

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**ESTRATÉGIAS DE MANEJO FÍSICO E QUÍMICO PARA MELHORIA  
DOS ATRIBUTOS DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO PROFUNDA EM  
SISTEMA PLANTIO DIRETO DE QUALIDADE**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Marceli Piccin**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2019**

**Estratégias de manejo físico e químico para melhoria dos atributos da camada de enraizamento profunda em Sistema Plantio Direto de qualidade**

**Marceli Piccin**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Biodinâmica e Manejo do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

**Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2019**

Piccin, Marcieli

Estratégias de manejo físico e químico para melhoria dos atributos da camada de enraizamento profunda em Sistema Plantio Direto de qualidade / Marcieli Piccin.- 2019.

80 p.; 30 cm

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, RS, 2019

1. Sistema plantio direto 2. Camada de enraizamento  
3. Compactação do solo 4. Acidez do solo I. , Telmo Jorge Carneiro Amado II. Título.

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

---

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Marcieli Piccin. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Tuiuti, 2462, apartamento 401, Santa Maria – RS, CEP: 97050-420.

Fone (55) 9 9659-0121; E-mail: marcielipiccin@hotmail.com

---

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

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

**Estratégias de manejo físico e químico para melhoria dos atributos da  
camada de enraizamento profunda em Sistema Plantio Direto de qualidade**

elaborada por  
**Marceli Piccin**

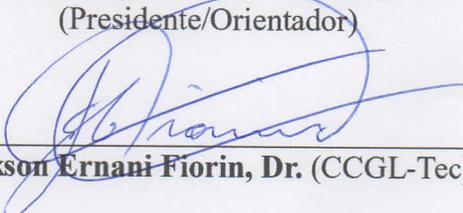
como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Ciência do Solo**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



---

**Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr.**  
(Presidente/Orientador)



---

**Jackson Ernani Fiorin, Dr. (CCGL-Tec)**



---

**Douglas Dalla Nora, Dr. (IFFar)**

Santa Maria, 15 de Julho de 2019.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Saul Miguel Piccin e Nilce Maria Piccin, e aos meus irmãos por todo o apoio recebido durante todos esses anos de caminhada acadêmica.

Agradecimento especial ao meu namorado e colega de laboratório, Vinícius Freitas Pedron, que nunca me deixou desistir perante as dificuldades e sempre me auxiliou nas coletas e demais atividades.

À Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao Departamento de Solos e ao CNPq, por toda a estrutura disponibilizada e pela bolsa concedida.

Ao professor Telmo Jorge Carneiro Amado, pela confiança, conselhos e ensinamentos durante o andamento do trabalho.

Aos proprietários da fazenda Strobel, por todo o apoio e estrutura que nos foram ofertados em cada coleta, em especial ao Raul Von Mühlen, Denise Strobel, André Villani, Taísa Strobel e ao Eng. Agrônomo Cléberton Harback.

À equipe da CCGL-Tec pela realização das análises químicas e por toda a ajuda durante as coletas, em especial ao Dr. Jackson Ernani Fiorin e Tiago Wyzykowski.

À todos os colegas do laboratório de Uso, Manejo e Conservação do Solo, pela ajuda durante as coletas e atividades de laboratório. Em especial, agradeço aos amigos Antônio Mazuco, Cristiano Keller, Tiago Teixeira e Raí Schwalbert por sempre estarem ao meu lado no andamento da pesquisa e pelo tanto que me ajudaram nos momentos de dificuldade.

Esta conquista também é de vocês!

Muito obrigada!

## RESUMO

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

### **ESTRATÉGIAS DE MANEJO FÍSICO E QUÍMICO PARA MELHORIA DOS ATRIBUTOS DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO PROFUNDA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO DE QUALIDADE**

AUTORA: Marieli Piccin  
ORIENTADOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

O Sistema plantio Direto trouxe inúmeros benefícios para a produção agrícola. No entanto, solos manejados por longo período sob esse sistema, principalmente os argilosos, tendem a apresentar problemas físicos e químicos em sua subsuperfície como resposta à ausência de preparo do solo, à aplicação superficial de corretivos e fertilizantes e ao tráfego intensivo de máquinas e implementos cada vez maiores e mais pesados. As condições químicas e físicas do perfil do solo afetam diretamente o crescimento, desenvolvimento e distribuição do sistema radicular das plantas no solo e, conseqüentemente, a produtividade das culturas. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da melhoria física e química do perfil de solo sobre os atributos do solo, o enraizamento e a produtividade da cultura da soja na ausência e na presença de déficit hídrico. O experimento foi conduzido no município de Dois Irmãos das Missões no Rio Grande do Sul, em duas safras agrícolas (2016/17 e 2017/18) e seu delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram constituídos pelo T0 (testemunha), T1(subsolagem com espaçamento de 70 cm), T2 (escarificação com espaçamento de 50 cm), T3 (subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm), T4 (escarificação com espaçamento de 50 cm + aplicação superficial de óxido de Ca e Mg), T5 (aplicação superficial de óxido de Ca e Mg), T6 (aplicação de calcário + gesso em superfície), T7 (aplicação de óxido de Ca e Mg + calcário + gesso em superfície) e T8 (subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm). As amostragens de solo foram realizadas 6 e 18 meses após a aplicação dos tratamentos e foram estratificadas nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m, nas quais foram determinados o pH, saturação por alumínio e teores de cálcio, magnésio e enxofre do solo, a capacidade de troca de cátions e a saturação por bases. O atributo físico avaliado foi a resistência mecânica à penetração do solo, a qual foi determinada até 0,60 m de profundidade. A coleta de raízes foi realizada durante o pleno florescimento da cultura da soja. A simulação do déficit hídrico foi realizada com a instalação de câmaras de restrição durante o estágio reprodutivo da soja, por aproximadamente 30 dias, as quais restringiam 100% da precipitação incidente. A melhoria física da linha e da entrelinha (subsolagem com espaçamento de 35 cm) associada à aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (com espaçamento de 70 cm) incrementou o pH do solo e neutralizou a saturação por alumínio na subsuperfície do solo, além de melhorar a distribuição de raízes no solo e aumentar o volume e comprimento das mesmas. Essa associação também foi eficiente na atenuação das perdas de produtividade da soja em situações de estresse hídrico, após 18 meses a aplicação dos tratamentos.

**Palavras-chave:** Compactação do solo. Acidez subsuperficial. Sistema radicular da soja. Déficit hídrico.

## ABSTRACT

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

### PHYSICAL AND CHEMICAL MANAGEMENT STRATEGIES TO IMPROVE THE DEEP ROOTING LAYER ATTRIBUTES IN A QUALITY NO-TILL SYSTEM

AUTHOR: Marcieli Piccin  
ADVISOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

The no-till system brought any benefits to crop systems, as the reduction of the soil erosion and of costs of the production, increase of the water retention, higher accumulation of soil organic matter, increase of the microbial population in the soil, among others. However, soils managed under long-term no-till, mainly the clay soils, tend to present physical and chemical limitations in function of the absence of soil tillage, of the superficial application of the correctives and fertilizers and of the intensive traffic of machines and implements increasingly higher and with more height. The chemical and physical conditions of the soil profile affects the growth, development and distribution of the root system of the plants in the soil and, consequently, the yield of the crops. Thus, the aim of this study was to evaluate the effects of the chemical and physical improvements in the soil properties, the rooting and seed yield of the soybean in the absence and in the presence of the water deficit. The experiment was realized in in the municipality of Dois Irmãos das Missões in the Rio Grande do Sul, in two crop seasons (2016/17 and 2017/18) and you experimental design was a randomized block design with three replications. The treatments were constituted by the Test. (control), T1 (subsoiling with 70 cm spacing), T2 (chiseling with 50 cm spacing), T3 (subsoiling with 70 cm spacing + deep application of Ca and Mg oxide with 70 cm spacing), T4 (chiseling with 50 cm spacing + surface application of Ca and Mg oxide), T5 (surface application of Ca and Mg oxide), T6 (surface application of limestone + gypsum), T7 (surface application of Ca and Mg oxide + limestone + gypsum) and T8 (subsoiling with 35 cm spacing + deep application of Ca and Mg oxide with 70 cm spacing). The soil samplings was realized 6 and 18 months after the application of the treatments and were stratified in the soil layers of 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80 and 0.80-1.00 m. Were determined the pH, aluminum saturation, calcium, magnesium and sulfur contents, the cation exchange capacity and the basis saturation. The physical attribute evaluated was the mechanical penetration resistance of the soil, that was performed from 0 untill 60 cm depth. The root sampling was performed in the soybean full flowering. The simulation of water deficit was realized with the installation of restriction chambers during the soybean reproductive stage for approximately 30 days, and restricted 100% of the incident precipitation. The physical improvement of the line and the interline (subsoiling with spacing of 35 cm) associated to deep application of Ca and Mg oxide (with spacing of 70 cm) increase the pH values and reduced the aluminum saturation of the soil profile, beyond improve the root distribution in the soil profile and increase the volume and length of the soybean roots. This association was efficient to mitigate the yield losses in water deficit situations, after 18 months the application

**Keywords:** Soil compaction. Subsurface acidity. Soybean root system. Water deficit.

## LISTA DE FIGURAS

### MATERIAL E MÉTODOS GERAL

Figura 1. Localização da área experimental. .... 22

### ARTIGO 1

Figura 1. Precipitação pluvial diária e acumulada durante o período experimental..... 32

Figura 2. Teste de DMS (Tukey à 5% de significância) da resistência à penetração do solo; a) 6 meses após a implantação dos tratamentos; b) 18 meses após a implantação dos tratamentos. .... 37

Figura 3. Atributos do solo afetados pela descompactação mecânica com e sem a associação com óxido de Ca e Mg; a) pH; b) m (saturação por alumínio); c) Ca (cálcio); d) Mg (magnésio); e) V (saturação por bases). .... 42

Figura 4. Valores de pH (a), saturação por Al (b) e saturação por bases (c) 6 e 18 meses após a aplicação dos tratamentos. .... 43

Figura 5. Efeito dos tratamentos sobre a produtividade da soja nas duas safras avaliadas (2016/17 e 2017/18)..... 44

### ARTIGO 2

Figura 1. Precipitação diária e acumulada durante o ciclo da soja nas safras de 2016/17 e 2017/18 com indicação do período de indução da restrição hídrica..... 53

Figura 2. Diferença mínima significativa (DMS) para os resultados de resistência à penetração do solo: a) 6 meses após e b) 18 meses após a aplicação dos tratamentos..... 57

Figura 3. Efeito dos tratamentos sobre o pH, m e CTC após 6 meses (a, b, c) e após 18 meses (d, e, f) da aplicação dos tratamentos. .... 58

Figura 4. Efeito dos tratamentos sobre a saturação de Ca, Mg e teor de S: 6 meses após a aplicação (a, b, c) e 18 meses após a aplicação dos tratamentos (d, e, f). .... 59

Figura 5. Comprimento total (a) e volume total (b) do sistema radicular da soja afetados pelos tratamentos..... 61

Figura 6. Efeito dos tratamentos sobre o comprimento, volume e distribuição das raízes no perfil do solo..... 62

Figura 7. Efeito dos tratamentos na produtividade da soja na primeira (2016/17) e na segunda safra (2017/18)..... 64

Figura 8. Efeito dos tratamentos na produtividade da soja com indução da restrição hídrica na primeira (2016/17) e na segunda safra (2017/18)..... 65

## LISTA DE TABELAS

### MATERIAL E MÉTODOS GERAL

Tabela 1. Caracterização física e química da área experimental anteriormente à aplicação dos tratamentos.....23

### ARTIGO 1

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo avaliados anteriormente à aplicação dos tratamentos.....33

Tabela 2. Efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos 6 meses após a aplicação.....38

Tabela 3. Efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos 18 meses após a aplicação.....40

### ARTIGO 2

Tabela 1. Atributos químicos e resistência à penetração do solo antes da aplicação dos tratamentos.....54

Tabela 2. Coeficientes normalizados de regressão múltipla através do método “stepwise” entre os parâmetros radiculares, a produtividade e os atributos do solo.....63

## LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Análise de variância dos atributos químicos do solo em relação aos tratamentos, profundidade e tempo de amostragem para o experimento em estudo.....	77
Apêndice B – Análise de variância da produtividade da soja em relação aos tratamentos e safras avaliadas.....	77
Apêndice C – Análise de variância da produtividade da soja com restrição hídrica induzida em relação aos tratamentos e as safras avaliadas.....	77
Apêndice D – Análise de variância da resistência mecânica à penetração do solo em relação aos tratamentos e tempos avaliados.....	77

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Equipamento escarificador utilizado no experimento.....	78
Anexo B – Equipamento subsolador utilizado no experimento.....	78
Anexo C – Aplicação profunda de óxido de Ca e Mg.....	79
Anexo D – Coleta de solo no experimento.....	79
Anexo E – Determinação da resistência à penetração do solo.....	80
Anexo F – Coleta de raízes.....	80
Anexo G – Instalação das câmaras de restrição hídrica.....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al – Alumínio

Ca – Cálcio

CE – Camada de enraizamento

CQFS-RS/SC – Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina

CTC – Capacidade de Troca de Cátions

K – Potássio

m – Saturação por Alumínio

Mg – Magnésio

MOS – Matéria orgânica do solo

PRNT – Poder real de neutralização do total

K – Potássio

P – Fósforo

RS – Rio Grande do Sul

RP – Resistência à penetração

S – Enxofre

SPD – Sistema Plantio Direto

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>3. HIPÓTESES.....</b>	<b>21</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS GERAL .....</b>	<b>22</b>
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL .....	22
4.2 ESTRATÉGIAS QUÍMICAS DE CORREÇÃO DO SOLO ESTUDADAS .....	23
4.2.1 Calcário e gesso.....	23
4.2.2 Óxido de cálcio e magnésio (cal virgem).....	24
4.3 ESTRATÉGIAS FÍSICAS DE CORREÇÃO DO SOLO ESTUDADAS.....	24
4.3.1 Escarificação .....	25
4.3.2 Subsolação.....	25
4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS .....	25
4.5 COLETA E ANÁLISES .....	26
4.5.1 Coleta e análise de solo.....	26
4.5.2 Determinação da resistência à penetração do solo .....	26
4.5.3 Coleta e análise de raízes.....	26
4.5.4 Implantação das câmaras de restrição hídrica .....	27
4.5.5 Determinação da produtividade da soja.....	28
4.5.6 Análise estatística.....	28
<b>5. ARTIGO I – ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA MELHORIA DA QUALIDADE DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO PROFUNDA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO.....</b>	<b>29</b>
5.1 RESUMO.....	29
5.2 ABSTRACT.....	30
5.3 INTRODUÇÃO.....	31
5.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	32
5.4.1 Caracterização da área experimental .....	32
5.4.2 Delineamento experimental .....	33
5.4.3 Caracterização das estratégias para melhoria química e física do solo.....	33
5.4.4 Determinação da resistência à penetração do solo .....	34
5.4.5 Coleta e análise de solo.....	34
5.4.6 Determinação da produtividade da soja.....	35
5.4.7 Análise estatística.....	35

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
5.5.1 Caracterização química e física do solo anteriormente à aplicação dos tratamentos.....	35
5.5.2 Variabilidade da precipitação pluvial durante o ciclo da soja.....	36
5.5.3 Resistência mecânica à penetração do solo após a aplicação dos tratamentos	36
5.5.4 Atributos químicos do solo afetados pela aplicação dos tratamentos .....	37
5.5.5 Produtividade da soja afetada pela aplicação dos tratamentos .....	44
5.6 CONCLUSÕES .....	45
5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45
<b>6. ARTIGO II – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO DE UM LATOSSOLO COMO ATENUANTES DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO PARA A CULTURA DA SOJA NO SUL DO BRASIL .....</b>	<b>50</b>
6.1 RESUMO.....	50
6.2 ABSTRACT.....	51
6.2 INTRODUÇÃO.....	52
6.3 MATERIAL E MÉTODOS .....	53
6.3.1 Caracterização da área e design experimental .....	53
6.3.2 Indução do estresse hídrico.....	54
6.3.3 Coleta de solo e análise.....	54
6.3.4 Avaliação da resistência à penetração do solo .....	55
6.3.5 Coleta e análise de raízes.....	55
6.3.6 Determinação da produtividade da soja.....	56
6.3.7Análise estatística.....	56
6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	56
6.4.1 Resistência mecânica à penetração do solo .....	56
6.4.2 Atributos químicos do solo.....	57
6.4.3 Comprimento, volume e distribuição das raízes na camada de enraizamento do solo.....	60
6.4.4 Produtividade da soja.....	64
6.5 CONCLUSÕES .....	66
6.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>71</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>
<b>9. APÊNDICES .....</b>	<b>77</b>
<b>10. ANEXOS.....</b>	<b>78</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Mais de 100 milhões de hectares são manejados sob Sistema Plantio Direto (SPD) ao redor do mundo (DERPSCH et al., 2010). De acordo com Bernoux et al. (2006), este sistema de manejo baseia-se basicamente em duas premissas: (I) a ausência de preparo do solo e (II) a presença de cobertura sobre o solo durante todo o ano, as quais têm como objetivo principal a redução das perdas de água e solo pela erosão. Em comparação ao sistema convencional, o SPD causa menor número de perturbações no solo e mantém maior quantidade de resíduos culturais na superfície do solo (CARR; MARTIN; HORSLEY, 2006; TORABIAN; FARHANGI-ABRIZ; DENTON, 2019).

