solo observada na camada superficial foi em Ci3, sendo $0,02 \text{ Mg m}^{-3}$ superior ao valor crítico de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$. Já na camada de 10 a 20 cm, somente ESC apresentou condição inferior ao limite máximo ($1,25 \text{ Mg m}^{-3}$).

Ao passo que a densidade do solo se refere a massa de uma amostra de solo em um volume conhecido, sem descontar a quantidade de poros; a porosidade do solo representa as cavidades existentes nesta amostra (RIBEIRO *et al.*, 2006). Estas cavidades possuem diferentes tamanhos e formas que são determinados pelo arranjo das partículas. A densidade do solo e porosidade total se correlacionam, tendo em vista que a primeira é afetada por cultivos que alteram o volume de poros (KLEIN; LIBARDI, 2002). Ainda, quanto maior for a densidade do solo, menor a quantidade de poros, especialmente de diâmetro superior a 0,05 mm (macroporos) (COLLARES *et al.*, 2006).

ESC apresentou maior número de poros totais em 0-10 e em 10-20 cm (0,63 e 0,57 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente). Contudo, na camada superficial (0-10 cm), ESC não diferiu significativamente de PD (0,59 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); PD não diferiu significativamente de Ci6 (0,52 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); e Ci6 não diferiu significativamente de Ci3 (0,51 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Já, de 10 a 20 cm, ESC diferiu significativamente do restante dos tratamentos (PD, Ci3 e Ci6), assim como em relação à densidade do solo.

Tormena *et al.* (2002) observaram que o sistema de preparo do solo (escarificação - PM) promoveu aumento na porosidade do solo na camada superficial (0-10 cm), quando comparado ao plantio direto (PD). A porosidade total em PM foi de 0,43 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e em PD, 0,37 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Neste trabalho, ESC e PD diferiram significativamente na camada de 10 a 20 cm. Este fato pode ser explicado pela operação de preparo mínimo e/ou equipamento utilizado.

Amaro Filho (1982) e Anderson e Bouma (1973) explicam que para que seja possível compreender de forma assertiva o comportamento de determinado solo, é fundamental avaliar a distribuição dos poros de acordo com seus tamanhos e não somente a porosidade total. Klein e Libardi (2002) classificam como macroporos, poros com diâmetro superior a 0,05 mm e microporos, aqueles com diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm.

Os valores de microporosidade diferiram significativamente, também, nas camadas superficiais (0-20 cm), onde observou-se que de 0 a 10 cm de profundidade houve maior quantidade de microporos em Ci6 (0,45 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), não diferindo significativamente de Ci3 (0,41 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ambos compactação induzida. Rosa *et al.* (2015) associaram 0,33 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ como valor crítico em seu experimento para microporosidade. Collares *et al.* (2006) afirmaram que em cenários de compactação acentuada, ocorre, regularmente, aumento da microporosidade e redução da macroporosidade, sobretudo. Esse processo acontece até que os valores de microporosidade atinjam proximidade aos de porosidade total.

O aumento da microporosidade se dá em consequência da redução da macroporosidade, sobretudo (KLEIN; LIBARDI, 2002). Os mesmos autores, ao analisar sistema de manejo de sequeiro em relação à mata, observaram que houve redução da macroporosidade até os 40 cm de profundidade, o que levou ao acréscimo do número de microporos. Isto porque, para Secco *et al.* (2009), quando a quantidade de macroporos for inferior a 10%, associada à resistência do solo à penetração maior

que 2 MPa e, para solos muito argilosos, densidade superior a $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, há evidências claras de solo compactado.

Para a profundidade de 0 a 10 cm, a menor macroporosidade foi obtida em Ci6 ($0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), não diferindo significativamente de Ci3 ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Já a condição com maior número de macroporos foi encontrada em ESC ($0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), o qual não diferiu significativamente de PD ($0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Os menores valores de Ma são iguais ou inferiores ao valor crítico de 10%.

Na camada subsuperficial, ESC proporcionou aumento do número de macroporos ($0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), diferindo significativamente dos demais tratamentos e corroborando com os resultados de Abreu *et al.* (2004), Tormena *et al.* (2004) e Secco *et al.* (2004), os quais verificaram que em solos submetidos à escarificação incrementa-se o valor de macroporosidade.

O grau de compactação, por sua vez, é dependente do sistema de manejo utilizado e reflete a espessura da camada mobilizada, bem como o histórico de uso, pressões exercidas, umidade no momento das operações e número de passadas dos equipamentos (SECCO *et al.*, 2004). Desta forma, nos primeiros 10 cm do solo, Ci6 e Ci3 (94,69 e 95,77%, respectivamente) possuíram maior grau de compactação; Ci6 não diferiu significativamente de PD (79,97%); o último não apresentou diferença estatística de ESC (71,54%). Já, de 10 a 20 cm de profundidade, o menor grau de compactação foi obtido ESC (84,36%), diferindo significativamente dos outros três tratamentos.

O menor grau de compactação foi obtido no manejo escarificado, de 10 a 20 cm de profundidade, quando houve maior número de macroporos e porosidade total e menor número de microporos e densidade do solo em comparação aos demais tratamentos, o que frisa que as propriedades avaliadas interagem entre si.

Drescher *et al.* (2016), ao avaliar as alterações de diferentes manejos em propriedades físico-hídricas do solo, constatou que o grau de compactação foi superior a 90% em quase todos os tratamentos. Esse comportamento também foi percebido no experimento.

Suzuki (2005) obteve as maiores produtividades de soja com valores de grau de compactação próximos a 82%, em lavouras comerciais do Rio Grande do Sul. O valor mais próximo ao encontrado pelo autor foi identificado em PD, na camada de 0 a 10 cm (79,97%).

5.1.2 Curva de retenção de água e faixas de disponibilidade de água

A Tabela 4 representa a curva de retenção de água obtida até 40 cm de profundidade do solo.

Tabela 4 - Retenção de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em diferentes potenciais matriciais para distintas camadas de solo sob as condições de manejo e níveis de compactação avaliados

Potencial matricial (kPa)	Tratamentos					
	PD	ESC	Ci6	Ci3	DMS	CV
Camada de 0- 10 cm						
0	0,59ab	0,65a	0,56b	0,53b	0,089	8,44
6	0,38b	0,36b	0,45a	0,41ab	0,068	9,32
10	0,37b	0,34b	0,44a	0,40ab	0,065	9,29
33	0,34b	0,32b	0,43a	0,38ab	0,071	10,66
100	0,33ab	0,30b	0,39a	0,37ab	0,070	11,20
500	0,29bc	0,26c	0,35a	0,33ab	0,061	11,05
1000	0,25bc	0,22c	0,29ab	0,30a	0,047	9,80
1500	0,24ab	0,21b	0,28a	0,28a	0,047	10,38
Camada 10 - 20 cm						
0	0,51b	0,59a	0,52b	0,49b	0,041	4,34
6	0,42a	0,37b	0,43a	0,42a	0,035	4,74
10	0,42a	0,36b	0,43a	0,41ab	0,039	5,36
33	0,40a	0,33b	0,41a	0,39a	0,043	6,19
100	0,39a	0,32b	0,40a	0,38ab	0,040	5,70
500	0,35a	0,29b	0,36a	0,35a	0,038	6,19
1000	0,31a	0,26b	0,32a	0,30a	0,032	6,09
1500	0,30a	0,25b	0,30a	0,29a	0,030	5,94
Camada 20 - 30 cm						
0	0,54a	0,53a	0,51a	0,51a	0,087	9,19
6	0,42a	0,41a	0,42a	0,43a	0,037	4,91
10	0,42a	0,40a	0,41a	0,42a	0,037	5,01
33	0,40a	0,38a	0,39a	0,40a	0,035	4,93
100	0,39a	0,37a	0,38a	0,39a	0,04	6,19
500	0,36a	0,34a	0,35a	0,36a	0,038	5,97
1000	0,30a	0,29a	0,30a	0,29a	0,036	6,78
1500	0,28a	0,28a	0,28a	0,28a	0,033	6,51
Camada 30 - 40 cm						
0	0,54a	0,53a	0,52a	0,54a	0,045	4,68
6	0,44a	0,42a	0,43a	0,44a	0,023	2,96
10	0,43a	0,41a	0,42a	0,43a	0,022	2,92
33	0,41a	0,39a	0,41a	0,41a	0,029	4,00

100	0,39a	0,38a	0,39a	0,40a	0,025	3,66
500	0,36a	0,35a	0,36a	0,36a	0,023	3,63
1000	0,28a	0,28a	0,28a	0,28a	0,033	6,54
1500	0,27a	0,27a	0,27a	0,27a	0,031	6,45

*Médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

PD refere-se a plantio direto; ESC, a escarificado; Ci6, compactação induzida com 6 passadas; e Ci3, compactação induzida com 3 passadas.

Fonte: Autora (2022).

A curva de retenção de água no solo também é conhecida como curva característica de água no solo, em função de englobar diversas aplicações técnicas, como: determinação da capacidade de campo do solo, ponto de murcha permanente e da disponibilidade total de água no solo (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2007). Pode-se perceber, através da Tabela 4, que a curva de retenção de água foi influenciada pelos tratamentos até 20 cm de profundidade, possuindo comportamento semelhante aos parâmetros físicos já analisados.

A tensão de água de 10 kPa corresponde à umidade na capacidade de campo, ou seja, à quantidade máxima de água retida no solo facilmente disponível às plantas (ZONTA *et al.*, 2016). Na camada de 0 a 10 cm, portanto, Ci6 apresentou maior umidade ($0,44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), não diferindo significativamente de Ci3 ($0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); o último não diferiu significativamente de PD e ESC ($0,37$ e $0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente). Na camada de 10 a 20 cm de profundidade, ESC possuiu a menor umidade ($0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), não diferindo significativamente de Ci3 ($0,41 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

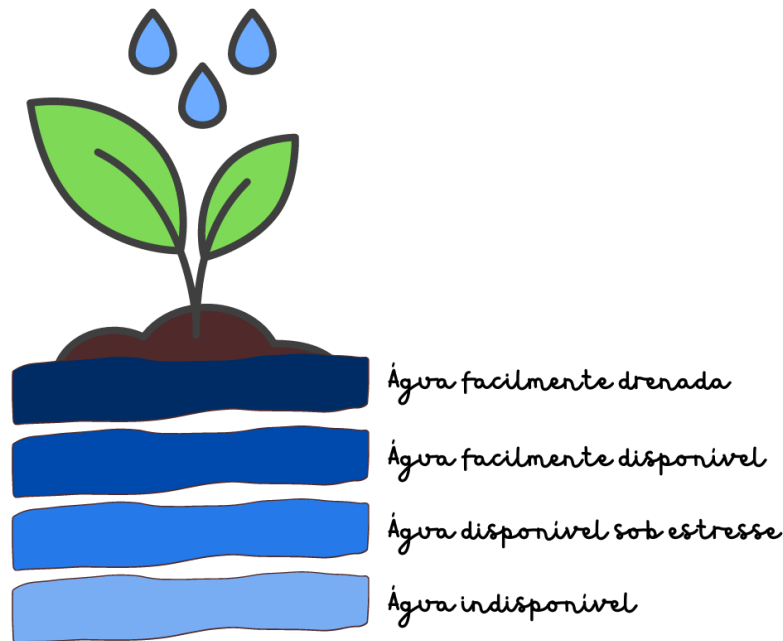
A umidade no ponto de murcha permanente é definida como o limite inferior de armazenamento de água no solo e está retida às tensões de 1500 kPa, sendo a última etapa da curva de retenção de água. A 1500 kPa, na camada de 0 a 10 cm de profundidade, Ci6 e Ci3 apresentaram valores superiores de umidade (ambos $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), não diferindo significativamente de PD ($0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); PD, por sua vez, não possuiu diferença estatística de ESC ($0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Na camada subsuperficial, de 10 a 20 cm, somente ESC possuiu a menor umidade entre os tratamentos avaliados, diferindo estatisticamente dos demais ($0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Drescher *et al.* (2016) concluiu que propriedades do solo relacionadas ao transporte de água, como condutividade hidráulica e taxa de infiltração de água são mais sensíveis ao avaliar as interferências da descompactação mecânica. Considerando que a escarificação das parcelas afetou algumas propriedades físicas do solo, como redução da densidade do solo, por exemplo, o efeito desse processo

não contribuiu expressivamente no acréscimo do conteúdo de água no solo em favorecimento das plantas.