Além da redução da erosão do solo, outros benefícios puderam ser observados com a adoção do SPD, tais como a redução dos custos de produção e dos impactos ambientais, o aumento da infiltração e retenção de água no solo, redução das perdas de solo e nutrientes pela erosão, redução das chances de assoreamento dos rios, maior acúmulo de matéria orgânica (MOS), aumento da eficiência do uso da água e incremento nas populações microbianas do solo (PATERNIANI, 2001; FIDELIS et al., 2003; FOWLER; HOBBS, 2003; LAL, 2015; FUENTES-LLANILLO et al., 2018).

A ausência do revolvimento do solo e o tráfego intensivo de máquinas e implementos agrícolas inerentes à adoção do SPD podem causar mudanças na dinâmica de nutrientes e na estrutura do solo, podendo afetar a distribuição das raízes das plantas (CAMARA; KLEIN, 2005; NUNES et al., 2015), devido à maior concentração de nutrientes que se acumula na superfície do solo (MESSIGA et al., 2011; HANSEL et al., 2017) e também à compactação do subsolo (HAMZA; ANDERSON, 2005; FRANCHINI et al., 2017).

As condições do subsolo, físicas ou químicas, podem afetar diretamente o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular das culturas, pois estão associadas com a temperatura e aeração do solo (LICHT; AL-KAISI, 2005), à disponibilidade de água (BENGOUGH et al., 2011), à presença ou ausência de minerais (toxicidade ou deficiência) (HANSEL et al., 2017) e à resistência mecânica do solo ao aprofundamento do sistema radicular das plantas (DONG et al., 2017).

Porções do solo com a presença de metais pesados e com baixa disponibilidade de nutrientes são consideradas zonas estressantes para as raízes das plantas, bem como aquelas com problemas de compactação e baixa disponibilidade de água (REICHERT et al., 2009). Em função destas limitações, podem ocorrer mudanças morfológicas nas raízes que podem ter relação ou não com a produtividade das culturas (RAMOS et al., 2010; HODGE, 2004).

De acordo com Bengough et al. (2011), as principais limitações físicas para o crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas é o estresse hídrico, o estresse anóxico e a impedância mecânica do solo, os quais se relacionam diretamente com a estrutura e compactação do solo. Estas limitações do solo podem afetar a taxa de crescimento, desenvolvimento e distribuição das raízes no solo e, conseqüentemente, a área de solo explorada pelas mesmas em busca de água e nutrientes (WHITELEY; DEXTER, 1982).

Segundo a Soil Science Society of America (2008), a compactação do solo pode ser definida como “o processo pelo qual os grãos do solo são rearranjados para diminuir o espaço vazio e aproximá-los uns dos outros, aumentando assim a densidade do solo”. No mundo, há estimativa de que 68 milhões de hectares de solo estejam degradados devido à compactação (FLOWERS; LAL, 1998). McGarry (2003), define a compactação como o problema ambiental mais grave causado pela agricultura e é visto como um dos principais agentes causadores da erosão, da depleção de nutrientes e da poluição dos solos (HARTEMINK, 2008).

Os solos manejados sob SPD de longa duração, sobretudo os argilosos, geralmente apresentam uma camada compactada em subsuperfície, de aproximadamente 7 à 15-20 cm de profundidade (REICHERT et al., 2009; NUNES et al., 2015), a qual faz com que o maior volume de raízes das plantas fique concentrado na camada de 0 à 7 cm. Li et al. (2017) mostram que esta camada de impedimento mecânico presente na subsuperfície solo é limitante para o aprofundamento do sistema radicular das plantas.

Cada manejo de solo adotado resulta em uma condição física do solo distinta, de modo que, muitas vezes, a conservação do solo e a produtividade das culturas não são beneficiadas (SILVA; MIELNICZUK, 1998). Os principais agentes causadores da compactação do solo são a exploração intensiva do solo, o pisoteio de animais (integração lavoura-pecuária) e o aumento do tamanho e do peso das máquinas agrícolas (necessárias para a semeadura, colheita, dentre outras operações agrícolas) (MILNE; HAYNES, 2004; GODWIN et al., 2008).

A compactação do solo pode ser estimada pela resistência à penetração do solo (RP), índice de cone, densidade do solo, porosidade, teor de umidade, crescimento, desenvolvimento e produtividade de plantas (HAMZA; ANDERSON, 2005; BATEY, 2009). A resistência à penetração (RP) além de ser um atributo de fácil obtenção e interpretação, pode ser utilizada como um indicador da tomada de decisão quanto à intervenção mecânica de descompactação do solo (DRESCHER et al., 2016).

O crescimento e o desenvolvimento radicular das culturas é diretamente afetado pela compactação do solo (STRECK et al., 2004). Bengough et al. (2006) reportam o efeito negativo da elevada RP do solo sobre a expansão das células radiculares e sobre a forma da raiz

(GOODMAN e ENNOS, 1999). Bengough et al. (2011) e Dong et al. (2017) reportam o efeito da impedância mecânica do solo sobre a taxa de alongação, crescimento e desenvolvimento das raízes, enquanto que Ramos et al. (2010) reportam o potencial da morfologia do ápice radicular como indicador de zonas compactadas do solo, pois a mesma pode apresentar relação diâmetro-comprimento alterada nessas condições.

De acordo com Hamza e Anderson (2005) e Taylor e Gardner (1963), valores de RP superiores a 2,0 Mpa correspondem a condições de solo limitantes para o crescimento de raízes e desenvolvimento de plantas. Vepraskas e Miner (1986) relatam que valores de RP entre 2,8 e 3,2 MPa são suficientes afetar o crescimento das raízes, enquanto que a partir de 4,0 MPa, o crescimento é paralisado totalmente. Ao comparar o enraizamento de soja e milho em um solo sob SPD e outro sob sistema convencional, Lal, Logan e Fausey (1989) relatam que no primeiro, o comprimento e a densidade de raízes foi reduzido em até 45%, justificado pelos elevados valores de RP nele observados.

Para a atenuação da compactação do solo, Botta et al. (2010), sugere algumas estratégias de manejo, tais como a escarificação e a subsolagem. A principal diferença entre essas estratégias é a profundidade de trabalho (SASAKI; GONÇALVES, 2005), sendo que a escarificação se refere à descompactação de até no máximo 35 cm e a subsolagem à profundidades superiores a 35 cm. Além da melhoria estrutural, Liu et al. (2016) relatam o incremento de produtividade de milho ao utilizar essas estratégias de manejo em um solo com problemas de compactação.

A eficiência da descompactação mecânica do solo está diretamente correlacionada com a umidade do solo durante a operação. Nichols e Reaves (1958) relatam a importância de descompactar o solo em condições friáveis, pois ao realizar a descompactação mecânica em um solo muito úmido, o mesmo pode se tornar plástico e os riscos de compactação do solo são ainda mais elevados.

Além da compactação, a acidez e a elevada toxidez por alumínio da subsuperfície dos solos manejados sob SPD também são fatores limitantes ao aprofundamento do sistema radicular das culturas. Nos Latossolos ácidos, a aplicação superficial de calcário em doses reduzidas e espaçadas em longos intervalos de tempo, geralmente resulta na formação de um perfil com acentuado gradiente vertical de qualidade química entre a camada superficial e o subsolo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008; CAIRES, 2013; BORTOLUZZI et al., 2014; DALLA NORA et al., 2014).

Este comportamento do calcário se deve principalmente à sua aplicação de forma superficial (CAIRES, 2012), pois este corretivo atua principalmente na camada superficial do

solo (0 à 10 cm), próxima a zona de aplicação e apresenta pouco ou nenhum efeito nas camadas mais profundas do perfil do solo (PÖTTKER; BEN, 2014). De acordo com Dalla Nora et al. (2013) este limitado efeito do calcário se deve, principalmente, à baixa solubilidade do corretivo e às reduzidas doses aplicadas no solo.

O declínio da qualidade química ao longo do perfil do solo é caracterizado principalmente pela elevada acidez e toxidez de alumínio da subsuperfície dos solos, as quais são prejudiciais às plantas, pois são determinantes para o crescimento de raízes (CAIRES et al., 2006) e também para a distribuição destas raízes no solo, podendo aumentar a suscetibilidade destas aos efeitos deletérios em situações de déficit hídrico (DALLA NORA; AMADO, 2013).

A barreira química ao aprofundamento do sistema radicular, induzida pelo elevado teor de alumínio ( $Al^{3+}$ ), elevada acidez e reduzido teor de cálcio ( $Ca^{2+}$ ) da subsuperfície do solo compromete a eficiência do uso da água armazenada no solo e, conseqüentemente, intensifica o impacto dos estresses hídricos, mesmo que de curta duração, sob a produtividade das culturas (JORIS et al., 2013; DALLA NORA et al., 2014; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Desta forma, a ocorrência de um gradiente vertical de qualidade química na camada de enraizamento (CE) contribui para a instabilidade temporal da produtividade em regiões tropicais (DALLA NORA et al., 2014).

O uso associado de calcário e gesso agrícola e a aplicação de corretivos de maior solubilidade e reatividade, como o óxido de Ca e Mg (ou cal virgem), são alternativas promissoras para a atenuação do gradiente químico dos solos (CÔRREA et al., 2007). A aplicação profunda de corretivos também é eficiente nesse sentido, pois consiste em um método que atua na redução da compactação e na melhoria química do solo, ambos na mesma operação.

De acordo com Mantovani et al. (2017) e Dalla Nora et al. (2017), a aplicação associada de calcário e gesso em superfície é uma prática eficiente para atenuar os efeitos da toxidez de alumínio, incrementar o pH e aumentar a disponibilidade de cálcio e magnésio em camadas mais profundas do solo, além de incrementar a produtividade das culturas, principalmente em situações de déficit hídrico (ZANDONÁ et al., 2015). A aplicação de óxido de cálcio e magnésio é outra alternativa que pode ser utilizada para atenuar os efeitos da acidez e toxidez de alumínio do perfil do solo, pois consiste em um corretivo de solubilidade e reatividade superior a do calcário, possuindo PRNT de aproximadamente 180% (CORRÊA et al., 2009; LIMA et al., 2017).

A presença de elevadas quantidades de  $Al^{3+}$  no solo afeta severamente o crescimento das raízes, levando-as a degeneração, mudança de coloração e a redução do número de pelos radiculares (DELHAIZA; RYAN, 1995; PAVAN et al., 1982). A baixa disponibilidade de  $Ca^{+2}$

reduz a taxa de alongação radicular e, de acordo com Quaggio (2000), quando a saturação por Ca do complexo de troca é inferior a 20%, há forte limitação ao crescimento radicular da maioria das espécies cultivadas.

A soma dos efeitos deletérios da compactação e da acidez da subsuperfície do solo (condições atualmente recorrentes em solos manejados sob SPD) sobre a produtividade das culturas são ainda mais agravados em situações de déficit hídrico. Desta forma, esse trabalho teve como intuito principal estudar estratégias de manejo de solo que possam ser utilizadas para mitigar tais limitações do perfil do solo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar se a combinação de estratégias físicas e químicas de manejo do solo resultam em melhorias na camada de enraizamento profunda de um Latossolo manejado sob sistema plantio direto em relação ao uso isolado das mesmas.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Investigar o efeito do manejo do solo como atenuante de déficit hídrico para a produtividade da soja em sistema plantio direto de longa duração.
- Quantificar os efeitos do manejo sobre os atributos físicos e químicos do perfil do solo.
- Determinar a influência do manejo do solo sobre o comprimento, volume e distribuição do sistema radicular da cultura da soja.

### **3. HIPÓTESES**

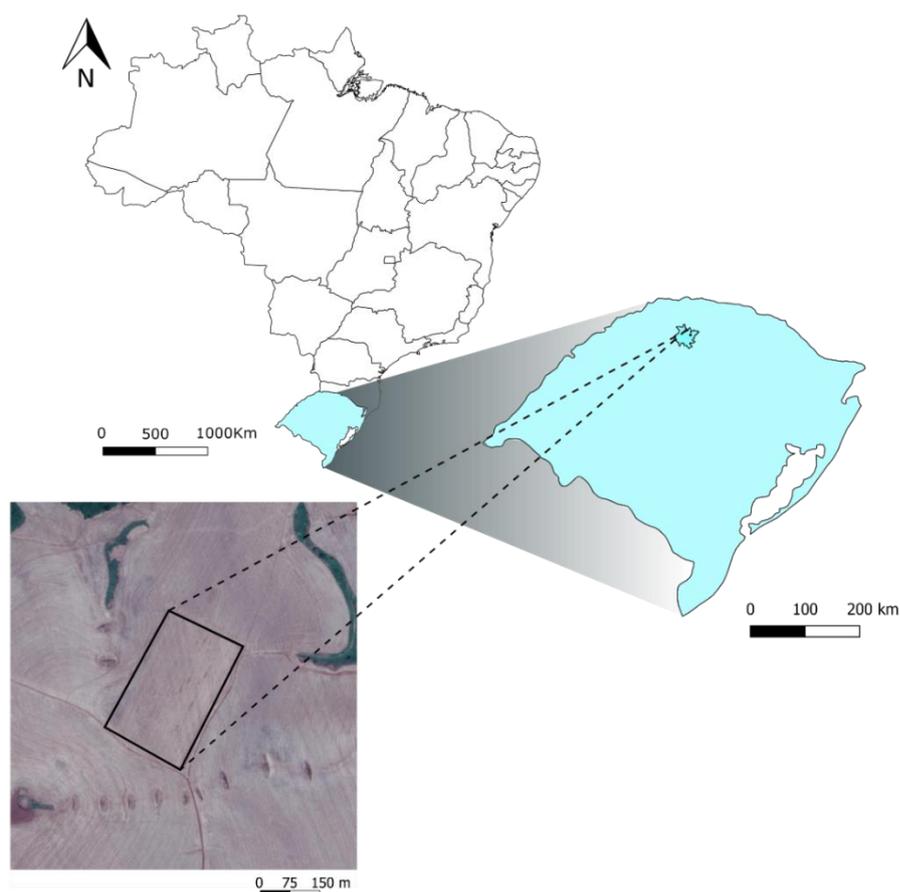
- A aplicação profunda de óxido de Ca e Mg associada à descompactação é eficiente para a melhoria dos atributos físicos e químicos da camada de enraizamento profunda do solo.
- A melhoria física e química da camada de enraizamento do solo incrementa o volume e comprimento do sistema radicular e reduz as perdas de produtividade da cultura da soja em situações de déficit hídrico.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

### 4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi implantado em outubro de 2016 em um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa (EMBRAPA, 2018) na cidade de Dois Irmãos das Missões no sul do Brasil ( $27^{\circ}67'S$ ,  $53^{\circ}56'O$  e 525 m de altitude) (Fig. 1). O clima da região é classificado como Subtropical Úmido (Cfa) (KÖPPEN, 1938).

Figura 1. Localização da área experimental.



Fonte: O autor (2019).

A área experimental foi situada em uma lavoura comercial manejada sob SPD de longa duração (de aproximadamente 20 anos), a qual durante o verão era cultivada com soja (*Glycine max* L.) e no inverno com a cobertura de aveia (*Avena strigosa* L.), azevém (*Lolium multiflorum* L.) e nabo-forrageiro (*Raphanus raphanistrum* L.) oriundos da ressemeadura natural.

Tabela 1. Caracterização química e física da área experimental anteriormente à aplicação dos tratamentos.

Prof.	pH	H+Al	Al	CTC	M.O.	Sat. Ca	Sat. Mg	V	m	S	P	RP
cm	H <sub>2</sub> O	-- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> --				----- % -----				- mg dm <sup>3</sup> -		KPa
<b>0-10</b>	5,2	5,1	0,2	11,7	3,8	40,8	10,6	56,1	3,6	10,9	14,1	1123
<b>10-20</b>	5,1	5,6	0,5	10,3	2,7	33,7	8,9	45,5	9,8	16,9	3,7	2974
<b>20-40</b>	5,2	5,3	0,5	9,2	2,4	31,1	9,6	43,0	12,1	13,6	2,0	2364
<b>40-60</b>	5,1	5,6	0,7	8,9	1,9	27,0	9,0	37,1	17,9	16,0	1,6	1763
<b>60-80</b>	5,2	5,2	0,6	8,0	1,5	24,9	9,6	35,1	17,6	11,6	1,4	-
<b>80-100</b>	5,2	5,1	0,7	7,4	1,2	21,4	8,5	30,4	22,2	11,7	1,6	-

Prof. – Profundidade; H+Al – Acidez potencial; Al – Alumínio; CTC – Capacidade de troca de cátions; M.O. – Matéria orgânica; Sat. Ca – Saturação por cálcio; Sat. Mg – Saturação por magnésio; V – Saturação por bases; m – Saturação por Al; S – Enxofre; P – Fósforo; RP – Resistência à penetração do solo.

A caracterização física e química da área está descrita na tabela 1 e evidencia a redução da concentração de Ca e Mg e aumento da saturação por alumínio (m) com o avanço da profundidade. Os valores de RP também se encontram acima do valor crítico de 2 MPa (TAYLOR; GARDNER, 1963) e demonstram a formação de uma camada mais densa entre 10-40 cm, a qual evidencia a compactação subsuperficial deste solo.

## 4.2 ESTRATÉGIAS QUÍMICAS DE CORREÇÃO DO SOLO ESTUDADAS

### 4.2.1 Calcário e gesso

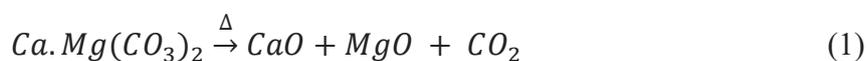
O calcário utilizado neste trabalho foi o magnesiano, o qual possuía concentrações de Ca e Mg de 25% e 10%, respectivamente. O PRNT deste corretivo era de 71% e a dose utilizada foi de 3,0 Mg ha<sup>-1</sup>, o que representa a aplicação de 750 kg de Ca e 300 kg de Mg no solo.

O calcário além de ser aplicado isoladamente, também foi utilizado de forma associada ao gesso agrícola (sulfato de cálcio). Esse condicionador de solo é utilizado com o intuito de otimizar os efeitos do calcário e aumentar a eficiência da neutralização do Al<sup>+3</sup> e mobilidade dos íons de Ca<sup>+2</sup> no perfil do solo (DALLA NORA et al., 2017). O gesso agrícola utilizado possuía concentração de Ca de 15% e de S de 11% e a dose utilizada foi de 3,0 Mg ha<sup>-1</sup> e, quando associado ao calcário, resultou na aplicação de 1200 Kg ha<sup>-1</sup> de Ca, 300 Kg ha<sup>-1</sup> de Mg e 330 Kg ha<sup>-1</sup> de S no solo.

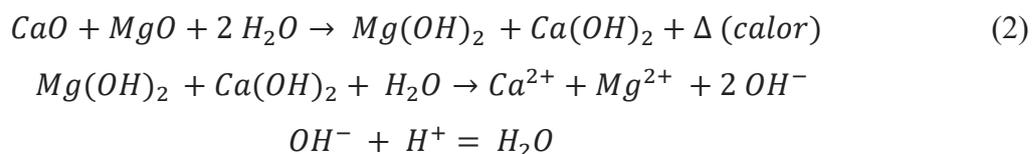
A definição das doses de calcário e gesso foi realizada seguindo a CQFS-RS/SC (2016) e Quaggio e Raij (1996), respectivamente. A aplicação do calcário e da combinação calcário e gesso foi realizada na superfície do solo com o uso de um distribuidor à lança.

#### 4.2.2 Óxido de cálcio e magnésio (cal virgem)

O óxido de Ca e Mg (também conhecido como cal ou cal virgem) é obtido através da calcinação (queima à temperaturas superiores a 900°C) do calcário, que pode ser calcítico ou dolomítico. O corretivo utilizado no experimento foi originado pela queima do calcário dolomítico através da reação:



Ao ser aplicado no solo, os óxidos de Ca e Mg reagem com a água (umidade do solo) e reagem da seguinte forma:



Ao final da reação, o óxido de Ca e Mg consegue liberar  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $OH^-$  para o solo. A ação neutralizante deste corretivo se dá pela reação entre íons  $OH^-$  (liberados) e  $H^+$  (presentes no solo), a qual resulta na formação de uma molécula de água. Este corretivo é considerado uma base forte, pois reage totalmente e libera rapidamente as hidroxilas para a solução do solo.

De acordo com o fabricante, o PRNT do óxido de Ca e Mg utilizado neste estudo era de 183% e sua concentração de Ca e Mg era de 60% e 30%, respectivamente. A dose utilizada deste corretivo foi de 1,2 Mg ha<sup>-1</sup> (calculada pelo equivalente de calcário), o que representou a aplicação de 511 Kg ha<sup>-1</sup> de Ca e 216 Kg ha<sup>-1</sup> de Mg no solo.

O óxido de Ca e Mg foi aplicado no solo de duas formas: em superfície com o uso de um distribuidor à lanço e em profundidade, realizada juntamente com a subsolagem, por meio de aberturas nas hastes do subsolador (o qual aplicava por meio da gravidade) nas profundidades de 10, 30 e 50 cm (Anexo C).

#### 4.3 ESTRATÉGIAS FÍSICAS DE CORREÇÃO DO SOLO ESTUDADAS

Para atenuar os efeitos da compactação do solo, foram utilizadas duas estratégias de manejo mecânico: a escarificação e a subsolagem. Estes implementos são os mais indicados por causarem menor mobilização do solo, devido à sua reduzida área superficial (KOCHHNANN; DENARDIN, 2000).

### 4.3.1 Escarificação

A escarificação até aproximadamente 30 cm foi realizada utilizando o escarificador da marca Jan®, modelo Matic (Anexo A), o qual consistia de hastes escarificadoras do tipo reta-inclinada com espaçamento de 50 cm entre hastes. A velocidade média de atuação do conjunto trator-implemento era de aproximadamente 4,0 km h<sup>-1</sup>.

### 4.3.2 Subsolagem

A subsolagem até 50 cm foi realizada através da utilização de um implemento chamado de adubador de perfil da marca Kamaq®. A haste desse implemento era do tipo reta-inclinada. Além disso, esse subsolador possuía uma caixa armazenadora acoplada (Anexo B) que, quando abastecida, realizava a aplicação profunda de fertilizantes e corretivos no solo simultaneamente à descompactação profunda. A velocidade média de atuação do conjunto trator-implemento era de aproximadamente 2,5 km h<sup>-1</sup>.

## 4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O design experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. As estratégias de correção físicas e químicas do solo foram utilizadas de forma isolada e associada e foram dispostas nos seguintes tratamentos:

Test. - Testemunha;

T1 – Subsolagem até 50 cm com espaçamento de 70 cm;

T2 – Escarificação até 30 cm com espaçamento de 50 cm;

T3 – Subsolagem até 50 cm com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm;

T4 – Escarificação até 30 cm com espaçamento de 50 cm + aplicação superficial de óxido de Ca e Mg;

T5 – Aplicação superficial de óxido de Ca e Mg;

T6 – Aplicação de calcário + gesso em superfície;

T7 – Aplicação de óxido de Ca e Mg + calcário + gesso em superfície;

T8 – Subsolagem até 50 com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm.

## 4.5 COLETA E ANÁLISES

### 4.5.1 Coleta e análise de solo

A coleta de solo (Anexo D) foi realizada através de aberturas no solo de 0,3 x 0,3 x 1 m com o uso de um perfurador. Foi realizada uma coleta anteriormente à implantação do experimento para caracterização inicial e outras duas após 6 e 18 meses da implantação do experimento. As profundidades de amostragem foram: 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m. A análise completa de solo foi realizada na CCGL-Tec em Cruz Alta.

As determinações químicas de pH H<sub>2</sub>O foram feitas por potenciômetro na suspensão solo-água na proporção de 1:1, teor de Al obtido na extração com KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e titulado com NaOH 0,0125 mol L<sup>-1</sup>, Ca e Mg obtidos na extração com KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, P e K no solo extraídos pelo método do extrator duplo ácido Mehlich-I e determinados por espectroscopia e fotometria de chama, respectivamente. As análises químicas seguiram a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995).

### 4.5.2 Determinação da resistência à penetração do solo

A avaliação da resistência à penetração do solo (RP) foi realizada nos mesmos momentos das coletas de solo usando um penetrômetro automático (SoloTrack PLG5300) da marca Falker (Anexo E). As leituras foram realizadas a cada centímetro até 60 cm de profundidade através de uma célula de carga e inserção da haste na velocidade de 0,024 m s<sup>-1</sup>. Como o solo era argiloso, a ponteira utilizada foi do tipo cone 2 (de diâmetro 12,83 mm) com um ângulo de 30° (ASABE, 2009).

As leituras de RP foram realizadas na forma de transectos, com a realização de 20 leituras por tratamento. Para determinação da umidade do solo no momento das leituras, foram coletadas amostras de solo (3 repetições) nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 que foram secas em estufa de ar forçado à 65°C até peso constante. A umidade média do solo no momento das leituras foi de 0,25 g g<sup>-1</sup> para a primeira amostragem e de 0,23 g g<sup>-1</sup> para a segunda amostragem.

### 4.5.3 Coleta e análise de raízes

A coleta de raízes foi realizada no pleno florescimento da cultura da soja na safra de 2017/18 através da metodologia da placa de pregos (adaptada de Hansel et al., 2017; Li et al.,

2017) (Anexo F). As placas foram construídas em madeira e possuíam pregos espaçados de 5 em 5 cm para facilitar a fixação do solo na placa. Para que as raízes fossem retiradas do solo de forma intacta e para evitar a perda de raízes durante o processo de lavagem, foi fixada na base de cada placa uma malha de alumínio de 2 mm.

Para posicionar a placa no solo foram abertas trincheiras de aproximadamente 50x80x40 cm (altura x comprimento x largura) e, para facilitar a fixação da placa de forma perpendicular ao solo, foi utilizado um macaco hidráulico durante a coleta. Cada monolito coletado possuía aproximadamente 30x40x10 cm (altura x comprimento x largura). Foram coletadas três repetições em 4 tratamentos previamente selecionados: Test. - Testemunha; T3 – Subsolação até 50 cm com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm; T6 – Aplicação de calcário + gesso em superfície; T8 – Subsolação até 50 cm com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm, totalizando 12 raízes.

Após a retirada, cada monolito foi embalado com papel-filme para preservação das raízes durante o transporte. Antes de iniciar o processo de lavagem, os monolitos foram submersos em uma solução de NaOH à 5% durante 4 horas para facilitar a dispersão da argila e reduzir o trabalho no processo de lavagem. A lavagem foi realizada utilizando água corrente com baixa vazão para desagregar o solo e possibilitar a liberação das raízes fixadas ao solo.

No laboratório, as raízes foram secas, pesadas e, posteriormente, cortadas e separadas por profundidade (a cada 5 cm). Em seguida, as mesmas foram escaneadas utilizando um scanner Epson Expression 12000XL (Epson America Inc., Long Beach, CA, United States), gerando imagens de 600 dpi analisadas pelo software WinRhizo (Regent Instruments Canada Inc. Ville de Québec, QC, Canadá), nas quais foram determinados o comprimento e o volume total de raízes, além do comprimento e volume de raízes por classes de diâmetro (>0,2, 0,2-0,8 e <0,8 mm).

#### **4.5.4 Implantação das câmaras de restrição hídrica**

Durante o estágio reprodutivo da soja (período mais crítico da cultura) foram instaladas câmaras de restrição hídrica (Anexo G) nos tratamentos: Test. - Testemunha; T3 – Subsolação até 50 cm com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm; T6 – Aplicação de calcário + gesso em superfície; T8 – Subsolação até 50 cm com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm, as quais excluíam 100% da precipitação incidente sobre a cultura. Cada câmara possuía aproximadamente 12 m<sup>2</sup> (3 x 4 m) e tinha como base uma estrutura de madeira coberta com um

plástico de polietileno de 0,10 mm. Nas bordas das câmaras foram feitos drenos para evitar que a percolação lateral trouxesse água para seu interior (adaptado de Hansel et al., 2017).

#### **4.5.5 Determinação da produtividade da soja**

A determinação da produtividade da soja na safra 2016/17 foi realizada através da colheita de 3 repetições de 4 metros lineares, totalizando 6 m<sup>2</sup> em cada parcela (CV = 10,60%). Para tentar reduzir o CV, na safra de 2017/18, foram coletadas 5 repetições de 10 metros lineares, totalizando 25 m<sup>2</sup> por parcela (CV = 7,30%). Dentro das câmaras de restrição, foram coletadas 3 repetições de 1 metro linear, excluindo 0,5 m em cada borda nas duas safras. A umidade de grãos foi determinada em cada repetição e sua respectiva produtividade foi corrigida para a umidade de 13%. A população de plantas foi avaliada e, devido à pouca variação, foi fixada em 12 plantas por metro.

#### **4.5.6 Análise estatística**

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R (R CORE TEAM, 2018). Os resultados da análise química, de resistência à penetração e produtividade foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e posteriormente tiveram suas médias comparadas pelo teste de Tukey à 5% de significância. As correlações entre parâmetros de raízes, atributos do solo e a produtividade da soja foram obtidas pela regressão múltipla através do método “stepwise”.

## 5. ARTIGO I – ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA MELHORIA DA QUALIDADE DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO PROFUNDA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO

### 5.1 RESUMO

A adoção do Sistema Plantio Direto trouxe inúmeros benefícios para a produção agrícola, no entanto, principalmente em solos tropicais, a compactação e a acidez da subsuperfície têm se tornado um problema recorrente. Estas condições afetam diretamente o crescimento do sistema radicular e a produtividade das culturas. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da melhoria física e química do perfil de solo sobre os atributos do solo e a produtividade da cultura da soja. O experimento foi conduzido no município de Dois Irmãos das Missões no Rio Grande do Sul, em duas safras com precipitações distintas (2016/17 e 2017/18) e seu delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram constituídos pelo Test. (testemunha), T1 (subsolagem com espaçamento de 70 cm), T2 (escarificação com espaçamento de 50 cm), T3 (subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm), T4 (escarificação com espaçamento de 50 cm + aplicação superficial de óxido de Ca e Mg), T5 (aplicação superficial de óxido de Ca e Mg), T6 (aplicação de calcário + gesso em superfície), T7 (aplicação de óxido de Ca e Mg + calcário + gesso em superfície) e T8 (subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm). As amostragens de solo foram realizadas nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m e os atributos químicos avaliados foram o pH, saturação por alumínio e teores de cálcio, magnésio e enxofre do solo. O atributo físico avaliado foi a resistência mecânica à penetração do solo, a qual foi determinada até 0,60 m de profundidade. Todas as avaliações de solo foram realizadas 6 e 18 meses após da aplicação dos tratamentos. O T8 incrementou o pH do solo e neutralizou a saturação por alumínio na subsuperfície do solo, principalmente após 18 meses a aplicação. No entanto, em ambas as safras avaliadas, não houve efeito significativo dos tratamentos sobre a produtividade da cultura da soja.

**Palavras-chave:** Compactação. Subsolagem. Escarificação. Acidez. Gesso. Calcário. Óxido de Ca e Mg.

## ARTICLE I - MANAGEMENT STRATEGIES TO QUALITY IMPROVEMENT OF THE DEEP ROOTING LAYER IN AN LONG-TERM NO-TILL

### 5.2 ABSTRACT

The adoption of no-tillage system brought any benefits to crop systems, however, mainly in tropical soils, the compaction and acidity of the soil subsurface have become a recurring problem. These conditions directly affect the root system growth and development and the crop productivity. The aim of this study is to test the association of physical and chemical methods of soil profile improvement to increases the soybean seed yield in long term no-till. The experiment was conducted in Dois Irmãos das Missões in Rio Grande do Sul, in two distinct crop seasons (2016/17 and 2017/18) and your experimental design was a randomized blocks with three replications. The treatments were constituted by the Test. (control), T1 (subsoiling with 70 cm spacing), T2 (chiseling with 50 cm spacing), T3 (subsoiling with 70 cm spacing + deep application of Ca and Mg oxide with 70 cm spacing), T4 (chiseling with 50 cm spacing + surface application of Ca and Mg oxide), T5 (surface application of Ca and Mg oxide), T6 (surface application of limestone + gypsum), T7 (surface application of Ca and Mg oxide + limestone + gypsum) and T8 (subsoiling with 35 cm spacing + deep application of Ca and Mg oxide with 70 cm spacing). The soil sampling was performed in the layers of 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80 and 0.80-1.00 m and the chemical attributes evaluated were the pH, aluminum saturation and calcium, magnesium and sulfur contents. The physical attribute evaluated was the mechanical resistance to soil penetration that was determined at each cm of soil up to 0.60 m depth. All soil evaluations were performed 6 and 18 months after the application of the treatments. The T8 increased the pH values and reduced the aluminum saturation, mainly 18 months after the application. Wherever, in both harvests evaluated, there was no significant effect of the treatments on soybean seed yield.