O solo serve como um reservatório de água para as plantas e, da mesma forma, que a sua estrutura é afetada de acordo com as práticas adotadas sobre o mesmo, a disponibilidade de água para o abastecimento da necessidade das plantas também sofre consequências (KLEIN; LIBARDI, 2000). Torna-se dificultado, conforme o solo seca, o movimento de água no solo em direção às raízes, visto que a força de retenção entre as partículas aumenta (SANTOS; CARLESSO, 1998). Isto posto, é fundamental compreender quais são as faixas de disponibilidade de água no solo (Figura 14), uma vez que nem toda a água presente no solo está disponível às culturas.

Figura 14 - Ilustração das faixas de disponibilidade de água



Fonte: Autora (2022).

Para exemplificação de como ocorre a dinâmica de água no solo de acordo com as faixas de disponibilidade, imagine um dia chuvoso. Todos os poros do solo ficam preenchidos com a água da chuva e o solo encontra-se na sua capacidade máxima de retenção de água (solo saturado). Nesta condição, o conteúdo de água do solo é praticamente igual à porosidade total. Então, a chuva cessa e a drenagem dos macroporos acontece rapidamente em resposta à ação da gravidade (água facilmente drenada). Após esse processo, o solo encontra-se na sua capacidade de campo, onde os poros estão preenchidos com água útil às plantas (água facilmente disponível). A partir daí, não ocorreu mais precipitação pluviométrica e iniciou-se o processo de

secagem. Toda a água dos macroporos é removida pelas raízes e então os poros menores começam a ser esvaziados. Nestes poros, as forças de atração da água às superfícies são maiores e torna-se cada vez mais difícil para as plantas removerem a água em quantidade suficiente para suprir sua demanda energética (água disponível sob estresse). Até que o potencial de água no solo apresenta valor próximo a 1500 kPa (água indisponível). Existe umidade no solo, mas esta água já não é mais absorvida pelas plantas pela relação entre os tamanhos dos poros e a força existente entre eles.

A CAD, capacidade de água disponível no solo, na prática, representa o máximo de água que o solo pode ter, levando em consideração as suas características físicas (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2012).

A Tabela 5 apresenta as faixas de disponibilidade de água em camadas estratificadas e ao total ao longo do perfil do solo de acordo com o preparo do solo adotado em cada tratamento.

Tabela 5 - Faixas de disponibilidade de água em camadas estratificadas e ao longo do perfil do solo

Faixa de disponibilidade de água	PD	ESC	Ci6	Ci3
Camada de 0-10 cm				
Água facilmente drenada (mm)	22,5ab*	30,7a	12,1b	12,7b
Água facilmente disponível (mm)	8,3a	8,5a	8,5a	7,5a
Água disponível sob estresse (mm)	4,9a	4,7a	7,3a	4,5a
Água indisponível (mm)	23,7bc	21,2c	28,0ab	28,4a
CAD (mm)	13,3a	13,1a	15,8a	11,9a
Camada de 10-20 cm				
Água facilmente drenada (mm)	9,9b	22,7a	8,8b	8,7b
Água facilmente disponível (mm)	6,2a	6,7a	6,4a	5,4a
Água disponível sob estresse (mm)	5,6ab	4,2b	6,2a	6,4a
Água indisponível (mm)	29,6a	24,5a	30,3a	28,8a
CAD (mm)	11,9ab	10,8b	12,6a	11,8ab
Camada de 20-30 cm				
Água facilmente drenada (mm)	12,1a	13,4a	10,8a	9,4a
Água facilmente disponível (mm)	6,3a	5,9a	6,2a	6,3a
Água disponível sob estresse (mm)	7,4a	6,4a	6,3a	7,6a
Água indisponível (mm)	28,1a	27,8a	28,1a	28,0a
CAD (mm)	13,7a	12,3a	12,8a	13,8a
Camada de 30-40 cm				
Água facilmente drenada (mm)	12,2a	9,8a	11,2a	12,2a
Água facilmente disponível (mm)	6,4a	6,4a	6,7a	6,4a
Água disponível sob estresse (mm)	8,4a	9,2a	9,2a	8,4a
Água indisponível (mm)	26,4a	26,7a	27,1a	26,4a
CAD (mm)	14,8a	15,6a	15,8a	14,8a

	Camada de 0-40 cm			
Água facilmente drenada (mm)	55,2b	78,9a	41,5b	41,9b
Água facilmente disponível (mm)	28,3a	27,4a	27,5a	25,9a
Água disponível sob estresse (mm)	26,5ab	23,5b	28,9a	27,6a
Água indisponível (mm)	108,5ab	100,4b	113,1a	112,3a
CAD (mm)	54,7ab	50,9b	56,4a	53,5ab

*Médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

PD refere-se a plantio direto; ESC, a escarificado; Ci6, compactação induzida com 6 passadas; e Ci3, compactação induzida com 3 passadas.

Fonte: Autora (2022).

A faixa de disponibilidade de água, seguindo o comportamento dos demais parâmetros físico-hídricos, também foi afetada somente até os 20 cm de profundidade. Na camada superficial do solo (0-10 cm), ESC e PD (30,7 e 22,5 cm³ cm⁻³, respectivamente) apresentaram os maiores valores no que diz respeito à água facilmente drenada, não diferindo significativamente entre si.

Houve diferença estatística quanto à água indisponível. Klein e Libardi (2002) ressaltam que as condições de umidade próximas ao PMP são pontos importantes a serem avaliados, pois significa, simplesmente, que existe maior quantidade de água indisponível às plantas, ou seja, água sem utilidade as mesmas. Sendo assim, nesta mesma camada, Ci3 e Ci6 apresentaram os maiores valores (28,4 e 28,0 cm³ cm⁻³, respectivamente), sem diferença estatística entre os mesmos.

Sobre a camada de 10 a 20 cm de profundidade, observou-se que a água facilmente drenada pelos macroporos, de maneira rápida foi maior em ESC (22,7 cm³ cm⁻³), ao diferir significativamente das outras condições. Este fato pode ser explicado pela desestabilização dos agregados e desestruturação do solo ao ser realizada a estratificação, comprometendo a continuidade dos poros e expondo-os à evaporação da água existente entre essas partículas. Em muitos casos, os efeitos físicos benéficos de ESC (sobre densidade e RP, por exemplo) são anulados pela rápida perda de água no solo, em face de um maior volume de poros drenáveis (TORMENA *et al.*, 2002).

5.2 DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO AO LONGO DO CICLO DA SOJA

O Gráfico 6 representa a umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da soja. A profundidade avaliada é de 20 cm, camada onde concentram-se a maioria dos

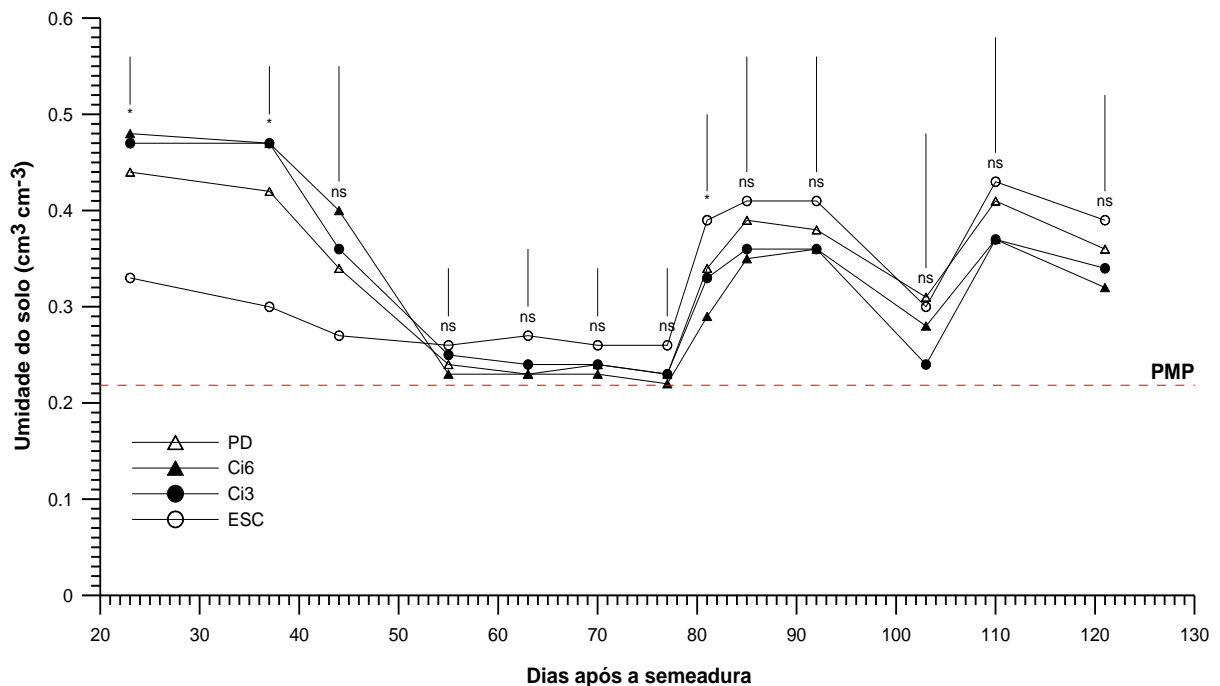
nutrientes e ocorre o crescimento e desenvolvimento das raízes de grande parte das culturas de interesse agrônomo.

Collares *et al.* (2008) observaram que a umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo das culturas de trigo e feijão possuiu elevada taxa de variação, de 0,22 a 0,37 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, especialmente nas camadas superficiais (0-20 cm). Este comportamento também foi verificado; a umidade volumétrica do solo variou de 0,22 a 0,48 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Esta variação, visível no Gráfico 6, está diretamente ligada a precipitação pluvial ocorrida no local do experimento, representada pelo Gráfico 7.

O valor de PMP (0,22 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foi obtido em avaliações realizadas na área experimental da UFFS, campus Cerro Largo, porém, esses resultados ainda não foram divulgados.

No Gráfico 6, verifica-se que em torno de 55 a 80 dias após a semeadura da soja, a umidade volumétrica do solo encontrou-se próxima ao ponto de murcha permanente, representado pela linha horizontal vermelha. Durante esse período (25 dias) choveu, aproximadamente, 125 mm e a cultura estava iniciando o estágio reprodutivo (V8 a R1/R2).

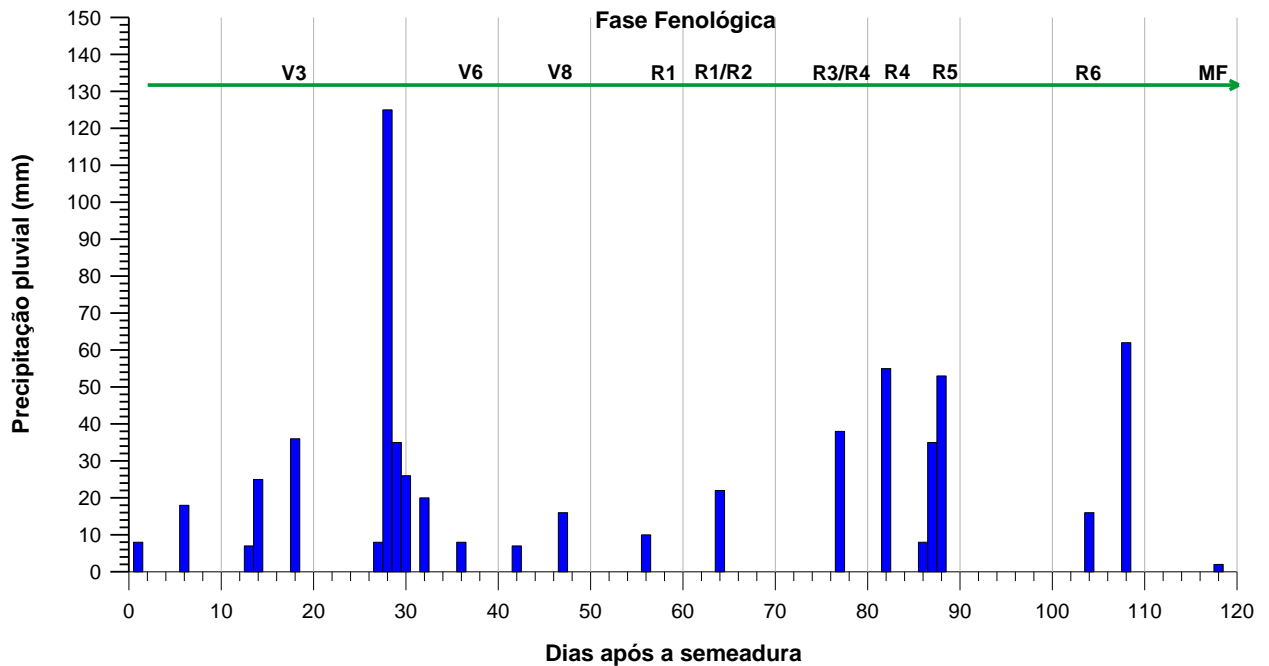
Gráfico 6 - Umidade volumétrica do solo ao longo dos dias após a semeadura da soja



*As linhas verticais comparam as médias entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autora (2022).

Gráfico 7 - Índices pluviométricos durante todo o ciclo da cultura da soja, em dias após a semeadura



Fonte: Autora (2022).

De acordo com Farias, Neumaier e Nepomuceno (2021), o volume de água para atender a fase crítica (R1 a R6) é de 120 mm. Entretanto, uma má distribuição da precipitação é capaz de gerar perdas drásticas no rendimento de grãos, sobretudo, em períodos reprodutivos. Os autores verificaram que houve queda de produtividade em virtude de restrições hídricas durante algumas fases de desenvolvimento da planta, apesar de o total de chuva ter sido de 700 mm. No experimento, a precipitação pluviométrica totalizou 640 mm, mas a umidade do solo, especialmente, em ESC ficou próxima ao PMP em diversos momentos.

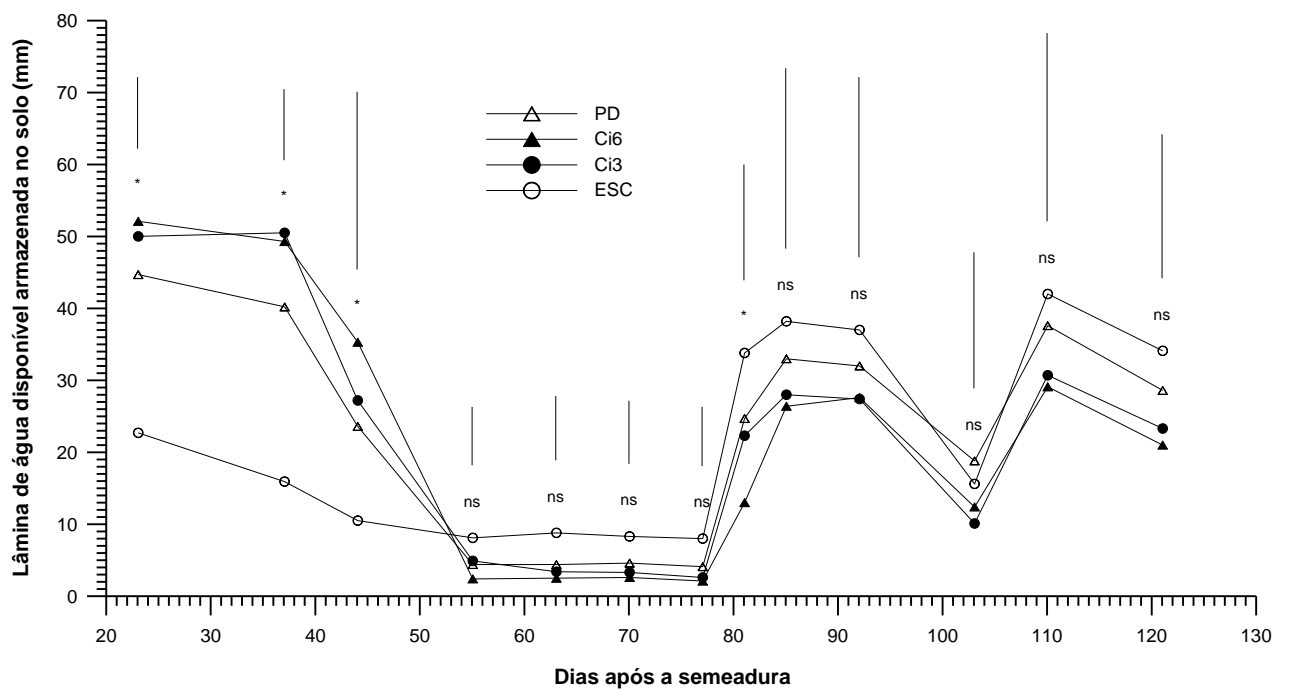
No primeiro ponto, ESC diferiu significativamente dos demais tratamentos, apresentando o menor valor de umidade do solo ($0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Comportamento similar foi verificado no segundo ponto de avaliação, cerca de 40 dias após a semeadura: ESC e PD diferiram significativamente de Ci6 e Ci3, porém foram iguais, estatisticamente, entre si. 82 dias após a semeadura, ESC diferiu significativamente apenas de Ci6, possuindo valor superior de umidade.

Novamente, Klein e Libardi (2002) descrevem a importância de avaliar os resultados rentes ao PMP. Sendo assim, até, aproximadamente, metade do ciclo da cultura da soja, é possível perceber que os menores valores de umidade do solo foram de ESC; estes estiveram próximos ao limite crítico que o ponto de murcha permanente

representa, ou seja, faixa onde a quantidade de água presente no solo torna-se indisponível às plantas.

O Gráfico 8 ilustra o cenário descrito acima, onde foi calculada a lâmina de água disponível armazenada no solo, em mm, no decorrer dos dias após a semeadura de acordo com as diferentes condições físico-hídricas promovidas no experimento.

Gráfico 8 - Lâmina de água disponível no solo até a camada de 20 cm de profundidade



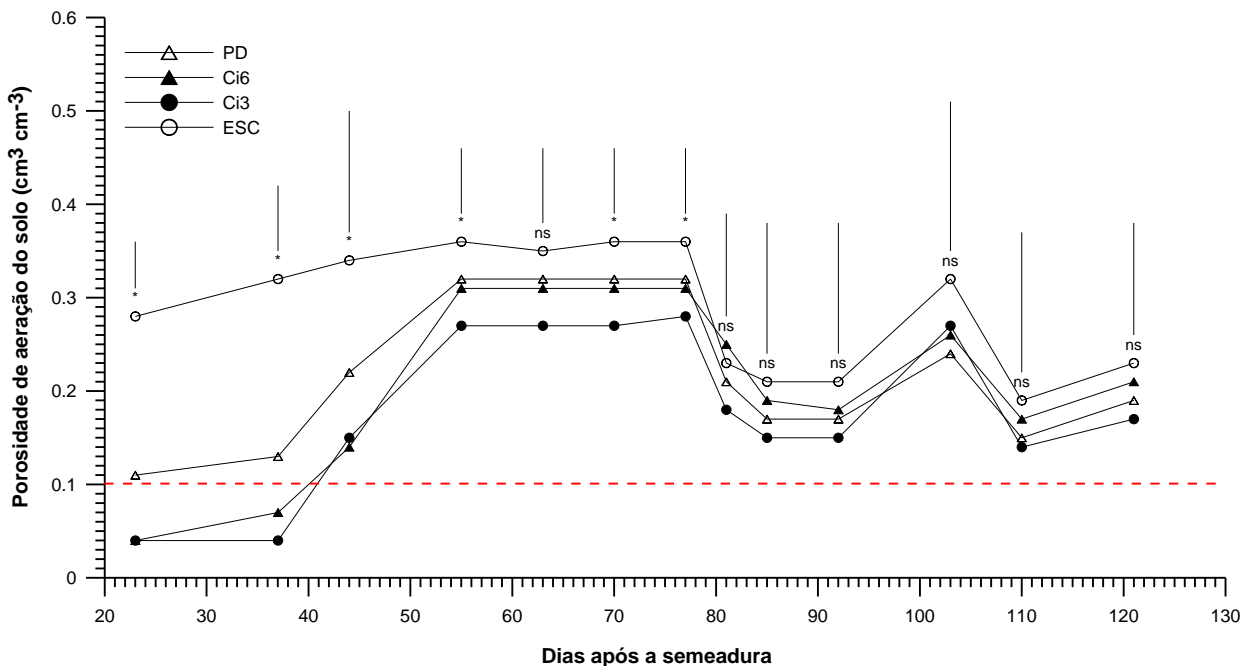
*As linhas verticais comparam as médias entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.
Fonte: Autora (2022).

Dos quatro pontos de umidade do solo avaliados, onde verificou-se distinção estatística entre os tratamentos, em três, ESC apresentou o menor valor de lâmina de água disponível no solo, diferindo significativamente de PD, Ci3 e Ci6. Cássaro *et al.* (2011) estudaram as modificações dos volumes dos poros em um Latossolo submetido ao plantio direto e ao plantio convencional por longo prazo; estes autores evidenciaram que a mobilização praticamente nula do solo influencia positivamente na quantidade de água disponível às plantas. Dalmago *et al.* (2009) afirmaram que a distribuição de poros de tamanhos superiores é maior em PD, o que determina menor energia de retenção de água sob estresse e, conseqüentemente, maior disponibilidade às plantas.

A porosidade de aeração (Gráfico 9) obtém-se pela diferença entre a porosidade total e a umidade volumétrica do solo; é um dado importante, visto que

entre uma das alterações cruciais ocasionadas pela compactação, principalmente em regiões úmidas, é a redução da porosidade de aeração (KLEIN *et al.*, 2008). O seu efeito é nocivo às plantas, pois afeta a difusão dos gases junto ao sistema radicular das plantas.

Gráfico 9 - Porosidade de aeração do solo sob diferentes condições físico-hídricas avaliadas até a profundidade de 20 cm do solo



*As linhas verticais comparam as médias entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.
Fonte: Autora (2022).