**Keywords:** Compaction. Subsoiling. Chiseling. Acidity. Gypsum. Limestone. Ca and Mg oxide.

### 5.3 INTRODUÇÃO

No mundo, mais de 100 milhões de hectares são cultivados sob Sistema Plantio Direto (SPD) (DERPSCH et al., 2010). No sul do Brasil, este sistema começou a ser implantado na década de 70 com o objetivo principal de evitar a erosão do solo e é baseado em três premissas: a ausência de revolvimento do solo, a manutenção de cobertura do solo durante todo o ano e a rotação de culturas (HOBBS et al., 2008). De acordo com Soratto e Crusciol (2008), o SPD é uma das melhores alternativas para o manejo sustentável dos recursos naturais na exploração agrícola dos solos tropicais e subtropicais, além de ser uma estratégia que auxilia na redução das perdas de água e solo pela erosão, devido à manutenção de cobertura sobre o solo (SCHICK et al., 2014).

A aplicação superficial de insumos e corretivos associada à ausência de preparo do solo expõe o solo à compactação, acidez e toxidez de alumínio em subsuperfície, limitações que podem afetar o crescimento e desenvolvimento radicular das plantas (BEULTER; CENTURION, 2004; DALLA NORA; AMADO, 2013). É comum os Latossolos tropicais, sobretudo os argilosos, apresentarem uma transição abrupta de qualidade química (AMADO et al., 2009) e física (REICHERT et al., 2009a) ao longo do seu perfil, apresentando uma camada superficial (geralmente de 0 à 7 cm) com elevada concentração de nutrientes e pH mais elevado associados à menor densidade do solo e, abaixo dela, uma camada subsuperficial (geralmente de 7 à 20 cm), com elevada saturação por alumínio, baixa concentração de nutrientes, pH ácido e com problemas de compactação.

A acidez e a toxidez por alumínio dos Latossolos se explica principalmente à correção de pH do solo, que no SPD é fundamentada através da aplicação superficial de calcário. Este corretivo atua no solo em camadas superficiais, até no máximo 10 cm. Este comportamento se deve à baixa solubilidade do calcário e às reduzidas doses aplicadas. Desta forma, os efeitos benéficos da calagem, como a elevação do pH, dos teores de Ca e Mg e neutralização do  $Al^{+3}$  normalmente se restringem às zonas de aplicação ou imediatamente abaixo delas (GONZALES-ERICO et al., 1979; POTTKER; BEN, 1998; RITCHEY et al., 1980).

Segundo Beulter e Centurion (2004), a compactação afeta a distribuição das raízes das plantas no solo, pois altera a estrutura do mesmo, com a redução da porosidade, principalmente da macroporosidade, afetando a disponibilidade de água no solo. A resistência mecânica à penetração do solo (RP) é vista como o parâmetro que melhor representa a condição de compactação do solo restritiva ou não às plantas (BENGOUGH et al., 2011) e serve como indicador para apoiar a decisão de realizar ou não a escarificação mecânica do solo

(DRESCHER et al., 2016). Os valores críticos de RP variam com o tipo de solo, umidade, teor de matéria orgânica do solo (MOS), com a cultura e, até mesmo entre as cultivares (TORRES; SARAIVA, 1999). Como padrão, Taylor, Robertson e Parker (1966) definiram que valores de RP acima de 2,0 Mpa são limitantes ao crescimento das raízes e da parte aérea da maioria das culturas de interesse agrícola.

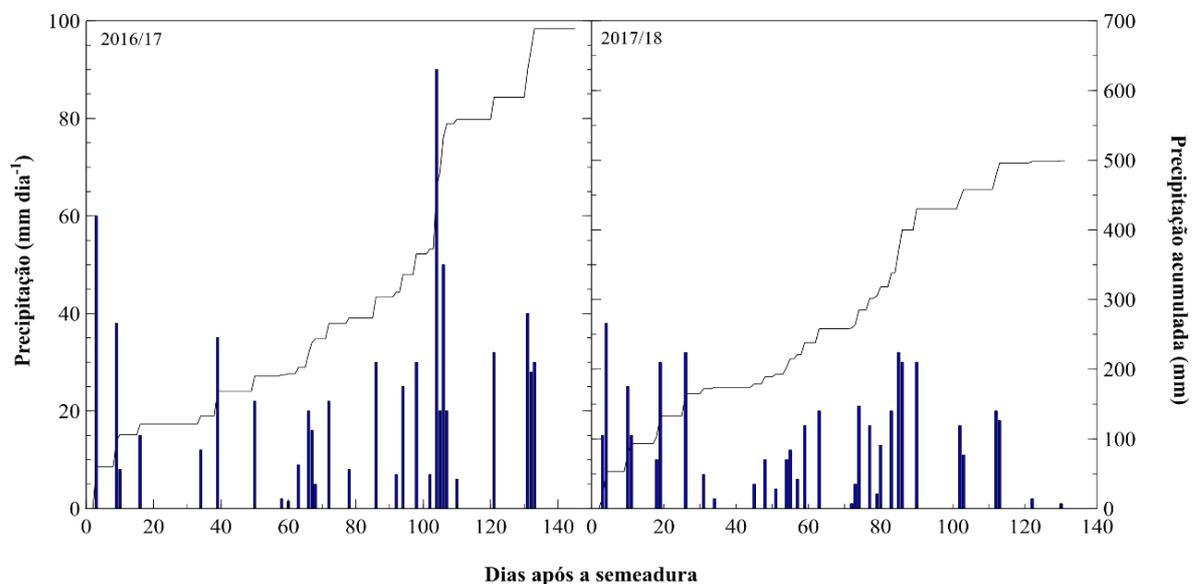
A soma dos efeitos da compactação, acidez e toxidez de  $Al^{+3}$  da subsuperfície do solo podem potencializar os danos causados por situações de déficit hídrico, comuns no Rio Grande do Sul. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar se a aplicação profunda de óxido de Ca e Mg associada à descompactação é eficiente para a melhoria dos atributos físicos e químicos da camada de enraizamento profunda do solo.

## 5.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.4.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado na cidade de Dois Irmãos das Missões no sul do Brasil ( $27^{\circ} 67' S$   $53^{\circ} 56' O$  e 525 m de altitude) em um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa (EMBRAPA, 2018). O clima da região é classificado como Subtropical Úmido (Cfa) (KÖPPEN, 1938) e a precipitação pluvial durante o período experimental se encontra na Figura 1.

Figura 1. Precipitação pluvial diária e acumulada durante o período experimental.



Fonte: O autor.

Anteriormente à implantação do experimento, a área foi manejada sob SPD por

aproximadamente 20 anos. No verão, a área era cultivada com soja (*Glycine max* L.) e no inverno com a cobertura de aveia (*Avena strigosa* L.), azevém (*Lolium multiflorum* L.) e nabo-forrageiro (*Raphanus raphanistrum* L.), oriundas de ressemeadura natural em todos os anos. O experimento foi implantado em outubro de 2016, anteriormente à semeadura da soja (cultivar NS5909) e os atributos químicos e físicos do solo no momento da implantação estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química e física da área experimental anteriormente à aplicação dos tratamentos.

Prof.	pH	H+Al	Al	CTC	M.O.	Sat. Ca	Sat. Mg	V	m	S	P	RP
cm	H <sub>2</sub> O	-- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> --			----- % -----					- mg dm <sup>3</sup> -		KPa
<b>0-10</b>	5,2	5,1	0,2	11,7	3,8	40,8	10,6	56,1	3,6	10,9	14,1	1123
<b>10-20</b>	5,1	5,6	0,5	10,3	2,7	33,7	8,9	45,5	9,8	16,9	3,7	2974
<b>20-40</b>	5,2	5,3	0,5	9,2	2,4	31,1	9,6	43,0	12,1	13,6	2,0	2364
<b>40-60</b>	5,1	5,6	0,7	8,9	1,9	27,0	9,0	37,1	17,9	16,0	1,6	1763
<b>60-80</b>	5,2	5,2	0,6	8,0	1,5	24,9	9,6	35,1	17,6	11,6	1,4	-
<b>80-100</b>	5,2	5,1	0,7	7,4	1,2	21,4	8,5	30,4	22,2	11,7	1,6	-

Prof. – Profundidade; H+Al – Acidez potencial; Al – Alumínio; CTC – Capacidade de troca de cátions; M.O. – Matéria orgânica; Sat. Ca – Saturação por cálcio; Sat. Mg – Saturação por magnésio; V – Saturação por bases; m – Saturação por Al; S – Enxofre; P – Fósforo; RP – Resistência à penetração do solo.

#### 5.4.2 Delineamento experimental

O delineamento utilizado foi de blocos ao acaso com três repetições. Onde os tratamentos utilizados foram os seguintes: Test. - Testemunha; T1 – Subsolagem até 50 cm com espaçamento de 70 cm; T2 – Escarificação até 30 cm com espaçamento de 50 cm; T3 – Subsolagem até 50 cm com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm; T4 – Escarificação até 30 cm com espaçamento de 50 cm + aplicação superficial de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>); T5 – Aplicação superficial de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>); T6 – Aplicação de calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície; T7 – Aplicação de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) + calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície; T8 – Subsolagem até 50 cm com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm.

#### 5.4.3 Caracterização das estratégias para melhoria química e física do solo

Como ferramentas de melhoria da qualidade química do solo foram utilizados o óxido de Ca e Mg (ou cal virgem), o calcário e a associação de gesso e calcário. O óxido de Ca e Mg possuía PRNT de 183% e sua concentração de Ca e Mg é de 60% e 30%, respectivamente. O calcário utilizado neste trabalho foi o magnesiano, o qual possuía concentrações de Ca e Mg de

25% e 10%, respectivamente e PRNT de 71%. O gesso agrícola utilizado possuía concentração de Ca de 15% e de S de 11%.

Para atenuar os efeitos da compactação subsuperficial do solo, foram utilizadas duas ferramentas: a escarificação e a subsolagem. A escarificação (até 30 cm) foi realizada utilizando um escarificador da marca Jan®, modelo Matic, o qual consistia de hastes escarificadoras com espaçamento de 50 cm entre elas. A subsolagem (até 50 cm) foi realizada através da utilização de um implemento chamado de adubador de perfil da marca Kamaq®, que possuía distância entre hastes de 70 cm. As hastes de ambos os implementos são do tipo reta-inclinada.

O subsolador utilizado possuía uma caixa armazenadora acoplada e desta forma foi possível realizar a aplicação profunda de corretivos que, por questões operacionais, foi o óxido de Ca e Mg. A aplicação era feita através de aberturas localizadas nas hastes do implemento que aplicava o corretivo no solo, simultaneamente à descompactação, através da ação da gravidade em três profundidades no solo (10, 30 e 50 cm).

#### **5.4.4 Determinação da resistência à penetração do solo**

A avaliação da Resistência à Penetração do solo (RP) foi realizada nos mesmos momentos das coletas de solo (6 e 18 meses após a aplicação dos tratamentos) através do uso de um penetrômetro automático (SoloTrack PLG5300 da marca Falker®). As leituras foram realizadas a cada centímetro até 60 cm de profundidade através de uma célula de carga e inserção da haste à uma velocidade de  $0,024 \text{ m s}^{-1}$ . Como o solo era argiloso, a ponteira utilizada foi do tipo cone 2 (de diâmetro 12,83 mm) com um ângulo de  $30^\circ$  (ASABE, 2009). As leituras foram feitas em transectos de modo a realizar 20 leituras por tratamento. Para determinação da umidade do solo no momento das leituras, foram coletadas amostras de solo (3 repetições) nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 que foram secas em estufa de ar forçado à  $65^\circ\text{C}$  até peso constante. A umidade do solo na primeira e na segunda avaliação era de  $0,25 \text{ g g}^{-1}$  e de  $0,23 \text{ g g}^{-1}$ , respectivamente.

#### **5.4.5 Coleta e análise de solo**

Foram realizadas duas coletas de solo, 6 e 18 meses após a aplicação, através da abertura de trincheiras no solo de  $0,3 \times 0,3 \times 1 \text{ m}$  com o uso de um perfurador de solo. As profundidades de coleta foram: 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m. A análise completa do solo foi realizada na CCGL-Tec em Cruz Alta e seguiu a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995).

#### **5.4.6 Determinação da produtividade da soja**

Na primeira safra (2016/17), a determinação da produtividade da soja foi realizada através da colheita de 3 repetições de 4 metros lineares de soja, totalizando 6 m<sup>2</sup> em cada parcela, no entanto, na segunda safra (2017/18), para possibilitar a redução do CV, foram coletadas 5 repetições de 10 metros lineares, totalizando 25 m<sup>2</sup> por parcela. A umidade dos grãos foi determinada em cada repetição e a produtividade foi corrigida para a umidade de 13%.

#### **5.4.7 Análise estatística**

Os resultados da análise química, de resistência à penetração e produtividade foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, análise de variância (ANOVA) e posteriormente, tiveram suas médias comparadas pelo teste de Tukey à 5% de significância, utilizando o software R (R CORE TEAM, 2018).

### **5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **5.5.1 Caracterização química e física do solo anteriormente à aplicação dos tratamentos**

O solo selecionado para a realização do experimento foi um Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2018). Essa ordem de solos naturalmente é mais ácida e pobre em nutrientes nas suas camadas mais profundas, apresentando uma redução da qualidade química com o avanço da profundidade do solo, principalmente quando os mesmos são manejados sob SPD de longa duração (AMADO et al., 2009). Pode-se verificar na Tabela 1, que todas as camadas amostradas apresentaram atributos do solo, tais como o pH e a saturação por bases, abaixo do limite proposto pela CQFS-RS/SC (2016) ( $\text{pH} < 5,5$  e  $V\% < 65\%$ ). A saturação por alumínio (m) nas camadas abaixo de 20 cm também estão acima do limite proposto pela CQFS-RS/SC (2016) ( $m < 10\%$ ). Estas condições evidenciam a necessidade da aplicação de corretivo no solo capaz de promover a atenuação das limitações anteriormente descritas.

O declínio da qualidade química do solo, principalmente nas camadas subsuperficiais, prejudicam o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular e, conseqüentemente, a produtividade das culturas (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005; FARINA; CHANNON; THIBAUD, 2010).

Em relação aos atributos físicos do solo, pode-se verificar na Tabela 1, o aumento dos valores de RP do solo até os 40 cm de profundidade. Nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m estes valores ultrapassaram o limite crítico proposto por Klein e Camara (2007), que

determinam que resistências superiores à 2,0 MPa são limitantes para o crescimento e desenvolvimento, tanto das raízes, quanto da parte aérea das culturas.

Para superar o problema da compactação subsuperficial do solo, algumas práticas de manejo podem ser utilizadas, tais como a rotação de culturas, a escarificação e a subsolagem. Botta et al. (2010) reportaram em seu trabalho que o uso da escarificação e da subsolagem foi eficiente na atenuação da compactação do solo e pode acarretar no incremento da produtividade das culturas (LIU et al., 2016).

### **5.5.2 Variabilidade da precipitação pluvial durante o ciclo da soja**

A disponibilidade hídrica é um dos fatores climáticos que mais afetam a produtividade agrícola, sendo este o fator que rege a distribuição das espécies em diferentes zonas climáticas (MORANDO et al., 2014). A produtividade da cultura da soja pode variar conforme a quantidade e a distribuição da precipitação durante o ciclo da cultura (FRANKE, 2000) e, para possibilitar a obtenção de elevadas produtividades da soja em áreas não irrigadas, é necessário que a oferta hídrica permaneça entre 650 e 700 mm (EMBRAPA, 2007). A soja necessita em média 7,5 mm dia<sup>-1</sup> de água no seu período mais crítico, o florescimento e, se neste período a disponibilidade de água for insuficiente, as plantas podem ter seu crescimento e desenvolvimento prejudicados, refletindo diretamente na sua produtividade.

Na Figura 1, é possível observar a diferença da disponibilidade hídrica à cultura da soja entre as safras avaliadas. Na safra 2016/17, a precipitação acumulada foi de 688,5 mm e o ciclo da soja foi de 146 dias, o que forneceu em média 4,71 mm dia<sup>-1</sup>. Na safra 2017/18, a precipitação acumulada durante o ciclo de 132 dias foi de 499 mm, o que forneceu em média 3,78 mm dia<sup>-1</sup> de água às plantas.