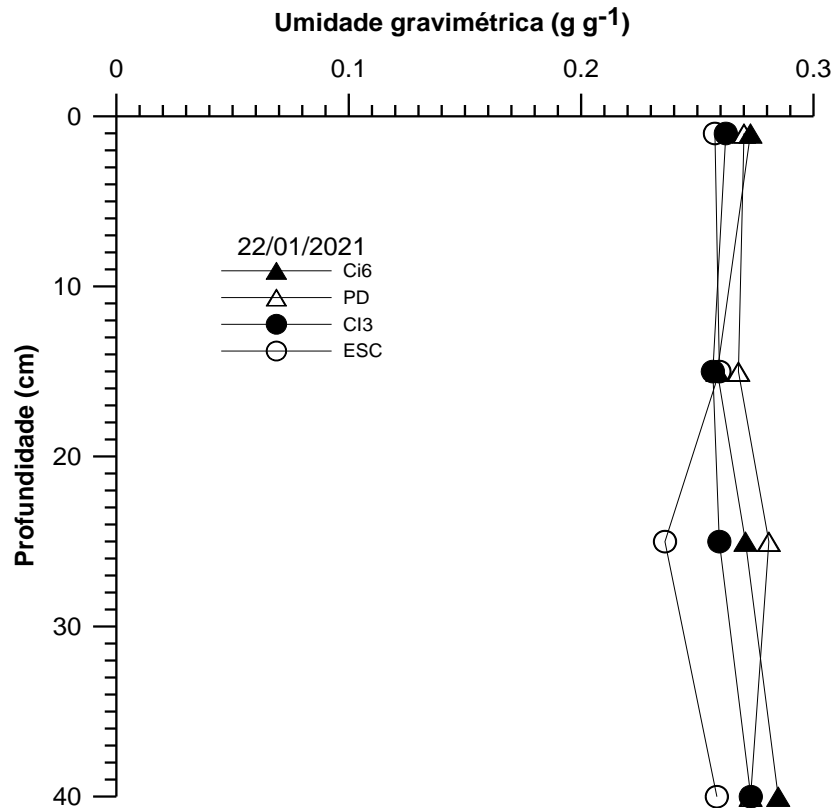
Comumente, entende-se que valores de porosidade de aeração (poros livres) menores que $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ implicam em limitações ao pleno crescimento e desenvolvimento das plantas por afetarem o fluxo e troca de gases (TORMENA *et al.*, 1998). Este valor está representado pela linha horizontal vermelha no gráfico.

É sabido que a adoção do SPD gera alterações evidentes nas propriedades físicas do solo; uma destas mudanças está ligada à diminuição dos poros livres de ar, bem como aumento da densidade do solo (CAMARA; KLEIN, 2005).

Até cerca de 45 DAS da soja, Ci6 e Ci3 apresentaram a pior condição de porosidade de aeração (abaixo do valor crítico) devido à compactação induzida drástica através do tráfego dos rodados do trator sob condição de solo plástica. PD apresentou comportamento intermediário; enquanto ESC diferiu significativamente dos demais, com valor de porosidade de aeração próximo a $0,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Klein *et al.* (2008) concluíram que ao escarificar o solo ocorreram transformações na distribuição do diâmetro dos poros e incremento na porosidade de

Gráfico 11 - Umidade gravimétrica do solo no dia 22/01/2021



Fonte: Autora (2022).

Uma vez que a resistência do solo à penetração é altamente influenciada pela condição de umidade do solo no momento da medição, faz-se necessário correlacionar estas propriedades para que os dados de RP estejam fundamentados (BARRETO *et al.*, 2005). Klein *et al.* (1998) não recomendam a determinação da RP em solos que estejam próximos a sua capacidade de campo, em função de, nesta condição, variações de densidade não serem detectadas, geralmente.

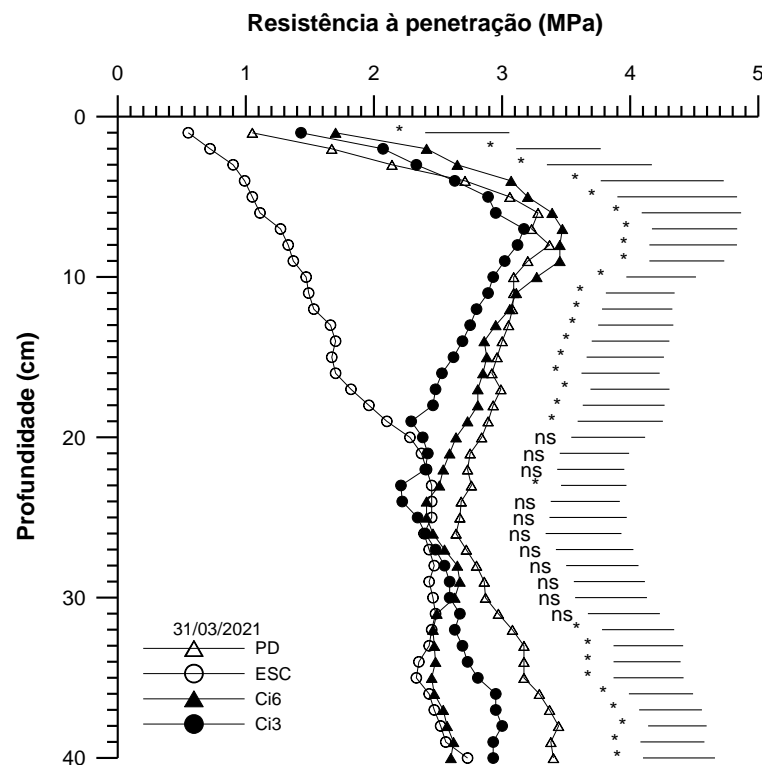
A RP integra os efeitos da densidade e da umidade e permite qualificar o ambiente solo disponível às raízes para seu crescimento e desenvolvimento (TORMENA *et al.*, 2002). É visível a redução da RP no sistema de manejo escarificado, o que corrobora com os resultados obtidos por Wutke *et al.* (2000), Tormena *et al.* (2002) e Girardello *et al.* (2014) ao indicar o efeito da escarificação na redução da densidade do solo. A influência do processo de escarificação foi perceptível até os 35 cm de profundidade. De Maria *et al.* (1999) observaram valores maiores em PD, ao comparar a RP entre preparo do solo com escarificação e plantio direto. Em inúmeros níveis de profundidade avaliados, PD e os tratamentos manejados sob compactação induzida não diferiram significativamente.

Valores muito baixos de RP (próximos a 0,5 MPa), visíveis até cerca de 10 cm de profundidade no sistema escarificado, resultaram em produtividades de soja 20% abaixo da máxima (BEUTLER *et al.*, 2004). Cordeiro Júnior *et al.* (2015) constataram rendimento de grãos 30% inferiores na cultura do milho 2ª safra em RP muito baixas. De acordo com Debiasi *et al.* (2015), um grau de compactação de solo extremamente baixo pode favorecer para uma menor retenção de água e condutividade hidráulica não saturada, o que provoca perda do rendimento de grãos da soja.

O Gráfico 12 representa a RP medida no dia 31/03/2021, ao final do ciclo da cultura. A maioria das aferições demonstraram valores superiores a 2 MPa em PD, Ci6 e Ci3 e ESC, a partir de 20 cm de profundidade, considerado nível crítico por vários autores. Mais especificamente, para Cordeiro Júnior *et al.* (2015), a RP crítica à produtividade é de 2,6 MPa na CC. Já, de acordo com Watanabe (2001), a umidade de um Latossolo Vermelho Distrófico, parecido ao solo do experimento, na CC é de 0,165 kg kg⁻¹. As avaliações em ambos os dias foram realizadas com o solo acima da CC.

A influência da escarificação, neste caso, foi inferior ao primeiro dia avaliado, ocorrendo até a profundidade de 20 cm do solo.

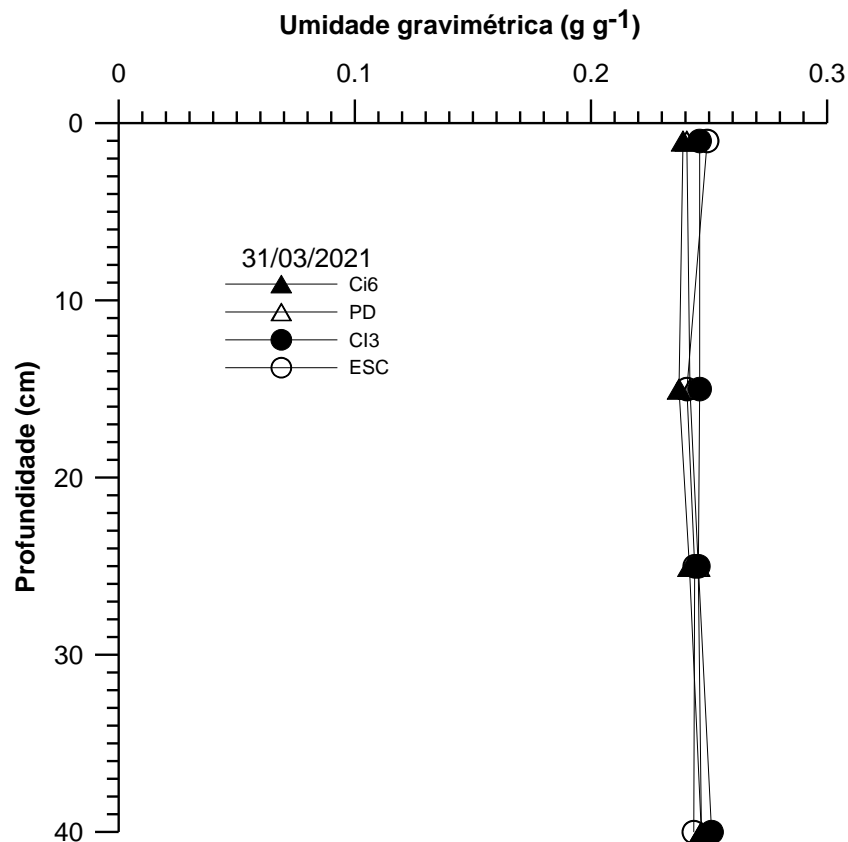
Gráfico 12 - Resistência do solo à penetração no dia 31/03/2021



*As linhas horizontais comparam as médias entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autora (2022).

Gráfico 13 - Umidade gravimétrica do solo no dia 31/03/2021



Fonte: Autora (2022).

5.4 DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DA SOJA

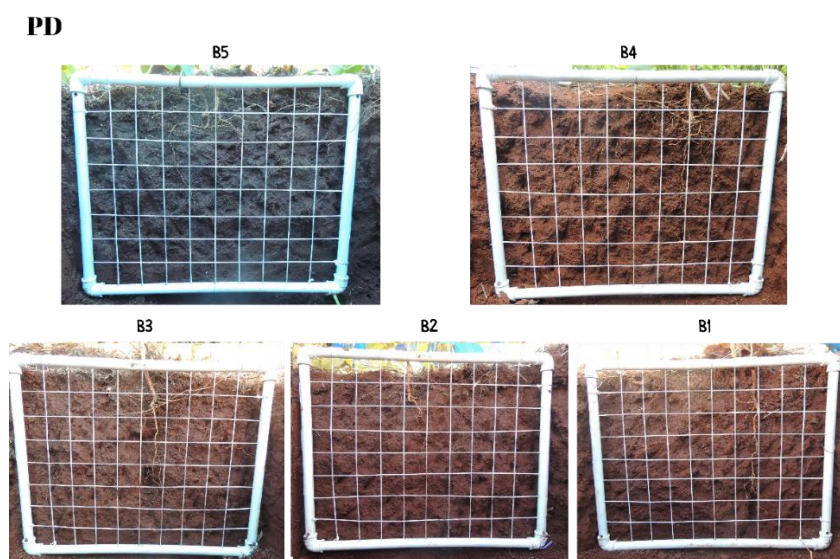
O crescimento das raízes deve ocorrer em zonas onde o solo oferece menor resistência à penetração, o que é capaz de compensar, em partes, o pequeno volume de solo explorado pelo sistema radicular da maioria das culturas de interesse agrícola, tendo em vista que ocorre concentração radicular na camada superficial do solo, ou seja, nos primeiros centímetros do perfil (REINERT *et al.*, 2008). Este cenário é mais prejudicial, contudo, em anos de déficit hídrico.

Existem inúmeras dificuldades relacionadas ao estudo do sistema radicular em função de as raízes não serem diretamente acessíveis e, muitas vezes, haver a exigência de métodos destrutivos e trabalhosos para realização da avaliação (VASCONSELOS *et al.*, 2003). Apesar disso, a distribuição do sistema radicular desempenha funções importantes na compreensão acerca dos impedimentos físicos presentes ao longo do perfil que não são visíveis – e, até mesmo, desconsiderados.

A profundidade das raízes variou de acordo com cada tratamento, podendo apresentar cerca de 35 cm de profundidade (PD) e 25 cm (Ci3), por exemplo. O crescimento da raiz principal não foi afetado de maneira a restringi-lo totalmente em função do uso de disco sulcador na semeadora. Foram verificadas maiores quantidades de raízes laterais nos tratamentos compactados.

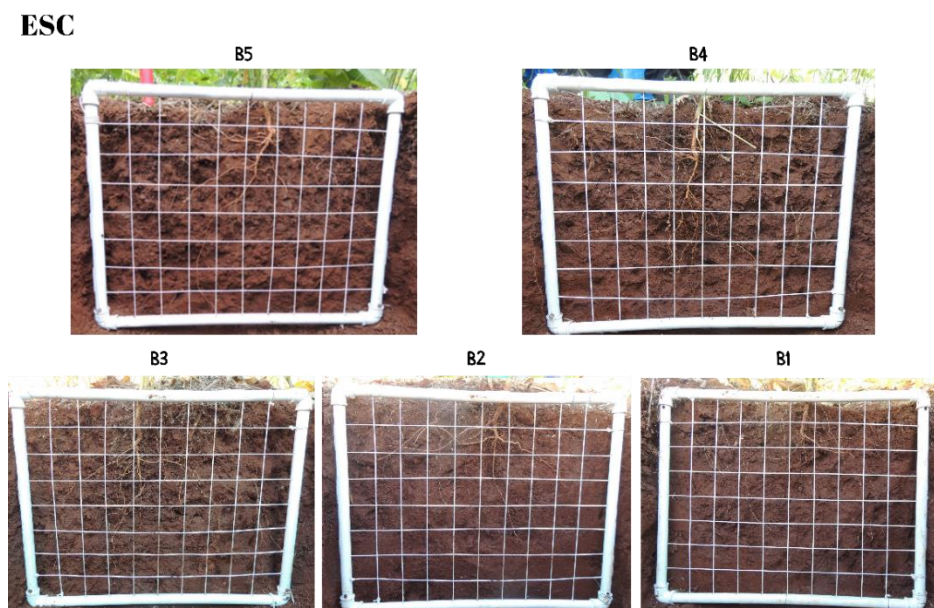
As Figuras 15, 16, 17 e 18 ilustram o comportamento das raízes da soja, conforme cada manejo adotado nos cinco blocos.

Figura 15 - Distribuição radicular da soja em PD



Fonte: Autora (2022).

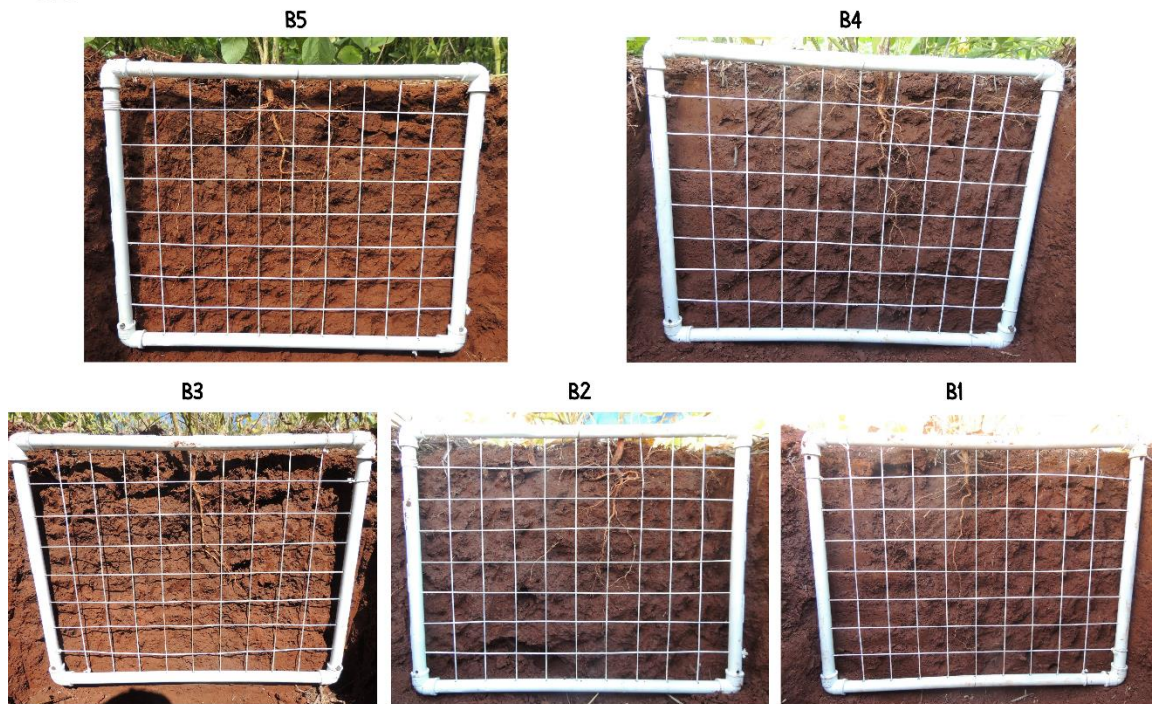
Figura 16 - Distribuição radicular da soja em ESC



Fonte: Autora (2022).

Figura 17 - Distribuição radicular da soja em Ci3

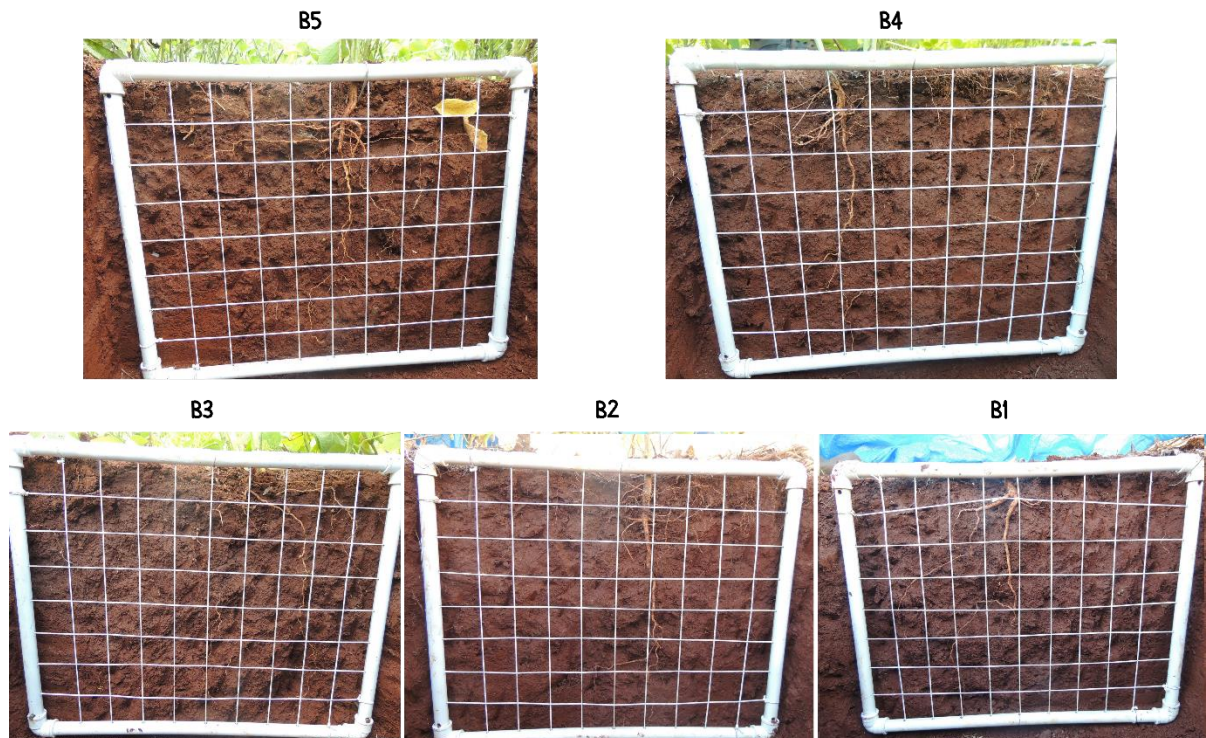
Ci3



Fonte: Autora (2022).

Figura 18 - Distribuição radicular da soja em Ci6

Ci6



Fonte: Autora (2022).

A Figura 19, 20, 21 e 22 demonstram uma imagem representativa de cada tratamento avaliado em relação ao comportamento da distribuição do sistema radicular da soja de acordo com o manejo do solo (PD, ESC, Ci6 e Ci3).

Figura 19 - Sistema radicular da soja conduzida sob PD



Fonte: Autora (2022).

Figura 20 - Sistema radicular da soja conduzida sob ESC



Fonte: Autora (2022).

Figura 21 - Sistema radicular da soja conduzida sob Ci6



Fonte: Autora (2022).

Figura 22 - Sistema radicular da soja conduzida sob Ci3



Fonte: Autora (2022).

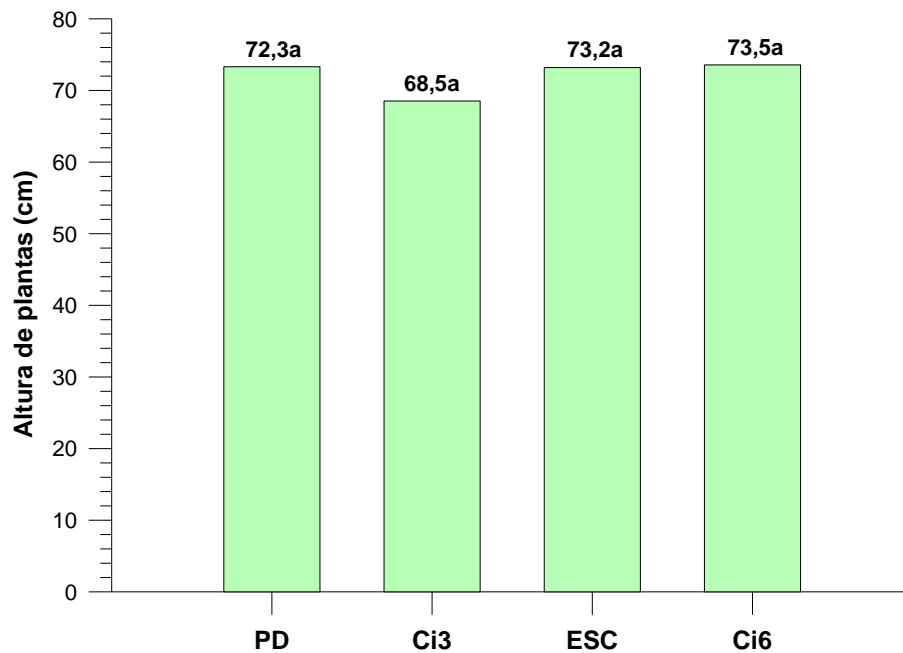
Foi possível verificar que as raízes sob condução de preparo de solo escarificado eram mais finas, se comparadas a Ci6, por exemplo. Este fato corrobora com Beutler e Centurion (2004), onde os autores salientam que a espessura das raízes aumenta ao nível que aumenta-se, também, a compactação. Os mesmos autores, ao avaliarem a distribuição do sistema radicular de um feijoeiro em um Latossolo Vermelho de textura média, verificaram que no tratamento onde o solo foi revolvido e não trafegado, ocorreu melhor distribuição do sistema radicular da soja.