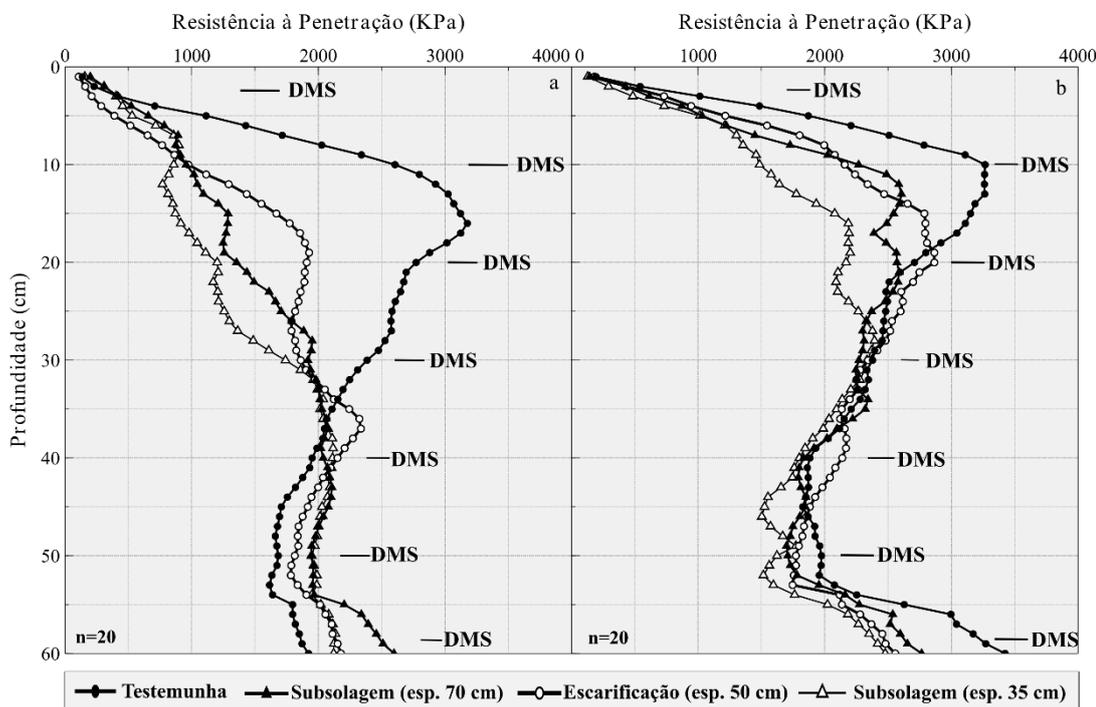
### **5.5.3 Resistência mecânica à penetração do solo após a aplicação dos tratamentos**

O uso de ferramentas mecânicas de descompactação do solo foi eficiente para reduzir os valores de RP do solo (Fig. 2a). Reinert, et al. (2008) e Abreu, Reichert e Reinert (2004) também relatam a eficiência destas ferramentas para a mitigação da compactação, as quais afetam também a taxa de infiltração, a capacidade de armazenamento de água no solo (LEVIEN; COGO; ROCKENBACH, 1990), reduzem a densidade do solo e aumentam a macroporosidade do solo (COLUSSI; SILVA; MINATO, 2014).

É possível observar na figura 2a que os valores de RP até a camada de 35 cm não ultrapassaram os 2 Mpa quando utilizadas estratégias de manejo mecânico de descompactação

do solo, este valor é considerado como limite crítico para o crescimento radicular e desenvolvimento das culturas (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

Figura 2. Teste de DMS (Tukey à 5% de significância) da resistência à penetração do solo; a) 6 meses após a implantação dos tratamentos; b) 18 meses após a implantação dos tratamentos.



DMS – diferença mínima significativa; esp. – espaçamento entre passadas da haste subsoladora.

No entanto, pode-se verificar que após 18 meses da descompactação mecânica (Fig. 2b), este efeito foi reduzido. Esse comportamento corrobora com o observado por Busscher, Frederick e Bauer (2000), os quais afirmam que solos profundos como os Latossolos com precipitação abundante durante o ano, possuem elevado risco de re-compactação após serem realizadas operações mecânicas de descompactação do solo. De acordo com Drescher et al. (2016), os efeitos da escarificação mecânica vão sendo atenuados ao longo do tempo e podem persistir por até 24 meses. Reichert et al. (2009b) reportam que os efeitos da escarificação não são observados a médio ou longo prazo, podendo persistir no solo por período igual ou inferior a um ano.

#### 5.5.4 Atributos químicos do solo afetados pela aplicação dos tratamentos

Após 6 meses da aplicação dos tratamentos, não houve efeito significativo dos tratamentos sobre os valores de pH, m, CTC, saturação por Ca e Mg, teores de S e V da camada de enraizamento profunda do solo (Tabela 2).

Tabela 2. Efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos 6 meses após a aplicação.

Prof. (cm)	Tratamentos								
	Test.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>									
<b>0-10</b>	5,25b	5,45ab	5,20b	5,13b	5,60a	5,33ab	5,25ab	5,45ab	5,28ab
<b>10-20</b>	5,10ab	5,40a	5,10ab	4,90b	5,25ab	5,23ab	5,10ab	5,20ab	5,43a
<b>20-40</b>	5,18ns	5,35ns	5,08ns	5,20ns	5,25ns	5,30ns	5,18ns	5,33ns	5,53ns
<b>40-60</b>	5,18ns	5,23ns	5,05ns	5,10ns	5,10ns	5,28ns	5,18ns	5,25ns	5,38ns
<b>60-80</b>	5,15ns	5,13ns	5,08ns	4,95ns	5,08ns	5,28ns	5,15ns	5,30ns	5,30ns
<b>80-100</b>	5,10ns	5,20ns	5,20ns	4,98ns	5,20ns	5,30ns	5,10ns	5,15ns	5,13ns
<b>m (%)</b>									
<b>0-10</b>	2,00b	1,13ab	4,08ab	11,95a	0,30b	3,45ab	1,20b	1,20b	3,30ab
<b>10-20</b>	9,95bc	2,18bc	11,25bc	27,93a	6,93bc	13,70b	4,83bc	5,73bc	1,75c
<b>20-40</b>	13,28ns	4,50ns	17,35ns	17,95ns	10,90ns	15,25ns	7,30ns	4,98ns	2,25ns
<b>40-60</b>	16,75ns	12,08ns	22,35ns	23,08ns	22,28ns	22,28ns	13,40ns	9,25ns	7,55ns
<b>60-80</b>	17,18abc	21,55abc	21,80abc	28,85a	24,73ab	18,70abc	10,25bc	9,78bc	8,65c
<b>80-100</b>	27,68ns	17,58ns	21,23ns	30,18ns	25,28ns	19,63ns	19,38ns	13,98ns	14,63ns
<b>Sat. Ca (%)</b>									
<b>0-10</b>	41,45abc	47,35ab	40,95abc	32,80c	52,00a	43,75abc	49,23ab	47,48ab	39,15bc
<b>10-20</b>	32,95abc	45,58a	33,48abc	20,83c	36,70ab	32,13bc	37,60ab	37,80ab	40,33ab
<b>20-40</b>	29,83ns	37,30ns	26,08ns	30,80ns	34,10ns	30,73ns	37,43ns	36,20ns	39,45ns
<b>40-60</b>	26,10ns	31,25ns	23,43ns	23,48ns	22,28ns	26,08ns	28,70ns	29,43ns	30,73ns
<b>60-80</b>	23,05ns	22,80ns	22,95ns	21,98ns	22,95ns	26,33ns	27,20ns	27,60ns	26,85ns
<b>80-100</b>	14,83ns	23,58ns	21,60ns	17,23ns	20,80ns	21,25ns	18,30ns	19,53ns	18,43ns
<b>Sat. Mg (%)</b>									
<b>0-10</b>	12,58b	11,58b	9,58b	8,75b	18,33a	12,20b	11,95b	12,48b	9,25b
<b>10-20</b>	9,35ab	12,43a	9,00ab	5,90b	11,25a	9,50ab	9,73ab	9,40ab	10,93a
<b>20-40</b>	9,60ns	11,25ns	8,15ns	11,70ns	11,73ns	9,85ns	11,78ns	10,03ns	12,43ns
<b>40-60</b>	9,55ns	10,88ns	9,00ns	9,88ns	8,58ns	9,68ns	11,23ns	9,73ns	11,10ns
<b>60-80</b>	10,95ns	8,98ns	9,55ns	8,70ns	9,98ns	12,13ns	11,93ns	10,75ns	11,33ns
<b>80-100</b>	7,70ns	11,03ns	10,00ns	7,18ns	11,23ns	11,13ns	9,38ns	8,78ns	8,90ns
<b>S (mg dm<sup>-3</sup>)</b>									
<b>0-10</b>	7,58ns	9,63ns	8,20ns	6,80ns	8,18ns	6,05ns	11,60ns	12,15ns	9,23ns
<b>10-20</b>	16,50ab	5,10d	8,35cd	17,38a	8,78bcd	9,70abcd	16,60a	15,33abc	11,55abcd
<b>20-40</b>	12,10ab	8,33ab	9,48ab	9,00ab	7,93ab	7,48b	13,73ab	13,93a	11,23ab
<b>40-60</b>	15,53ab	8,95b	12,90ab	12,10ab	13,35ab	14,73ab	15,20ab	18,90a	18,03a
<b>60-80</b>	10,55ns	11,28ns	11,65ns	10,88ns	12,33ns	12,93ns	15,35ns	13,18ns	11,90ns
<b>80-100</b>	12,15ns	13,98ns	16,60ns	11,13ns	11,53ns	13,58ns	8,20ns	7,38ns	9,33ns
<b>CTC (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>									
<b>0-10</b>	13,08ab	12,40ab	13,30ab	12,53a	14,70ab	12,20ab	13,43ab	12,83ab	11,30b
<b>10-20</b>	11,25ab	12,40ab	12,60a	12,73a	11,33ab	10,98ab	11,85ab	10,38b	10,30b
<b>20-40</b>	9,88bc	9,73c	11,55ab	12,53a	9,40c	10,38abc	9,73c	9,43c	9,25c
<b>40-60</b>	9,33ns	9,48ns	9,83ns	10,23ns	9,20ns	9,08ns	9,10ns	8,50ns	8,43ns
<b>60-80</b>	8,88ns	8,83ns	9,53ns	9,90ns	9,65ns	8,28ns	8,38ns	8,10ns	8,08ns
<b>80-100</b>	8,48ab	8,60ab	9,70ab	9,85a	7,60ab	7,58ab	7,48b	7,73ab	7,65ab
<b>V (%)</b>									
<b>0-10</b>	57,63ab	64,15bc	54,45c	45,73a	74,00bc	58,50ab	65,10ab	63,25ab	52,53bc
<b>10-20</b>	44,75abc	61,90a	45,15abc	29,53c	51,05ab	43,05bc	50,35ab	49,65ab	53,50ab
<b>20-40</b>	40,58ns	51,60ns	35,55ns	44,18ns	47,73ns	41,43ns	50,85ns	47,48ns	53,15ns
<b>40-60</b>	36,68ns	44,13ns	33,08ns	34,70ns	31,88ns	36,55ns	40,78ns	40,30ns	42,90ns
<b>60-80</b>	34,35ns	33,25ns	32,98ns	31,65ns	33,80ns	39,00ns	40,00ns	39,10ns	38,88ns
<b>80-100</b>	22,90b	35,65a	32,23ab	25,18ab	32,73ab	32,90ab	28,33ab	28,88ab	27,88ab

Prof. - Profundidade; m - Saturação por alumínio; Sat. Ca - Saturação por cálcio; Sat. Mg - Saturação por magnésio; S - Enxofre; CTC - Capacidade de troca de cátions; V - Saturação por bases; Test. - Testemunha; T1 - Subsolação até 50 cm com espaçamento de 70 cm; T2 - Escarificação até 30 cm com espaçamento de 50 cm; T3 - Subsolação até 50 cm com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm; T4 - Escarificação até 30 cm com espaçamento de 50 cm + aplicação superficial de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>); T5 - Aplicação superficial de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>); T6 - Aplicação de calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície; T7 - Aplicação de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) + calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície; T8 - Subsolação até 50 cm com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm.

Esse comportamento pode ser atribuído ao pouco tempo decorrido após a aplicação, o qual possivelmente não tenha sido suficiente para possibilitar a completa solubilização e reação dos corretivos utilizados, inclusive daqueles que foram incorporados no solo. Fidalski, Yagi e Tormena (2015) também não observaram efeito significativo da incorporação de calcário em um Latossolo argiloso sobre estes atributos após 6 meses da aplicação.

O reduzido efeito dos corretivos após 6 meses da aplicação em um solo argiloso pode ser explicado pelo aumento da capacidade de retenção de cátions no solo devido à geração de cargas elétricas variáveis negativas em função do aumento dos valores de pH do solo (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005).

No entanto, ao associar a subsolagem na linha e na entrelinha (com espaçamento de 35 cm) com a aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (T8), é possível observar que os efeitos benéficos dessa combinação foram potencializados após 18 meses da aplicação (Fig. 3). Nesse tratamento, foram observados os maiores valores de pH (Fig. 3a), m (Fig. 3b), saturação por Ca e Mg (Fig. 3c e 3d) e saturação por bases (Fig. 3e).

A melhoria química observada no T8 pode ser explicada pelo maior volume de água infiltrada no solo, devido ao aumento do número de macroporos resultantes da descompactação na linha e na entrelinha, à elevada precipitação no período e à maior interface solo-correctivo, fatores que auxiliam na reação e solubilização do óxido de Ca e Mg aplicado em profundidade (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005; MANTOVANI et al., 2017; CALONEGO et al., 2017). A granulometria do óxido de Ca e Mg (<0,0053 mm) (CQFS-RS/SC, 2016) é inferior à do calcário e, portanto, também pode ter facilitado a solubilização deste corretivo nesse tratamento.

A aplicação combinada de calcário e gesso agrícola (T6) não foi eficiente para aumentar o pH e reduzir a saturação por alumínio do solo, discordando do encontrado por Dalla Nora (2017), que identificou a redução da saturação por alumínio após 15 meses da aplicação de calcário e gesso agrícola no solo. No entanto, ao associar o óxido de Ca e Mg à combinação, pode-se verificar que houve incremento dos valores de pH, da saturação por Ca e na saturação por bases, bem como a redução da saturação por alumínio, após 18 meses da aplicação, principalmente nas camadas abaixo dos 10 cm.

Tabela 3. Efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos 18 meses após a aplicação.

Prof. (cm)	Tratamentos								
	Test.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>									
0-10	5,25ns	5,25ns	5,10ns	5,45ns	5,50ns	5,48ns	5,33ns	5,43ns	5,68ns
10-20	5,10ab	4,88b	4,78b	5,20ab	5,20ab	5,10ab	5,08ab	5,43a	5,48a
20-40	5,10b	4,83b	4,83b	5,20ab	5,18ab	5,20ab	5,18ab	5,23ab	5,65a
40-60	5,03b	4,80b	4,80b	5,25ab	5,08b	5,23ab	5,20ab	5,35ab	5,75a
60-80	5,00bc	4,88c	4,88c	4,98bc	4,98bc	5,15bc	5,23bc	5,35b	5,83a
80-100	5,00b	4,93b	4,93b	5,00b	5,00b	5,20b	5,28b	5,25b	5,75a
<b>m (%)</b>									
0-10	4,80ns	3,58ns	7,03ns	0,70ns	2,53ns	1,95ns	4,25ns	3,33ns	0,00ns
10-20	11,4abc	19,30ab	22,73a	6,28bc	9,75abc	9,58abc	15,60abc	4,93bc	2,08c
20-40	15,98ab	29,90a	31,20a	7,38b	13,48ab	13,18ab	14,08ab	8,35b	0,00b
40-60	20,78ab	35,25a	35,98a	11,68b	20,85ab	15,45ab	15,13ab	4,88b	0,00b
60-80	22,75ab	26,65a	32,65a	20,38ab	25,55a	15,20abc	15,10abc	3,85bc	0,00c
80-100	25,23abc	22,55abc	31,43a	20,73abc	29,98ab	19,15abc	13,08abc	7,23bc	2,08c
<b>Sat. Ca (%)</b>									
0-10	44,70ns	38,90ns	38,88ns	48,95ns	43,95ns	48,03ns	43,73ns	42,38ns	46,15ns
10-20	31,43ab	26,28b	24,15b	38,98ab	35,33ab	35,00ab	30,83ab	41,13ab	45,05a
20-40	29,25abc	19,55c	22,28bc	36,65ab	32,50abc	33,95abc	30,18abc	32,95sbc	41,55a
40-60	26,28ab	19,00b	18,90b	35,53a	26,33ab	27,38ab	28,65ab	32,50ab	41,88a
60-80	23,88b	20,15b	20,33b	25,70b	24,95b	25,50b	25,63b	30,33ab	39,58a
80-100	17,83b	18,25b	19,58b	22,70b	20,38b	21,80b	21,10b	25,00b	43,58a
<b>Sat. Mg (%)</b>									
0-10	12,13ns	9,58ns	9,23ns	11,40ns	13,00ns	11,30ns	8,50ns	14,73ns	10,08ns
10-20	7,43ab	6,55b	6,00ab	8,33ab	10,10ab	8,08ab	7,20ab	12,40a	9,78ab
20-40	7,83ns	5,98ns	5,98ns	8,15ns	9,88ns	10,25ns	8,05ns	8,65ns	9,73ns
40-60	8,33ab	6,35b	5,58b	9,65ab	8,15ab	8,43ab	8,75ab	9,88ab	11,35a
60-80	8,15b	6,28b	6,20b	7,83b	8,10b	9,00ab	9,48ab	9,68ab	12,08a
80-100	8,05ab	6,18b	6,63b	7,63ab	8,73ab	9,05ab	8,80ab	10,20ab	12,40a
<b>S (mg dm<sup>-3</sup>)</b>									
0-10	13,40ns	14,80ns	12,60ns	14,73ns	12,53ns	15,90ns	17,73ns	15,13ns	16,95ns
10-20	15,28ns	14,45ns	14,38ns	12,80ns	13,08ns	12,00ns	16,40ns	16,05ns	16,08ns
20-40	16,45ab	12,33b	15,03ab	15,05ab	14,40ab	12,30b	21,30a	18,25ab	15,35ab
40-60	14,10ns	13,50ns	13,18ns	14,05ns	13,70ns	13,20ns	19,08ns	19,63ns	18,33ns
60-80	15,20b	13,80b	13,43b	13,60b	14,00b	13,83b	14,75ab	18,18ab	18,05a
80-100	12,10ns	15,70ns	13,50ns	12,43ns	14,18ns	15,45ns	10,65ns	11,70ns	15,00ns
<b>CTC (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>									
0-10	12,00a	11,98a	12,38a	11,98a	12,20a	12,28	11,48a	10,35ab	8,78b
10-20	11,58ab	10,73ab	10,88ab	10,60ab	10,70ab	12,08a	10,55ab	9,43b	9,18b
20-40	9,73ab	10,13ab	10,50a	10,50a	10,28a	10,15ab	9,40ab	8,13ab	7,58b
40-60	9,10ab	9,48ab	11,38a	8,73ab	10,58ab	10,05ab	8,00b	7,85b	7,50b
60-80	8,65abc	9,53ab	10,08a	9,58ab	9,53ab	9,85a	7,65bc	7,50bc	7,03c
80-100	8,90ns	9,73ns	9,48ns	9,80ns	8,88ns	8,43ns	7,33ns	7,10ns	7,43ns
<b>V (%)</b>									
0-10	60,13ns	54,33ns	52,70ns	65,80ns	60,20ns	62,43ns	56,28ns	61,43ns	61,35ns
10-20	40,88ab	37,10b	32,93ab	50,20ab	47,25ab	44,83ab	40,68ab	58,40a	57,70ab
20-40	38,15ab	27,65b	29,93b	46,75ab	43,70ab	45,33ab	40,20ab	44,48ab	53,23a
40-60	35,28abc	26,78bc	25,58c	46,60ab	35,45abc	36,48abc	38,55abc	43,83abc	54,80a
60-80	32,55b	27,33b	27,38b	34,40b	34,15b	35,03b	35,83ab	40,85ab	52,45a
80-100	26,30b	25,05b	26,78b	30,93b	29,78b	31,25b	30,83b	35,93ab	57,60a