Contudo, em trabalho à campo conduzido por Azevedo, Leite e Neto (2004), ao examinar a densidade radicular de diferentes sistemas (plantio direto, escarificado, plantio convencional e mata), observaram que estes não demonstraram comportamento dissemelhantes, apenas uma tendência àqueles que operam com revolvimento do solo, valores maiores. Porém, De Maria *et al.* (1999) frisa que em estudos sem estrutura de solo uniforme, coeficientes altos de variação são comuns, fazendo com que necessitem ser avaliados, conjuntamente, outros parâmetros.

5.5 ALTURA DE PLANTAS DA SOJA

Os componentes do rendimento, a altura de plantas, a duração do ciclo da cultura e a produtividade são aspectos diretamente ligados à cultivar escolhida por parte do produtor. Contudo, Amorim *et al.* (2011) relatam que a altura de plantas, bem como demais componentes do rendimento da soja, também, podem variar conforme as combinações de manejo de solo realizadas à campo.

O Gráfico 14 representa a altura de plantas da cultura da soja nos diferentes manejos de solo adotados no experimento.

Gráfico 14 - Altura de plantas da cultura da soja

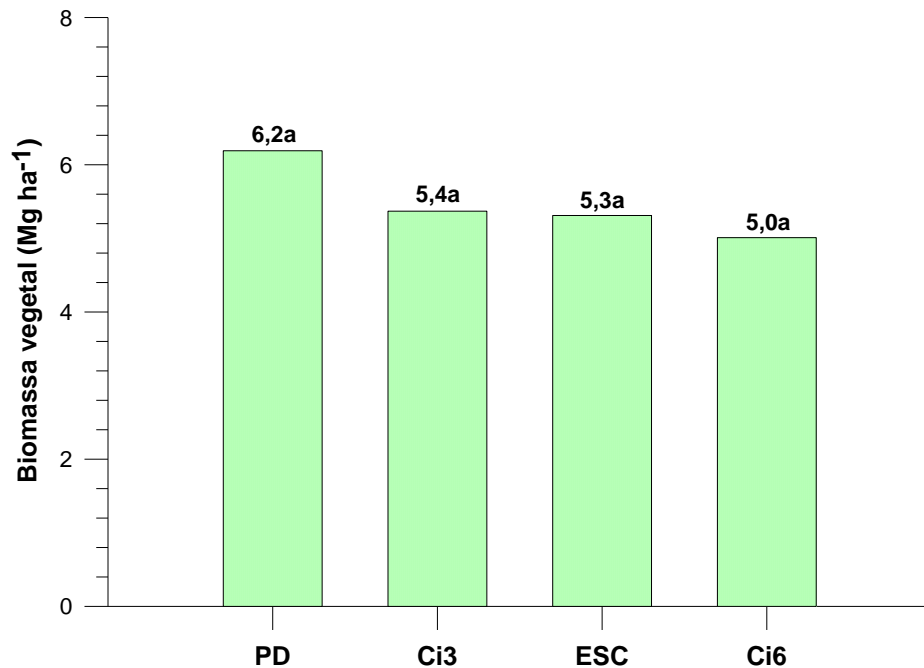
A letra "a" indica que não houve diferença estatística entre os tratamentos amostrados.
 Fonte: Autora (2022).

A altura de plantas manteve-se igual estaticamente em todos os tratamentos realizados (PD, ESC, Ci3 e Ci6), logo, esta não foi afetada pelo manejo do solo. Além disso, conforme salienta Sedyama (2009), o desejável para a colheita da soja é que as plantas tenham de 70 a 80 cm de altura. Somente Ci3 não atingiu o valor mínimo sugerido pelo autor.

Todavia, Veiga *et al.* (2019) observaram que a escarificação permitiu maior aeração do solo, o que propiciou à planta um sistema radicular mais desenvolvido e resultou em maiores alturas de plantas, quando comparada a outros tratamentos: plantio convencional e camalhão – semeadura de soja em camalhão não escarificado.

5.6 BIOMASSA VEGETAL DA SOJA

O Gráfico 15 representa a produção de biomassa vegetal da cultura da soja manejada sob os diferentes sistemas de preparo do solo avaliados no experimento. O valor de biomassa vegetal variou de 6,2 a 5,0 Mg ha⁻¹.

Gráfico 15 - Biomassa vegetal da cultura da soja

A letra "a" indica que não houve diferença estatística entre os tratamentos amostrados.
Fonte: Autora (2022).

Existem diversos estudos relacionados à biomassa vegetal, contudo, grande parte destes engloba o uso de plantas de cobertura na contribuição do aumento da biomassa vegetal e pousio. Wolschick *et al.* (2016) concluíram que a massa seca da parte aérea de aveia foi de 9,91 Mg ha⁻¹; ervilhaca, 9,14 Mg ha⁻¹; consórcio, 9,68 Mg ha⁻¹; e nabo, 4,26 Mg ha⁻¹.

A biomassa vegetal da soja não diferiu significativamente entre os tratamentos avaliados, o que pode ter relação com a altura de plantas que possuiu o mesmo comportamento, uma vez que o crescimento da planta é influenciado pela própria quantidade de substâncias orgânicas produzidas nos vegetais (MELO, 2013).

Kutah e Barbosa (2018) avaliaram o desenvolvimento vegetal de aveia e trigo em dois sistemas de manejo: semeadura direta (SD) e semeadura direta escarificada (SDE). Os autores concluíram que para ambas as gramíneas (aveia SD x aveia SDE; trigo SD x trigo SDE) não houve diferença significativa entre os tratamentos no que diz respeito à massa aérea das plantas e massa das raízes. Tal resultado corrobora com o obtido no experimento.

5.7 RENDIMENTO DA CULTURA DA SOJA

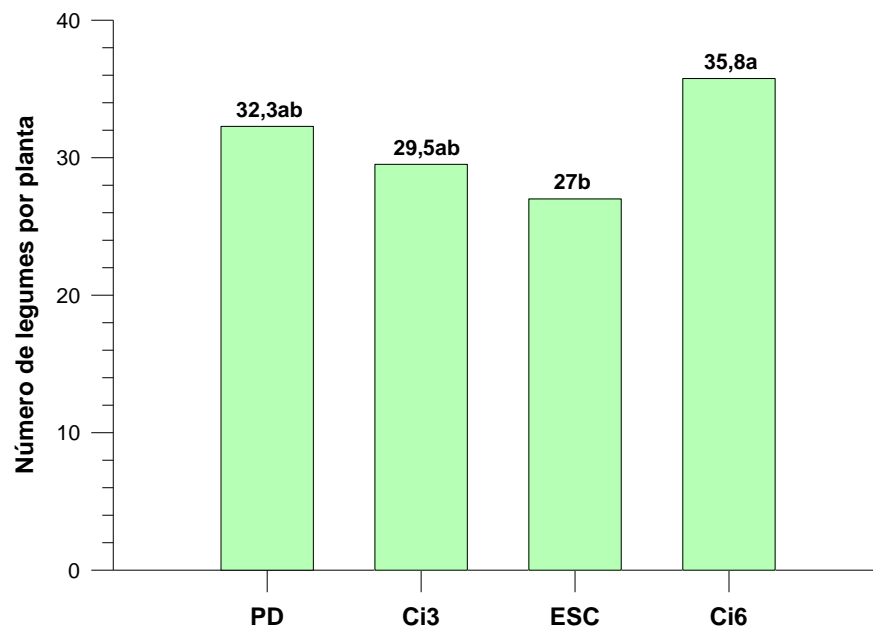
5.7.1 Componentes do rendimento

A definição do rendimento de uma cultura está intrinsicamente ligada aos seus componentes de rendimento. Para soja, tais componentes são: número de legumes por planta, número de grãos por legume e massa de grãos (NAVARRO JÚNIOR; COSTA, 2002).

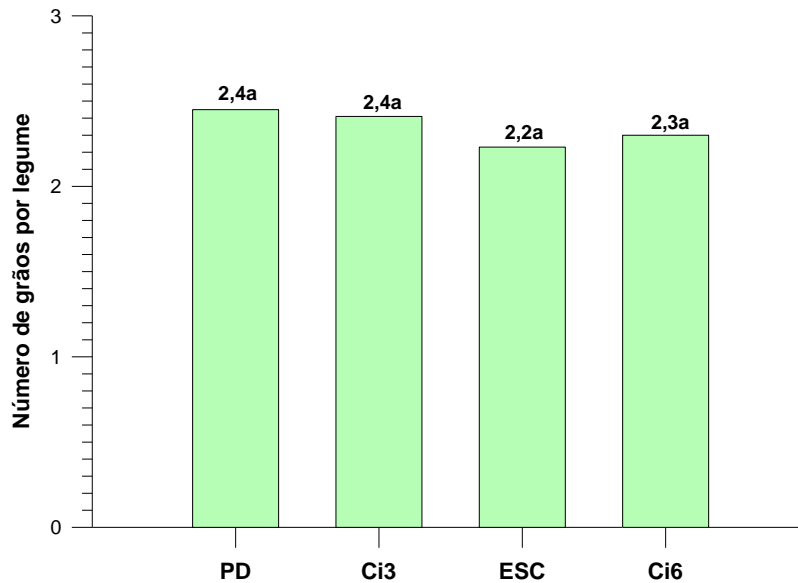
Ainda, o rendimento de grãos é resultante da capacidade que a planta tem em interceptar, absorver e utilizar radiação solar para fornecer os fotoassimilados produzidos por ela mesma em favor da sua formação, fixação e desenvolvimento das estruturas reprodutivas; isto possui relação direta ao número de grãos (PROULX; NAEVE, 2009).

O Gráfico 16 retrata o número de legumes por planta e o Gráfico 17 retrata o número de grãos por legume.

Gráfico 16 - Número de legumes por planta



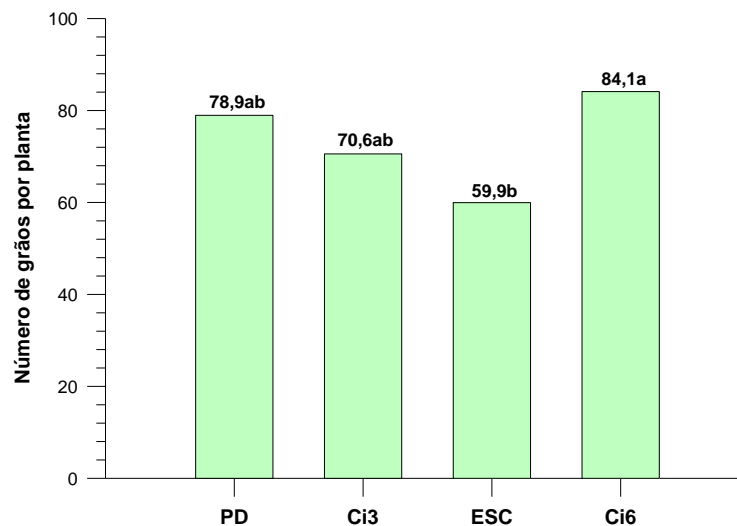
A letra "a" indica que não houve diferença estatística entre os tratamentos amostrados.
Fonte: Autora (2022).

Gráfico 17 – Número de grãos por legume

A letra “a” indica que não houve diferença estatística entre os tratamentos amostrados.
Fonte: Autora (2022).

Sobre o número de legumes por planta, verificou-se que houve interferência de acordo com o sistema de solo: Ci6 apresentou o maior número de legumes (35,8) e ESC apresentou o menor (27). Valores intermediários foram encontrados em PD e Ci3 (32,3 e 29,5, respectivamente).

Já, para o componente “número de grãos por legume” não houve diferença estatística entre os tratamentos avaliados. Apesar de este atributo não ter sido afetado pelo sistema de preparo do solo, o número de grãos totais por planta foi (Gráfico 18), convergindo com os resultados encontrados no Gráfico 16.

Gráfico 18 - Número de grãos por planta

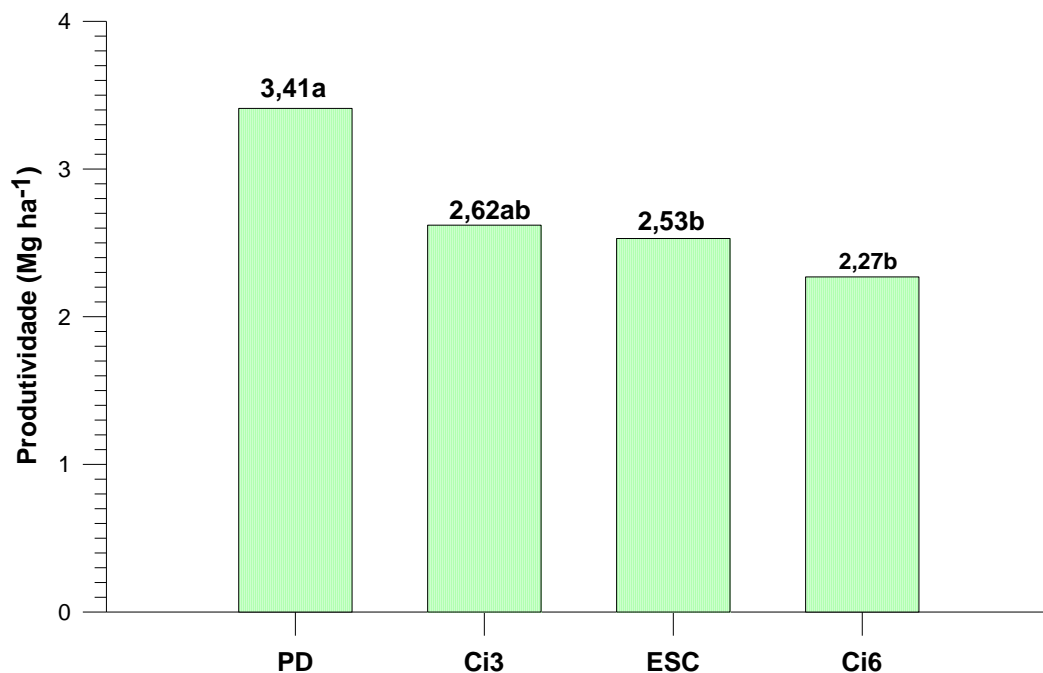
A letra “a” indica que não houve diferença estatística entre os tratamentos amostrados.
Fonte: Autora (2022).

5.7.2 Produtividade

A produtividade de uma cultura, apesar de não ser o único fator, é considerado um dos mais relevantes do ponto de vista do produtor, sobretudo.

O Gráfico 19 demonstra a produtividade da soja na safra 2020/2021 manejada sob diferentes condições físico-hídricas do solo.

Gráfico 19 - Produtividade da soja



A letra "a" indica que não houve diferença estatística entre os tratamentos amostrados.
Fonte: Autora (2022).

A maior produtividade, em ton ha⁻¹, foi obtida em PD (3,41) e a menor, em Ci6 (2,27). Os valor intermediário foi identificado em Ci3 (2,62 ton ha⁻¹) e ESC assemelhou-se ao tratamento Ci6 (2,53 ton ha⁻¹). A diferença entre a maior produtividade e a menor foi de 1,14 Mg ha⁻¹, equivalente a 19 sacas de 60 kg de soja por hectare ou R\$ 3.876,00 por hectare ou, ainda, R\$ 387.600,00 para uma propriedade de 100 hectares. O preço da saca de 60 kg de soja utilizado para o cálculo foi do dia 16/03/2021, fornecido pelo site da Coopatrigo, ao valor de R\$ 204,00 a saca.

A interferência da escarificação mecânica esporádica em solos argilosos manejados sob SPD tem sido amplamente estudada. Secco *et al.* (2009) concluíram que a produtividade da soja não respondeu à escarificação. Secco e Reinert (1997) e Secco *et al.* (2004) observaram que a produtividade da soja foi aumentada pela

escarificação mecânica somente em solos sob PD que possuíam alto grau de compactação ou limitação física. Klein e Camara (2007) constataram que a produtividade da soja em sistema PD contínuo e com escarificação não apresentou diferença.

Em solo de textura média o comportamento da produtividade da soja foi semelhante; Martin *et al.* (2015) concluiu que o emprego de plantas de cobertura no inverno é uma alternativa viável na descompactação do solo, sobressaindo-se, inclusive, aos efeitos da escarificação mecânica.

Embora a escarificação possa reduzir a compactação do solo, afetando, de forma positiva algumas propriedades físicas, como densidade do solo e grau de compactação, esta gera desestruturação do solo, o que causa redução dos poros responsáveis pela quantidade de água facilmente disponível às plantas, tornando-se um fator limitante sob estresse hídrico ao rendimento de grãos (CARMO *et al.*, 2017).

CONCLUSÕES

Os parâmetros físico-hídricos avaliados possuíram efeitos até os 20 cm de profundidade do solo.

Os tratamentos PD e ESC apresentaram comportamentos iguais estatisticamente na camada superficial do solo no que diz respeito aos menores valores de densidade do solo e maiores valores de porosidade total.

ESC possuiu a menor quantidade de lâmina de água disponível no solo em função da desestruturação dos agregados do solo e, conseqüente, destruição dos poros que armazenam o conteúdo de água às plantas.

ESC apresentou a maior quantidade de água facilmente drenada, representando um fator crítico às plantas, especialmente, em períodos de déficit hídrico.

Valores de RP superiores a 2 MPa, limite crítico, foram obtidos em ambas as avaliações. Este comportamento foi expressivo nos tratamentos, exceto em ESC que, na maioria das profundidades mensuradas, foi identificada RP abaixo de 2 MPa.

O método do perfil cultural para avaliação da distribuição do sistema radicular da soja contribui positivamente na compreensão dos impedimentos físicos existentes no solo. Apesar de ser um método qualitativo, é fundamental a sua aplicação no campo.

A maior produtividade de soja foi verificada em PD e a menor, em Ci6 e ESC. O valor intermediário foi identificado no sistema de manejo Ci3.

Associado ao fato de que o processo de escarificação demanda maquinário potente, tempo e recurso financeiro; a cobertura permanente do solo, a rotação de culturas e a diversificação de espécies, somadas aos demais preceitos de SPD, é capaz de propiciar melhorias duradouras no solo e incrementar o rendimento de grãos da soja.

A escarificação do solo não teve efeito benéfico para a produtividade da cultura, não sendo esta prática recomendada para áreas sob plantio direto que não apresentam níveis elevados de compactação do solo.

Faz-se necessária a repetição deste experimento para estudo do desempenho de outras culturas, como gramíneas de inverno, sob os atributos físico-hídricos do solo avaliados a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S.; 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**, Viçosa, v. 28, p.519-531, jun. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/jcqqgfkT4fWsbwn6pvh5HnRD/?lang=pt>. Acesso em: 15 mar. 2022.
- AMORIM, F. A.; HAMAWAKI, O. T.; SOUSA, L. B.; LANA, R. M. Q.; HAMAWAKI, C. D. L. Época de semeadura no potencial produtivo de soja em Uberlândia - MG. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 1793-1802, 2011.
- AMARO FILHO, J. **Determinação da condutividade capilar mediante o método do perfil instantâneo**.1982. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Areias, Paraíba. 1982.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; MASCHIO, R.; SILVA, E. M. Determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório. Teresina: **Embrapa Meio-Norte**, nov. 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/56415/1/curvaretencao.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- ASSIS, E. B.; NUNES, M. C. M.; BARELLI, M. A. A.; SEABRA JUNIOR, S.; SERAFIM, M. E. Resistência à penetração em Argissolo Vermelho-amarelo sob pousio e diferentes culturas de cobertura. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 19, p. 1668, 2014. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2014b/AGRARIAS/resistencia%20a%20penetracao.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2022.
- ATLAS SOCIOECONÔMICO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**. Soja: o RS é o terceiro maior produtor de soja em grão do Brasil. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, jul. 2020. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/soja>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- AZEVEDO, D. M. P.; LEITE, L. F. C.; NETO, M. L. T. Distribuição do sistema radicular da soja sob diferentes métodos de preparo do solo. Teresina, PI: **Embrapa Meio-Norte**, 2004. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/35989/1/Doc95.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2022.
- BARRETO, M. C. V.; SOBRAL, L. F.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. Guia prático da interpretação de resultados de análises de solos. Arajacu, SE: **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, 2015. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1042994>. Acesso em: 14 mar. 2022.
- BARROS, L. R. **Escarificação e gessagem na descompactação do solo sob sistema plantio direto**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2017.

BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, jun. 2004.

BONINI, A. K.; SECCO, D.; SANTOS, R. F.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 9, p. 1543-1548, jan./fev. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/7tkFFz8NLmDs4ByWHzYVCjc/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 23 jul. 2021.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 789-796, out. 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/XB9rrzxwbvPffNcTBsQ6chQ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 23 jul. 2021.

CARMO, C. M.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; PINHATA, A. A.; SANTOS, E. L. **Produtividade da soja no plantio direto em função da escarificação, do suo de haste mais profunda na semeadura e da cultura antecessora**. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 12, Londrina, 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161883/1/185.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2022.

CÁSSARO, F. A. M.; BORKOWSKI, A. K.; PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; SAAB, S. C. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 175-179, jan. 2011.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 933-942, mai. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/GBY5WC9QWnNQBWvTv3khyGn/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2020/2021. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), jul. 2021. ISSN 23186852 *versão online*.

CORDEIRO JÚNIOR, R.; MORAES, M. T.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT, A. A.; SANTOS, E. L.; BALICO, G. G.; PINHATA, A. A.; DEBIASI, H. **Valores críticos de resistência à penetração em diferentes conteúdos de água do solo na sucessão soja/milho 2ª safra**. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 2, Londrina, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/147176/1/JA2016.192-199.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2022.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRUGER, C. A. M.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas,

em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 855-864, 2009.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA, H. D. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 703-709, 1999.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; KAMIMURA, K. M. **Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 45, n. 6, p. 603-612, jun. 2010. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/96535/000774862.pdf?sequence=1>. Acesso em: 16 mar. 2022.

DEBIASI, H.; MORAES, M. T.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JÚNIOR, A. A.; TONON, B. C.; AGASSI, V. J. **Desenvolvimento radicular e produtividade da soja em função do estado de compactação de um Latossolo Vermelho**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 7; MERCOSOJA, 2015, Florianópolis. Tecnologia e mercado global: perspectivas para soja: anais. Londrina: Embrapa Soja, 2015. 3 p. 1. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/125803/1/R.-159-DESENVOLVIMENTO-RADICULAR-E-PRODUTIVIDADE-DA-SOJA-EM.PDF>. Acesso em: 13 mar. 2022.