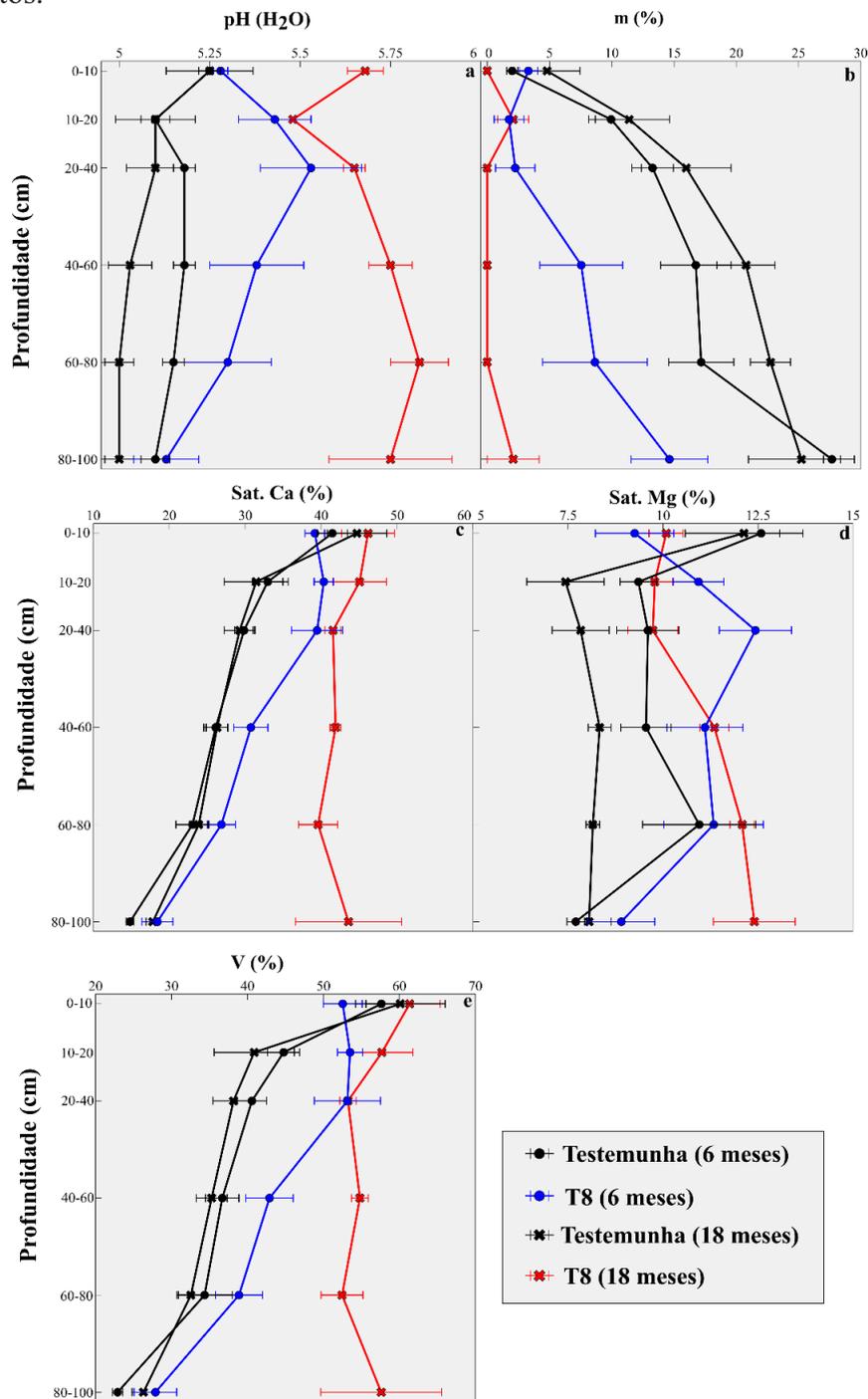
Prof. - Profundidade; m - Saturação por alumínio; Sat. Ca - Saturação por cálcio; Sat. Mg - Saturação por magnésio; S - Enxofre; CTC - Capacidade de troca de cátions; V - Saturação por bases; Test. - Testemunha; T1 - Subsolagem até 50 cm com espaçamento de 70 cm; T2 - Escarificação até 30 cm com espaçamento de 50 cm; T3 - Subsolagem até 50 cm com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm; T4 - Escarificação até 30 cm com espaçamento de 50 cm + aplicação superficial de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>); T5 - Aplicação superficial de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>); T6 - Aplicação de calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície; T7 - Aplicação de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) + calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície; T8 - Subsolagem até 50 cm com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm.

A aplicação superficial de gesso libera no solo complexos de troca com carga neutra (sulfato) que podem promover a descida de nutrientes como o Ca e Mg no perfil do solo, no entanto, com o uso de  $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso, não foi observado esse comportamento neste estudo. Mantovani et al. (2017) e Cavalieri et al. (2004) também não reportaram respostas significativas do teor de Ca e Mg no solo com a aplicação de calcário e gesso em superfície. De Vargas et al. (2019) e Duiker e Beegle (2006) também não reportaram o incremento dos teores de Mg com a incorporação de calcário em dois Argissolos.

A aplicação superficial de gesso agrícola (T6 e T7) incrementou o teor de enxofre do solo, após 18 meses da aplicação (Tabela 3), na camada de 20 à 60 cm. Esses resultados corroboram com Dalla Nora et al. (2017), que verificaram os efeitos do gesso sobre os teores de S até 30 meses após a aplicação.

Ainda na tabela 3, é possível verificar que os teores de S também foram incrementados pelo T8. Esse comportamento pode estar associado com os valores de pH atingidos nesse tratamento após 18 meses da aplicação, (MALAVOLTA, 1980). Além disso, o movimento vertical do ânion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) através da maior infiltração e percolação de água pode ter atuado neste tratamento. A fertilização fosfatada com o uso de superfosfato simples, aplica no solo quantidades significativas de S elementar, o qual pode ser oxidado a  $\text{SO}_4^{2-}$ , se tornando móvel no perfil do solo, Horowitz e Meurer (2007) reportam em seu trabalho a capacidade de oxidação do S elementar em solos tropicais em sulfato e Broch et al. (2011) mostram o efeito significativo da aplicação de superfosfato simples como fonte de S no solo.

Figura 3. Valores de pH (a), m (b), Sat. Ca (c), Sat. Mg (d) e V (e) 6 e 18 meses após a aplicação dos tratamentos.

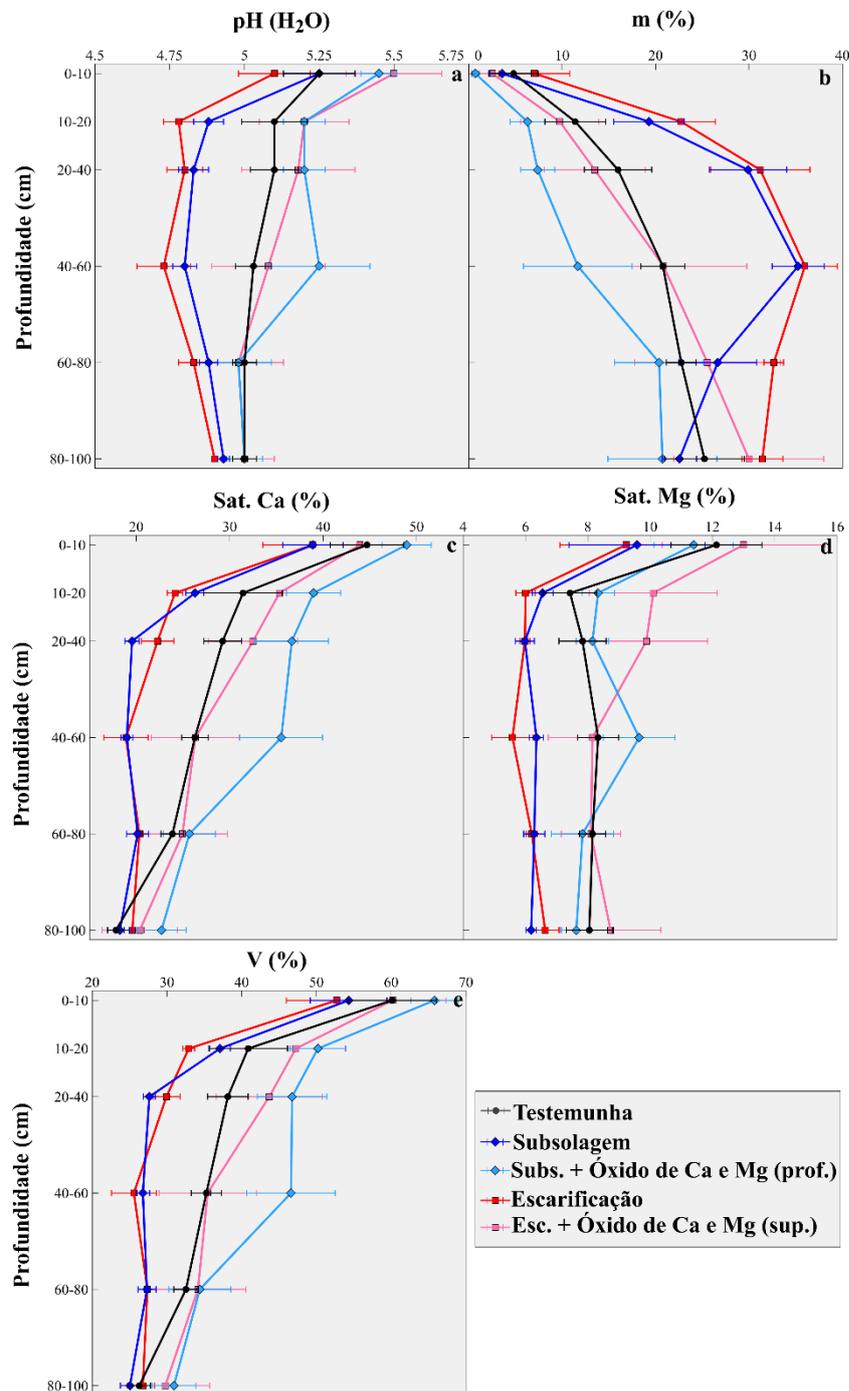


m – saturação por alumínio; V – saturação por bases; Sat. Ca – saturação por cálcio; Sat. Mg – saturação por magnésio.

Após 18 meses da aplicação dos tratamentos (Tabela 3), é possível verificar que o uso isolado de estratégias mecânicas de descompactação do solo (T1 e T2) apresentou os menores valores de pH, maiores valores de m e menores saturações por Ca e Mg em todas as camadas analisadas (Fig. 4). Estes resultados corroboram com o observado por Rossato et al. (2009), e

podem ser atribuídos à mobilização do solo, que mesmo reduzida, pode aumentar a superfície de contato do solo com os resíduos vegetais e pode incrementar a velocidade de decomposição dos mesmos pelos microrganismos, causando a liberação de ácidos orgânicos e a redução dos valores de pH do solo (SIDIRAS; PAVAN, 1985).

Figura 4. Atributos do solo afetados pela descompactação mecânica com e sem a associação com óxido de Ca e Mg após 18 meses da aplicação; pH (a); m (b); Sat. Ca (c); Sat. Mg (d) e V (e).

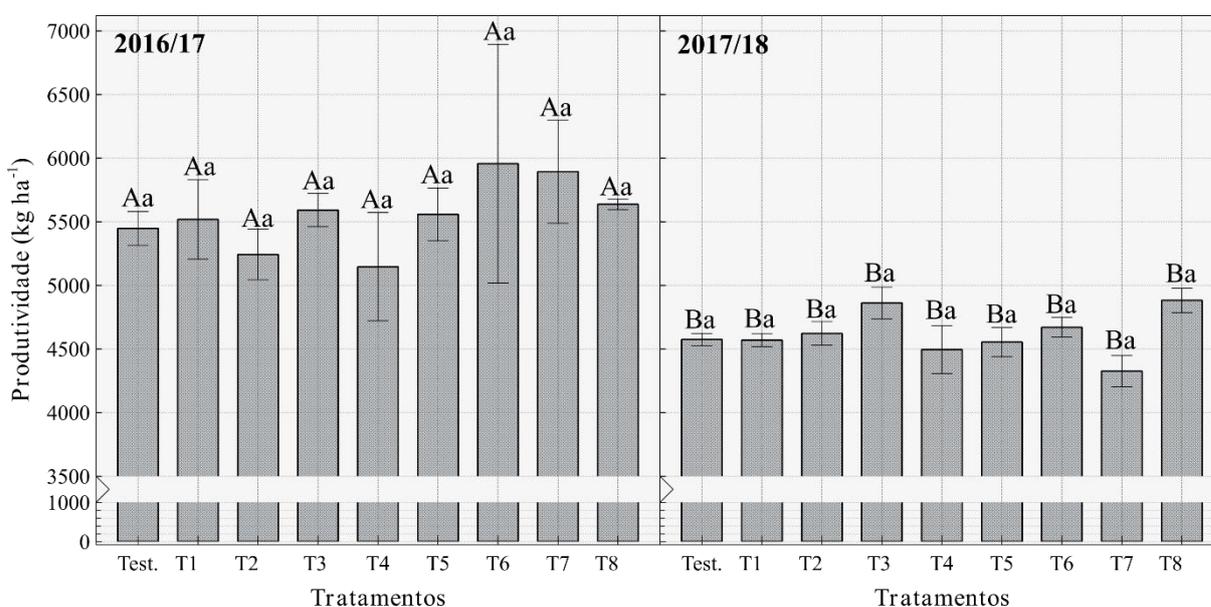


m – saturação por alumínio; Sat. Ca – saturação por cálcio; Sat. Mg – saturação por magnésio; V – saturação por bases; prof. - aplicação profunda; sup.- aplicação em superfície.

### 5.5.5 Produtividade da soja afetada pela aplicação dos tratamentos

A produtividade de soja, em ambas as safras avaliadas, não apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ). Este comportamento também foi observado por Purcell, Keisling e Sneller (2002), ao analisar a produtividade de soja em resposta a melhoria física do perfil do solo, e por Jones e Lutz (1971), em resposta à melhoria química do perfil do solo. Fidalski, Yagi e Tormena (2015), ao analisar a incorporação de calcário no solo, também não verificaram incrementos significativos das produtividades de milho, aveia-preta e soja.

Figura 5. Efeito dos tratamentos sobre a produtividade da soja nas duas safras avaliadas (2016/17 e 2017/18).



Letras maiúsculas comparam safras e letras minúsculas comparam tratamentos pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Entre as safras avaliadas, puderam ser observadas as maiores diferenças de produtividade, o que está atrelado à diferença de precipitação incidente entre as safras (Fig. 1).

A consequência das características químicas e físicas do perfil do solo para a produtividade agrícola baseia-se principalmente na restrição ao crescimento radicular e da absorção de água e nutrientes pelas culturas (FARINA; CHANNON, 1988). Neste estudo, o efeito da mitigação dessas limitações poderia ter sido observado se a cultura tivesse sido submetida ao estresse hídrico, como o observado por Hansel et al. (2017).

## 5.6 CONCLUSÕES

A escarificação e a subsolagem são estratégias eficientes de descompactação da subsuperfície do solo, no entanto, o uso destas estratégias sem a aplicação associada de corretivos pode causar a redução da qualidade química do perfil do solo, a qual foi caracterizada neste estudo pela redução do pH e pelo incremento da saturação por Al no solo.

Após 18 meses da aplicação dos tratamentos, a subsolagem com espaçamento de 35 cm associada à aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm foi eficiente para aumentar o pH, Ca e V, além de neutralizar a m até 1 m de profundidade.

O efeito dos tratamentos não resultou em incrementos de produtividade em ambas as safras avaliadas.

## 5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo Franco-Arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 519-531, 2004.

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES. E. F. Atributos químicos de um latossolo de cerrado sob plantio direto de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 29, n. 6, p. 923–934, 2005.

AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33. n. 4, p. 831–843, 2009.

ASABE-American Society of Agricultural and Biological Engineers. **Soil cone penetrometer: ASAE standard S313.3**. St. Joseph: ASABE, 2009.

BENGOUGH, A. G. et al. Root elongation. water stress. and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.

BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo e suas relações no desenvolvimento radicular e produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 581–588, 2004.

BOTTA, G. F. et al. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 1, p. 167–174, 2010.

BROCH, D. L. et al. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 3, p. 791–796, 2011.

BUSSCHER, W. J.; FREDERICK, J. R.; BAUER, P. J. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 3, p. 999, 2000.

CALONEGO, J. C. et al. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31–37, 2017.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Alterações nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho Eutroférico por dois sistemas de manejo do solo. **Acta Scientiarum**, v. 26, n. 4, p. 377-385, 2004.

COLUSSI, G.; DA SILVA, L. S.; MINATO, E. A. Escarificação e adubação orgânica: efeito na recuperação estrutural de solo produzindo Tifton 85. **Ciência Rural**, v. 44, n. 1, p. 1956-1961, 2014.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11ª.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2016.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 5, p. 1393–1403, 2013.

DALLA NORA, D. et al. Mitigation of the gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1–22, 2017.

DE VARGAS, J. P. R. et al. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 185, p. 47–60, 2019.

DERPSCH, R. et al. Current Status of Adoption of No-till Farming in the World and Some of its Main Benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1–25, 2010.

DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 51. n. 2. p. 159–168. 2016.

DUIKER, S. W.; BEEGLE, D. B. Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. **Soil and Tillage Research**, v. 88, n. 1–2, p. 30–41, 2006.

EMBRAPA. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa soja, 2007. p. 8. (Circular Técnica n. 48).

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5ª. ed. Brasília: Embrapa - CNPS; 2018.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P. Acid-subsoil amelioration. II gypsum effects on growth and subsoil chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p. 175-180, 1988.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A Comparison of Strategies for Ameliorating Subsoil Acidity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 646, 2010.

FIDALSKI, J.; YAGI, R.; TORMENA, C. A. Revolvimento ocasional e calagem em latossolo muito argiloso em sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1483–1489, 2015.

FRANKE, A. E. Necessidade de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 8, p. 1675-1683, 2000.

GONZALES-ERICO, E. et al. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an Oxisol of central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 43, n. 6, p. 1155-1158, 1979.

HANSEL, F. D. et al. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 6, p. 2936–2944, 2017.

HOBBS, P. R.; SAYRE, K.; GUPTA, R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 363, n. 1491, p. 543-555, 2008.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Relação entre atributos de solos e oxidação de enxofre elementar em quarenta e duas amostras de solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 455–463, 2007.

JONES, G. D.; LUTZ, J. A. Yield of Wheat and Soybeans and Oil and Protein Content of Soybean as Affected by Fertility Treatments and Deep Placement of Limestone<sup>1</sup>. **Agronomy Journal**, v. 63, n. 6, p. 931–934, 1971.

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, n. 2, p. 221–227, 2007.

KÖPPEN, W. P. **Das geographic system der climate**. In: W. Köppen and R. Geiger, editors, *Handbuch der Klimatologie*. C.G. Borntrager, Berlin. 1938. p. 1-44.

LEVIEN, R.; COGO, N. P.; ROCKENBACH, C. A. Erosão na cultura do milho em diferentes sistemas de cultivo anterior e métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 73-80, 1990.

LIU, Z. et al. Yield response of spring maize to inter-row subsoiling and soil water deficit in Northern China. **PLoS ONE**, v. 11, n. 4, 2016.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1980, 251p.

MANTOVANI, A. et al. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de

gesso e calcário. **Scientific Electronic Archives**, v. 10, n. 5, p. 35–43, 2017.

MORANDO, R. et al. Déficit hídrico: efeito sobre a cultura da soja. **Journal of Agronomic Sciences**. v. 3. n. especial. p. 114–129. 2014.

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem para uma rotação de culturas no Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 675-684, 1998.

PURCELL, L. C.; KEISLING, T. C.; SNELLER, C. H. Soybean yield and water extraction in response to deep tillage and high soil aluminum. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 19–20, p. 3723–3735, 2002.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009a.

REICHERT, J. M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 44, n. 3, p. 310–319, 2009b.

REINERT, D. J. et al. 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, 2008.

RITCHEY, K. D. et al. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, v. 72, n. 1, p. 40-44, 1980.

ROSSATO, O. B. et al. Correção da acidez do solo em subsuperfície de um Latossolo de textura franco-arenosa sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 659-667, 2009.

SCHICK, J. et al. Erosão hídrica em cambissolo húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 437–447, 2014.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M. A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, p. 249-254, 1985.

SORATTO, R. P; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em Sistema Plantio Direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 675-688, 2008.

TAYLOR, H. M; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, v. 102. p. 18- 22, 1966.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico n. 5).

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**, v. 22, p. 573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. p.58. (Circular Técnica 23).

## 6. ARTIGO II – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO DE UM LATOSSOLO COMO ATENUANTES DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO PARA A CULTURA DA SOJA NO SUL DO BRASIL

### 6.1 RESUMO

A adoção do Sistema Plantio Direto trouxe diversos benefícios ao sistema de produção agrícola, principalmente aqueles relacionados à redução das perdas de água e solo por erosão. No entanto, os Latossolos tropicais manejados sob SPD durante muitos anos, tendem a apresentar problemas físicos e químicos em subsuperfície, caracterizados pela elevada densidade, pela acidez e toxidez por alumínio. Estas condições afetam diretamente o crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas e, conseqüentemente, a sua produtividade. O objetivo deste estudo foi avaliar os parâmetros radiculares e a produtividade da soja em resposta à melhoria física e química do perfil do solo em situações de déficit hídrico. O experimento foi realizado em Dois Irmãos das Missões, Rio Grande do Sul, em duas safras agrícolas (2016/17 e 2017/18). O design experimental foi de blocos ao acaso com três repetições, onde Test. – testemunha, T1 – calcário ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) + gesso ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) em superfície, T2 – subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg ( $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) com espaçamento de 70 cm, e T3 – subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg ( $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) com espaçamento de 70 cm. O déficit hídrico foi simulado com a instalação de câmaras de restrição durante aproximadamente 30 dias que restringiam 100% da precipitação incidente. A amostragem de solo foi realizada nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m e os atributos químicos avaliados foram o pH, CTC, m, saturações por Ca e Mg e S. O atributo físico analisado foi a resistência mecânica à penetração do solo, a qual foi determinada a cada cm até 0,60 m de profundidade. As avaliações foram realizadas 6 e 18 meses após a aplicação dos tratamentos. A melhoria química do perfil do solo foi obtida pela subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm, verificada pelo aumento de pH e redução da m. A melhoria física e química associada incrementou o comprimento e o volume e melhorou a distribuição das raízes no solo. Com relação a produtividade da soja, na ausência do déficit hídrico, os tratamentos não apresentaram efeito significativo, no entanto, com a indução desse estresse, na segunda safra avaliada, as estratégias físicas e químicas de melhoria do perfil do solo foram eficientes para atenuar as perdas de produtividade.

**Palavras-chave:** Compactação do solo. Acidez da subsuperfície. Camada de enraizamento. Estresse hídrico. Sistema radicular da soja.

## ARTICLE II – STRATEGIES TO ROOTING LAYER IMPROVEMENT OF AN OXISOL AS MITIGATING EFFECTS OF WATER DEFICIT FOR SOYBEAN IN SOUTHERN BRAZIL

### 6.2 ABSTRACT

The adoption of no-tillage system brought any benefits to crop systems, however, mainly in tropical Oxisols, the compaction and acidity of the soil subsurface have become a recurring problem. These conditions directly affect the growth and development of the root system and the crop productivity. The aim of this study was to evaluate root parameters and soybean yield in response to the physical and chemical improvement of the soil rooting layer in water deficit situations. The experiment was conducted in Dois Irmãos das Missões in Rio Grande do Sul, in two distinct crop seasons (2016/17 and 2017/18). The experimental design was a randomized blocks with three replications, in which the Test. - control; T2 - limestone ( $3.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) + gypsum ( $3.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) applied in surface; T3 – subsoiling with 70 cm spacing + deep application of Ca and Mg oxide with 70 cm spacing; and T4 – subsoiling with 35 cm spacing + deep application of Ca and Mg oxide with 70 cm spacing. During approximately 30 days, chambers were installed in the blocks to restrict 100% of the incident precipitation. The soil sampling was realized in the layers of 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60 m and the chemical attributes evaluated were the pH, CEC, m (%), saturation of Ca and Mg and S contents and, the physical attribute of the soil evaluated was the mechanical resistance to penetration, that was determined at each cm of soil up to 0.60 m depth. All soil evaluations were performed 6 and 18 months after the application of the treatments. The improvement of the soil profile was obtained by the subsoiling with spacing of 35 cm+ deep application of  $1.2 \text{ Mg ha}^{-1}$  of Ca and Mg oxide with spacing of 70 cm. The chemical and physical improvement of the soil profile increased the length and volume and improved the distribution of roots in the soil profile. In relation to soybean seed yield, the treatments was not presented significant differences in each crop season, however, with the restriction of water, in the second crop season evaluated, the association of chemical and physical improvement was beneficial to mitigate the effects of the severe water stress.

**Keywords:** Soil compaction. Subsurface acidity. Soil rooting layer. Water stress. Soybean roots.

## 6.2 INTRODUÇÃO

Em torno de 100 milhões de hectares de solo são manejados sob Sistema Plantio Direto (SPD) ao redor do mundo (DERPSCH et al., 2010). A implantação deste sistema de manejo teve como objetivo principal reduzir as perdas de água e solo pela erosão causada pelas chuvas. No entanto, com o passar do tempo, diversas melhorias puderam ser observadas no solo, tais como o incremento da matéria orgânica do solo (MOS), a redução das enxurradas, a maior atividade biológica, dentre outras.

A ausência do revolvimento do solo aliada à aplicação superficial de insumos e ao tráfego intensivo de máquinas agrícolas causam mudanças na estrutura e na distribuição de nutrientes do solo (CAMARA; KLEIN, 2005). De acordo com Reichert et al. (2009a), solos manejados sob SPD de longa duração apresentam uma camada de aproximadamente 7 a 15-20 cm, caracterizada popularmente como pé-de-arado ou pé-de-grade, a qual apresenta elevada densidade, baixa porosidade e elevado valor de RP.

Aliada à compactação, Amado et al. (2009) reportam a presença de um gradiente químico nesses solos, caracterizado pela elevada concentração de nutrientes, elevados valores de pH e reduzida m da superfície, contrastando com a subsuperfície ácida, pobre em nutrientes e com elevada toxidez por Al. Estas limitações do subsolo afetam diretamente o crescimento, desenvolvimento e distribuição das raízes no solo.

Estas condições do subsolo, físicas ou químicas, podem afetar diretamente o crescimento, desenvolvimento e distribuição do sistema radicular das culturas no solo (NUNES et al., 2015b), pois estão associadas com a temperatura e aeração do solo (LICHT; AL-KAISI, 2005), à disponibilidade de água (BENGOUGH et al., 2011), à presença ou ausência de minerais (toxicidade ou deficiência) (HANSEL et al., 2017) e à resistência mecânica do solo ao aprofundamento do sistema radicular das plantas (DONG et al., 2017).

De acordo com Hamza e Anderson (2005) e Taylor e Gardner (1963), valores de RP superiores a 2,0 Mpa correspondem a condições de solo limitantes para o crescimento de raízes e desenvolvimento de plantas. Vepraskas e Miner (1986) relatam que valores de RP entre 2,8 e 3,2 MPa são suficientes afetar o crescimento das raízes, enquanto que a partir de 4,0 MPa, o crescimento é paralisado totalmente.

A presença de elevadas quantidades de  $Al^{+3}$  no solo afeta severamente o crescimento das raízes, levando-as a degeneração, mudança de coloração e a redução do número de pêlos radiculares (DELHAIZA; RYAN, 1995; PAVAN et al., 1982). A baixa disponibilidade de  $Ca^{+2}$  reduz a taxa de alongação radicular e, de acordo com Quaggio (2000), quando a saturação por

Ca do complexo de troca é inferior a 20%, há forte limitação ao crescimento radicular da maioria das espécies cultivadas.

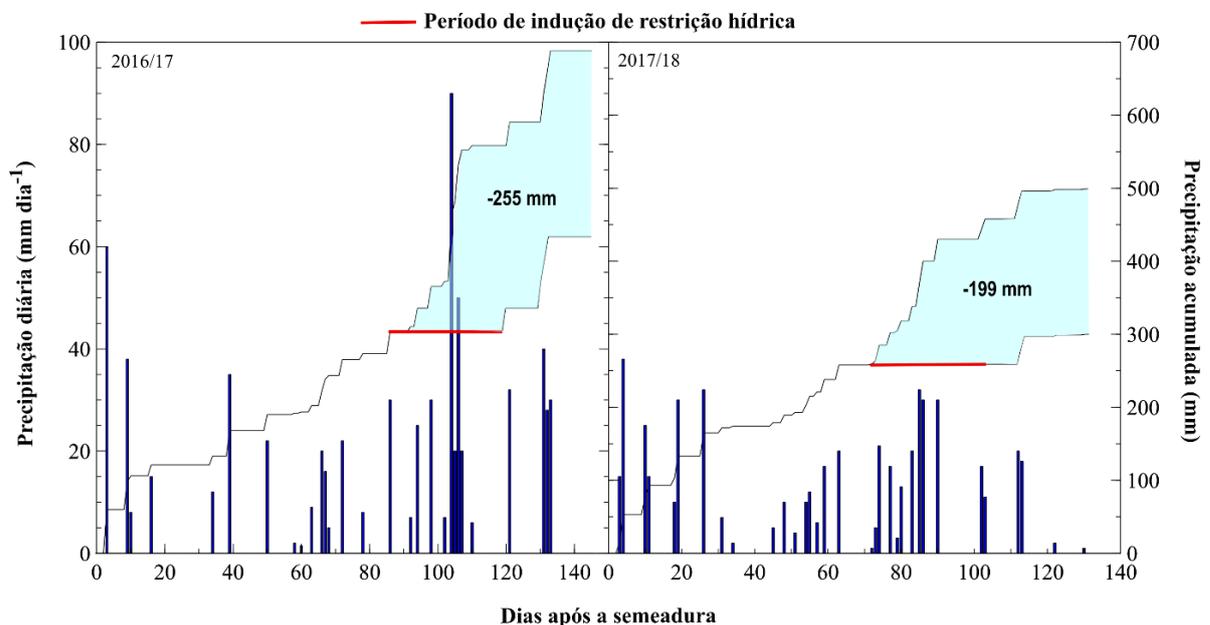
A soma dos efeitos deletérios da compactação e da toxidez por alumínio da subsuperfície do solo representam limitações físicas e químicas ao aprofundamento do sistema radicular das plantas (NUNES et al., 2015b; DALLA NORA et al., 2017). Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar parâmetros radiculares e produtivos da soja em função da melhoria física e química do perfil do solo em situações de déficit hídrico.