DENARDIN, J. E.; KOCHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SATTTLER, A. Evolução da área cultivada sob sistema plantio direto no Rio Grande do Sul. Passo Fundo: **Embrapa Trigo**, nov. 2001. ISSN 1516-5582. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/121365/1/FL-07298.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2021.

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SANTI, A. Falhas na implementação do sistema plantio direto levam a degradação do solo. **Revista Plantio Direto**, v. 18, p. 33-34, 2008.

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**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1713-1722, out. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/wb9ZmMBPMXLjNZGSJMyGz7B/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil 2009 e 2010. Londrina: Embrapa Soja, out. 2008. ISSN 1677-8499 versão online. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/471536/1/Tecnol2009.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. História da soja. Londrina: Embrapa Soja. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/historia>. Acesso em: 27 jul. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Soja em números (safra 2020/2021). Londrina: Embrapa Soja. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 27 jul. 2021.

FANCHINI, J. C.; BALBINOT JR., A. A.; DEBIASI, H.; COSTA, J. M.; SICHIERI, F. R.; TEIXEIRA, L. C. Soja em solos arenosos: papel do Sistema Plantio Direto e da Integração Lavoura-Pecuária. **Embrapa**: Circular Técnica, Londrina, Paraná, mai. 2016. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1046511/1/CT116.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.

FARIAS, J. R. B; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. **Embrapa**: Circular Técnica, Londrina, Paraná, set. 2007. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/circtec48_000g3bkhmrq02wx5ok0r2ma0nxz1b1po.pdf. Acesso em: 23 jul. 2021.

FILHO, J. T.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 393-399, jun. 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/K7jKkDbLgCfydzKDFGwpDpR/?format=pdf&lang=pt#:~:text=Por%20ser%20o%20Perfil%20Cultural,no%20solo%2C%20dentre%20outros%2C%20em>. Acesso em: 27 jul. 2021.

FURTADO, M. B. **Variabilidade espacial de atributos do solo e da cultura do milho (*Zea mays* L.) em dois sistemas de manejo.** 2008. 191p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/gbMBTXLXXJq4KTrCjkgKvBq/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 13 mar. 2022.

GENRO JÚNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBURQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 65-73, jan./fev. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/v65DDd4Mz4HDR8xjWs5Qdyp/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.

HECK, R. L. **Avaliação das condições físicas do solo e desenvolvimento da cultura da canola exporta a diferentes sistemas de manejo do solo.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/978/1/HECK.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857-867, dez. 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/NsbKPMN83DNkyzCJYr3qzWP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 27 jul. 2021.

- 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**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 646-650, jan. 2006.
- KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 221-227, 2007.
- 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, abr. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/FjSZCHR9LqSJTt7BtLxQzdC/?lang=pt>. Acesso em: 14 mar. 2022.
- KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2475-2481, dez. 2009.
- KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Influência do manejo do solo na infiltração de água. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 13, n. 5, p. 3915-3925, dez. 2014.
- KUTAH, B. F.; BARBOSA, F. T. **Desenvolvimento vegetal e resistência do solo à penetração em semeadura direta com e sem escarificação**. In: ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 27, Ponta Grossa, 2018. Disponível em: https://siseve.apps.uepg.br/storage/eaic2018/10_Bianca_de_Fatima_Kutah-153619388428091.pdf. Acesso em: 16 mar. 2022.
- LIER, Q. J. V. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 233-238, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/bjhZBH44jGGww5qYzLmJyBq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 02 ago. 2021.
- LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v. 116, p. 107-136, 2003.
- MACHADO, P. L. O. A. Compactação do solo e crescimento de plantas: como identificar, evitar e remediar. **Embrapa**: Rio de Janeiro, dez. 2003.
- MARASCA, I.; DE OLIVEIRA, C. A. A.; GUIMARÃES, E. C.; DA CUNHA, J. P. A. R.; DE ASSIS, R. L.; PERIN, A.; MENEZES, L. A. S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água em sistema de plantio direto na cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 239-246, 2011.
- MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 3, n. 2, p. 349-359, 2011. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/6120>. Acesso em: 2 out. 2021.
- MARTIN, F. P.; SCHUROFF, C. K.; MARAFON, F.; POSTAL, F.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT, A. A.; SANTOS, E. L. **Produtividade da soja e do milho**

em função da escarificação e da gessagem. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 7, Florianópolis, 2015.

MELO, J. P. R. **Técnicas de cultivo para produção de biomassa e grãos de soja.** 2003. Dissertação (Mestre em Produção Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, Pernambuco, 2013.

NAVARRO JÚNIOR; H. M.; COSTA, J. A. Contribuição relativa dos componentes do rendimento para produção de grãos em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 269-274, mar. 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/vGQB5QMgQzRNyDgspn679jn/?format=pdf&lang=pt#:~:text=Os%20tr%C3%AAs%20principais%20componentes%20do,que%20se%20dese%20nvolve%20at%C3%A9%20legumes>. Acesso em: 16 mar. 2022.

NETO, M. E.; LARA, L. M.; INOUE, T. T.; BRACCINI, A. L.; BATISTA, M. A. **Novos parâmetros de exportação de nutrientes pela soja na mesorregião do norte central paranaense.** *In:* REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO, 6, 2019, Ponta Grossa, Paraná. Disponível em: http://rpcs2019.com.br/trabalhos_aprovados/arquivos/05092019_170543_5cd48ae770c36.pdf. Acesso em: 27 jul. 2021.

NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1723-1734. 2008.

NOGUEIRA, S. S. S.; MANFREDINI, S. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 18, n. 9, p. 973-976, set. 1983.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Critérios de calagem para a soja no sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 475-483, jun. 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/k6mKwMTspTRfcwSjfc37sFM/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 327-336, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/zKqjbskqkZkwMzVkpSpZfQ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 13 mar. 2022.

OMM: LA NIÑA 2020-2021 TERMINOU, MAS TEMPERATURAS SEGUEM ALTAS. **Nações Unidas Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/129593-omm-lanina-2020-2021-terminou-mas-temperaturas-seguem-altas>. Acesso em: 22 set. 2021.

PEREIRA, R. G.; ALBUQUERQUE, A. W.; SOUZA, R. O.; SILVA, A. D.; SANTOS, J. P. A.; BARROS, E. S.; MEDEIROS, P. V. Q. Sistemas de manejo do solo: soja [*Glycine Max* (L)] consorciada com *Brachiaria decumbens* (STAPF). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 44-51, jan./mar. 2011. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/pat/a/KxdyH8Lnp5bht6zYyJTcG7L/?lang=pt&format=pdf>.

Acesso em: 27 jul. 2021.

PEREIRA, J. S.; JESUS, T. S.; OLSZEWSKI, N.; MENDES, A. M. S.; GRANJA, G. P. **Porosidade e densidade de solos sob uso agrícola no município de Sobradinho-BA.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34, 2013, Florianópolis, Santa Catarina. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/90058/1/Alessandra-3.pdf>.

Acesso em: 27 jul. 2021.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, jul./dez. 2003. Disponível em:

http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.queos.com.br/downloads/Producao_Artigos/5.pdf.

Acesso em: 27 jul. 2021.

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. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134. 2007.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular do feijoeiro em quatro sistema de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 310-319, mar. 2009.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, out. 2008. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/5WjW8tsqwwWS6xRyMftbvJM/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 27 jul. 2021.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M. MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras - MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, jul./ago. 2007. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cagro/a/6dMcQxC43F8tMMKfrWkBXw/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 14 mar. 2022.

ROSA, P. A. L.; ALVES, M. C.; VIDEIRA, L. M. L.; PENTEADO, M. S.; RODRIGUES, M. **Porosidade e densidade de um Latossolo Vermelho degradado e sua recuperação com calagem, gessagem e adubação verde.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35, Natal. 2015.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F.; OLIVEIRA, P. R.; ANDRIOLI, I. Atributos físicos nos tempos de adoção de manejo em Latossolo cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 367-376, 2012. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/mtw9Yb7fM3gW54dRGc7mtCf/?lang=pt&format=pdf>.

Acesso em: 14 mar. 2022.

SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. Sistema Plantio Direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: **Embrapa Agropecuária Oeste**, 1998. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/98258/1/500perguntassistema_plantiodireto.pdf. Acesso em: 27 jul. 2021.

SEDIYAMA, T. **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Ed. Mecenaz, 2009. 314p.

SECCO, D.; REINERT, D. J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, v. 16, p. 52-61, 1997.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 797-804, out. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/gbMBTXLXXJq4KTrCjkgKvBq/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 15 mar. 2022.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 58-64, jan./fev. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/bpnYzMgKy5Vf5zQx4sG55sd/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 23 jul. 2021.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Balanço hídrico: climatológico normal e sequencial, de cultura e para manejo da irrigação**. Slides de Meteorologia Agrícola – ESALQ/USP. 2012.

SCHIAVO, J. A.; COLODRO, G. Agregação e resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob sistema de integração. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 3, p. 406-412, set. 2012.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. R. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 855-860, jun. 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/WrFbVB3QcXCZkZSmNWgncDx/?lang=pt>. Acesso em: 27 jul. 2021.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11 ed. Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC, 2016.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2005. Disponível em: http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Luis_Suzuki_Dissertacao.pdf. Acesso em: 02 ago. 2021.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, ago. 2007. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/pab/a/9nWsJjKz3P69Mq7Sk4fgtn/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 27 jul. 2021.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. Brasília, DF: **Embrapa Solos**, 3 ed., 2017. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1085209>. Acesso em: 2 out. 2021.

TERUEL, D. A. **Caracterização arquitetural do sistema radicular de soja**. 1999. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 1999. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-20200111-122422/publico/TeruelDiogerAlexandre.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, dez. 1998. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/hV4CsLtsg55hzQD5wRHsf5j/?lang=pt>. Acesso em: 27 jul. 2021.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, São Paulo, v. 59, n. 4, p. 795-801, out./dez. 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/ZxpYXqGgigrYJbKyg3cJNrv/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 14 mar. 2022.

TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1023-1031, dez. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/xVSy9RqzNh5hm7MHB3xH5dy/?lang=pt>. Acesso em: 14 mar. 2022.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 849-858, out. 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/rtd3cwFXQ4CwpyVSB5dgj7/?lang=pt>. Acesso em: 15 mar. 2022.

VEIGA, A. B.; CAMPOS, A. D. S.; SINNEMANN, C. S.; SILVA, L. B. X.; MELO, T. S.; CONCENÇO, G.; PARFITT, J. M. B. **Efeito do sistema de cultivo e manejo do solo no estabelecimento de soja em terras baixas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 11, Balneário Camboriú. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/201778/1/13-Veiga.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2022.

WATANABE, S.H. **Caracterização da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de preparo**. 2001. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, 2001. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/1161/1/000193583.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

WOLSCHICK, N. H.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; SANTOS, K. F.; WERNER, R. S.; BAGIO, B. Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 15, n. 2, p. 134-143, 2016.

WUTKE, E.B.; ARRUDA, F.B.; FANCELLI, A.L.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; AMBROSANO, G.M.B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 621-633, 2000.

ZONTA, J. H.; BEZERRA, J. R. C.; PEREIRA, J. R.; SOFIATTI, V. Manejo da irrigação do algodoeiro. Campina Grande, PB: Circular Técnica – **Embrapa**, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/141494/1/Manejo-da-irrigacao.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2022.