## 6.3 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.3.1 Caracterização da área e design experimental

O experimento foi implantado em outubro de 2016 em um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura muito argilosa (EMBRAPA, 2018) no município de Dois Irmãos das Missões, sul do Brasil (27°67'S 53°56'O e 525 m de altitude). O clima da região é classificado como Cfa (KÖPPEN, 1938) e a média de temperatura local é de 19,2°C. A área experimental foi situada numa lavoura comercial manejada sob SPD por aproximadamente 20 anos. No verão, a área era manejada com a cultura da soja (*Glycine max* L.) cultivar NA 5909 (Nidera, Brasil), e no inverno era mantida com o uso de plantas de cobertura (*Raphanus sativus*, *Lolium multiflorum*, e *Avena strigosa*) oriundas da ressemeadura natural.

Figura 1. Precipitação diária e acumulada durante o ciclo da soja nas safras de 2016/17 e 2017/18 com indicação do período de indução da restrição hídrica.



Fonte: o autor.

Os atributos químicos e a resistência à penetração do solo anteriormente à aplicação dos tratamentos estão descritos na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química e física da área experimental anteriormente à aplicação dos tratamentos.

Prof.	pH	H+Al	Al	CTC	M.O.	Sat. Ca	Sat. Mg	V	m	S	P	RP
cm	H <sub>2</sub> O	-- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> --				----- % -----				- mg dm <sup>3</sup> -		KPa
<b>0-10</b>	5,2	5,1	0,2	11,7	3,8	40,8	10,6	56,1	3,6	10,9	14,1	1123
<b>10-20</b>	5,1	5,6	0,5	10,3	2,7	33,7	8,9	45,5	9,8	16,9	3,7	2974
<b>20-40</b>	5,2	5,3	0,5	9,2	2,4	31,1	9,6	43,0	12,1	13,6	2,0	2364
<b>40-60</b>	5,1	5,6	0,7	8,9	1,9	27,0	9,0	37,1	17,9	16,0	1,6	1763

Prof. – Profundidade; H+Al – Acidez potencial; Al – Alumínio; CTC – Capacidade de troca de cátions; M.O. – Matéria orgânica; Sat. Ca – saturação por cálcio; Sat. Mg – saturação por magnésio; V – Saturação por bases; m – saturação por Al; S – Enxofre; P – Fósforo; RP – Resistência à penetração do solo.

O design experimental era de blocos ao acaso com três repetições, nos quais os tratamentos eram: Test. – testemunha, T1 – calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície, T2 – subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm, e T3 – subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm. O calcário utilizado possuía PRNT de 71%, 25% de Ca e 10% de Mg, o gesso agrícola possuía 15% de Ca e 11% de S e o óxido de Ca e Mg possuía PRNT de 183%, 60% de Ca e 30% de Mg. O implemento subsolador possuía uma caixa armazenadora acoplada e um sistema de aplicação, por meio da gravidade, com aberturas localizadas nas hastes (nas profundidade de 10, 30 e 50 cm) que permitiu realizar a aplicação profunda de óxido de Ca e Mg no solo.

### 6.3.2 Indução do estresse hídrico

No início do florescimento da soja (estágio R1), foram instaladas câmaras de restrição hídrica (três câmaras por tratamento) com 12 m<sup>2</sup> (3 x 4 m) que excluíram 100% da precipitação incidente na cultura por aproximadamente 30 dias. As câmaras foram construídas com uma estrutura de madeira e cobertas com plástico polietileno de 0,1 mm de espessura. Para evitar a entrada de água no interior das câmaras por percolação lateral, foram feitos drenos ao redor das mesmas (adaptado de Hansel et al., 2017).

### 6.3.3 Coleta de solo e análise

A coleta de solo foi realizada com a abertura de trincheiras no solo de 0,3 x 0,3 x 1 m com o uso de um perfurador de solo antes da aplicação dos tratamentos para caracterização da

área e 6 e 18 meses após a implantação do experimento. A coleta foi feita de forma estratificada nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Nas amostras coletadas, foram determinados o pH em H<sub>2</sub>O, a CTC à pH 7, as saturações por Ca e Mg, a V e a m. A análise química foi realizada na CCGL-Tec em Cruz Alta e seguiu metodologia proposta por Tedesco et al. (1995).

#### **6.3.4 Avaliação da resistência à penetração do solo**

A avaliação da resistência mecânica à penetração do solo (RP) foi realizada nos mesmos dias da coleta de solo para análise química através do uso de um penetrômetro automático (SoloTrack - PLG5300) da marca Falker. As leituras foram feitas a partir da inserção de uma haste no solo com velocidade de 0,024 m s<sup>-1</sup>. A célula possuía ponteira do tipo cone 2 com diâmetro de 12,83 mm e possuía ângulo de 30° (ASABE, 2009). O equipamento foi configurado para realizar leituras a cada cm até 60 cm de profundidade. Foram realizadas 20 repetições por tratamento na forma de transecto. Amostras de solo foram coletadas e secas em estufa com circulação forçada à 65°C até peso constante para determinação da umidade do solo no momento da avaliação da RP. A umidade do solo na primeira e na segunda avaliação era de 0,25 g g<sup>-1</sup> e 0,23 g g<sup>-1</sup>, respectivamente.

#### **6.3.5 Coleta e análise de raízes**

A coleta de raízes foi realizada através da metodologia da placa de pregos (adaptada de Bohm, 1979 e Hansel et al., 2017) no pleno florescimento da soja da safra 2017/18. As placas eram feitas de madeira e possuíam pregos espaçados de 5 em 5 cm para facilitar a fixação da placa no solo. Uma malha de alumínio foi colocada na base da placa para facilitar o processo de lavagem e reduzir as perdas de raízes.

Para a retirada das raízes do solo, foram abertas trincheiras de 80 cm de comprimento, 40 cm de profundidade e 50 cm de largura com o auxílio de um perfurador de solo. A fixação da placa no solo foi feita com o uso de um macaco hidráulico que exercia pressão contra o solo de forma perpendicular. Cada monolito coletado possuía dimensões de 30 cm de altura, 40 cm de largura e 10 cm de profundidade. Foram coletadas 3 raízes de forma aleatória por tratamento, totalizando 12 raízes. Após a extração do monolito do campo, o mesmo foi embalado com várias camadas de papel filme para evitar possíveis perdas e impactos durante o transporte.

O procedimento de lavagem das raízes iniciou com a imersão das placas por 4 horas em solução de NaOH à 5% para facilitar a dispersão da argila do solo e reduzir as perdas das raízes que ficavam entrelaçadas aos agregados durante a lavagem. As raízes foram lavadas com água

levemente corrente e secas ao ar.

No laboratório, as raízes foram secas em estufa e pesadas. Posteriormente, foram cortadas nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m e escaneadas para a obtenção de imagens com o uso de um scanner Epson Expression 12000XL (Epson America Inc., Long Beach, CA, United States). As imagens foram geradas com a resolução de 600 dpi e foram analisadas pelo software WinRhizo (Regent Instruments Canada Inc. Ville de Québec, QC, Canadá), nas quais foram determinados o comprimento e o volume totais e o comprimento e volume por classes de diâmetro (<0,2, 0,2-0,8 e >0,8 mm).

### **6.3.6 Determinação da produtividade da soja**

A determinação da produtividade da soja na safra 2016/17 foi realizada através da colheita manual de 3 repetições de 4 metros lineares de soja, totalizando 6 m<sup>2</sup> em cada parcela. Na segunda safra avaliada, foram coletadas 5 repetições de 10 metros lineares, totalizando 25 m<sup>2</sup>. O CV entre as amostras coletadas foi reduzido de 10,6% para 7,3%, em virtude do aumento no número de repetições. Dentro das câmaras de exclusão hídrica, a coleta foi realizada com a colheita de 3 repetições de 1 metro linear, excluindo 0,5 m em cada borda. A umidade dos grãos foi determinada em cada repetição e a produtividade foi corrigida para a umidade de 13%.

### **6.3.7 Análise estatística**

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e tiveram suas médias comparadas pelo teste de Tukey à 5% de significância utilizando o software R (R CORE TEAM, 2018). Os parâmetros radiculares foram correlacionados com a produtividade e com os atributos físicos e químicos do solo por meio da regressão múltipla através do método “stepwise”.

## **6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

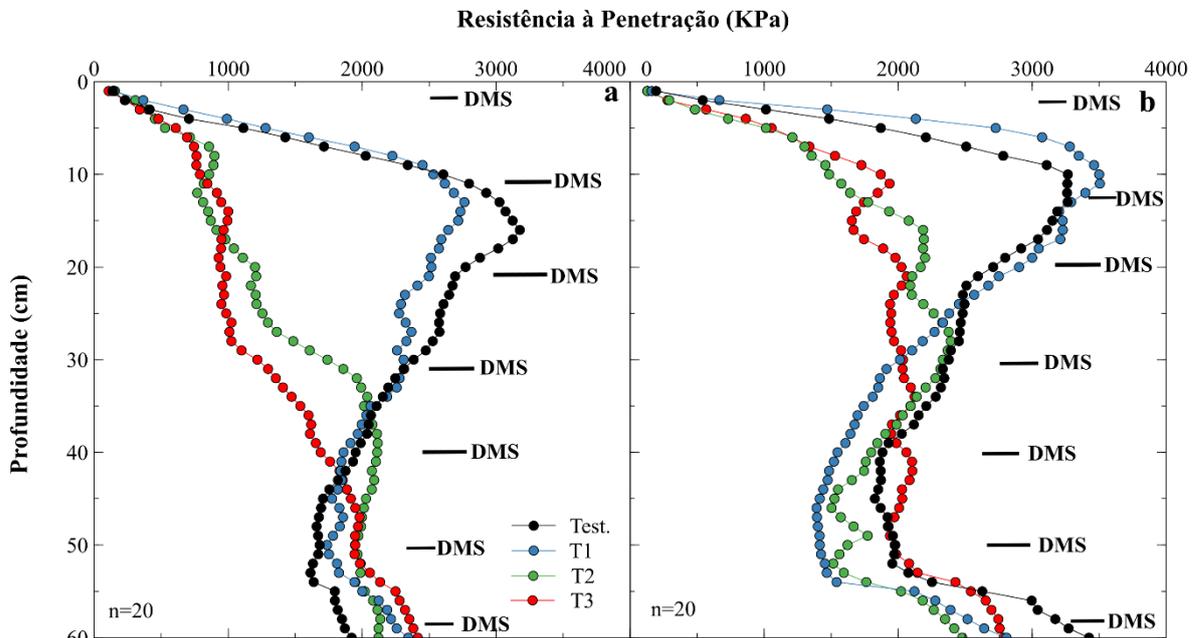
### **6.4.1 Resistência mecânica à penetração do solo**

Os tratamentos que receberam correção física do solo (T2 e T3) apresentaram valores de RP inferior aos tratamentos que não receberam (Test. e T1) em ambas as avaliações (6 e 18 meses após a aplicação dos tratamentos), principalmente na camada de 10 à 35 cm. Botta et al. (2010) e Liu et al. (2016) também reportaram esse resultado utilizando diferentes profundidades de descompactação do solo.

As culturas podem ser beneficiadas com a atenuação da compactação do solo, como observado por Busscher, Frederick e Bauer (2000), pois elevados valores de RP reduzem as

taxas de alongação das raízes (BENGOUGH et al., 2011) e limita o crescimento, desenvolvimento e distribuição das raízes em porções do solo com menor restrição física, as quais geralmente se situam na superfície do solo.

Figura 2. Diferença mínima significativa (DMS) para os resultados de resistência à penetração do solo: a) 6 meses após e b) 18 meses após a aplicação dos tratamentos.



Test. – testemunha, T1 – calcário ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) + gesso ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) em superfície, T2 – subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg ( $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) com espaçamento de 70 cm, e T3 – subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg ( $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) com espaçamento de 70 cm; n – número de leituras por tratamento.

No entanto, é possível verificar que o efeito da descompactação mecânica vai sendo atenuado com o passar do tempo (Fig. 3), permitindo inferir que o solo tende a retornar ao seu estado original a médio ou longo prazo, pois a umidade do solo no momento das leituras é semelhante ( $0,25 \text{ g g}^{-1}$  e  $0,23 \text{ g g}^{-1}$ , respectivamente).

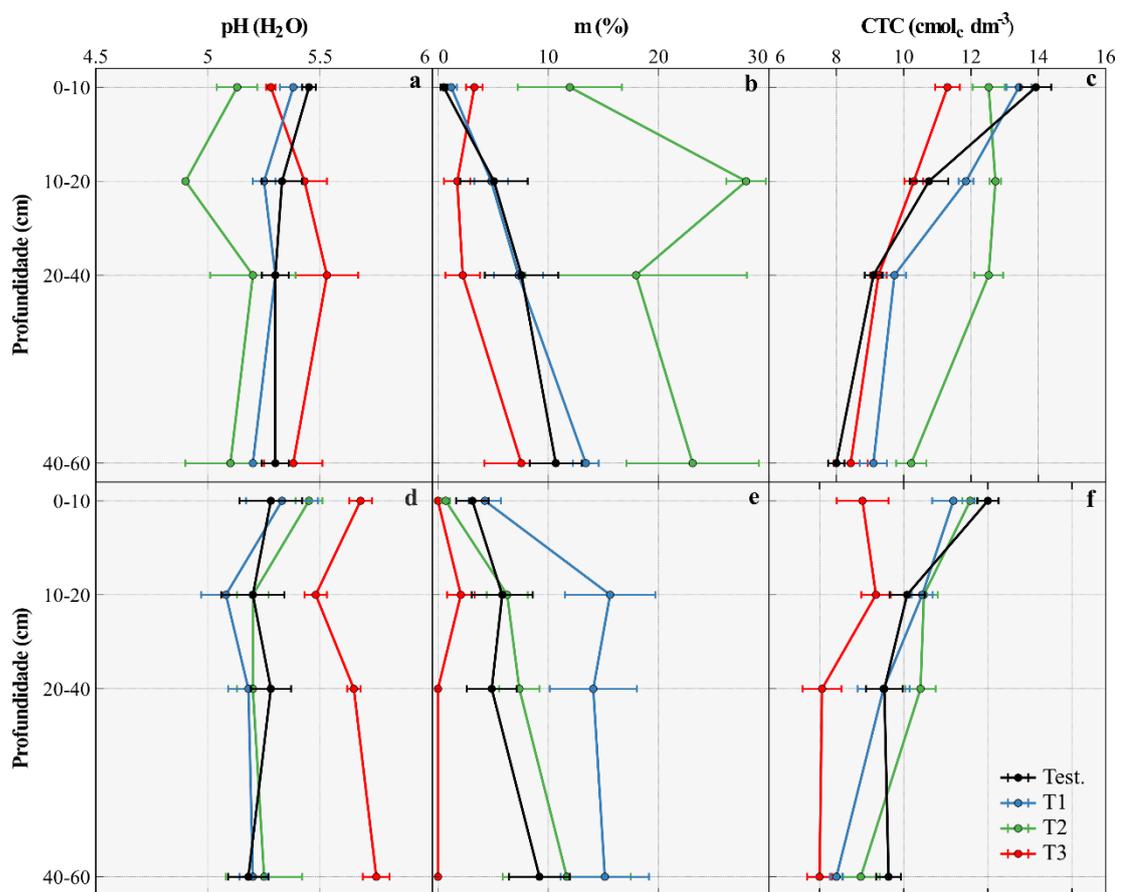
Resultados similares foram observados em um Latossolo por Busscher, Frederick e Bauer (2000), os quais denotam o elevado risco de recompactação do solo após uma intervenção mecânica em situações de precipitação abundante. Drescher et al. (2016) e Reichert et al. (2009b) também reportam esse comportamento temporal da escarificação sobre a estrutura do solo, o qual pode ter efeito com duração inferior a um ano ou até mesmo uma safra. O uso de plantas de cobertura é uma estratégia eficaz para prolongar a duração dos efeitos da intervenção mecânica, como observado por Fin et al. (2018).

#### 6.4.2 Atributos químicos do solo

De acordo com a tabela 1, é possível identificar a depleção da disponibilidade de Ca e

Mg no solo associada ao incremento da saturação por Al (m) com o avanço da profundidade do solo. Os valores de pH e a saturação por bases (V) estão abaixo e a m está acima dos limites críticos propostos pela CQFS-RS/SC (2016). Os Latossolos tropicais tipicamente apresentam redução da qualidade química com o avanço da profundidade, criando um gradiente químico entre a superfície e a subsuperfície do solo (AMADO et al., 2009). Estas condições reportam a importância da aplicação de corretivos mais solúveis e com maior mobilidade no perfil do solo, pois condições químicas limitantes afetam negativamente o aprofundamento do sistema radicular das plantas.

Figura 3. Efeito dos tratamentos sobre o pH, m e CTC após 6 meses (a, b, c) e após 18 meses (d, e, f) da aplicação dos tratamentos.



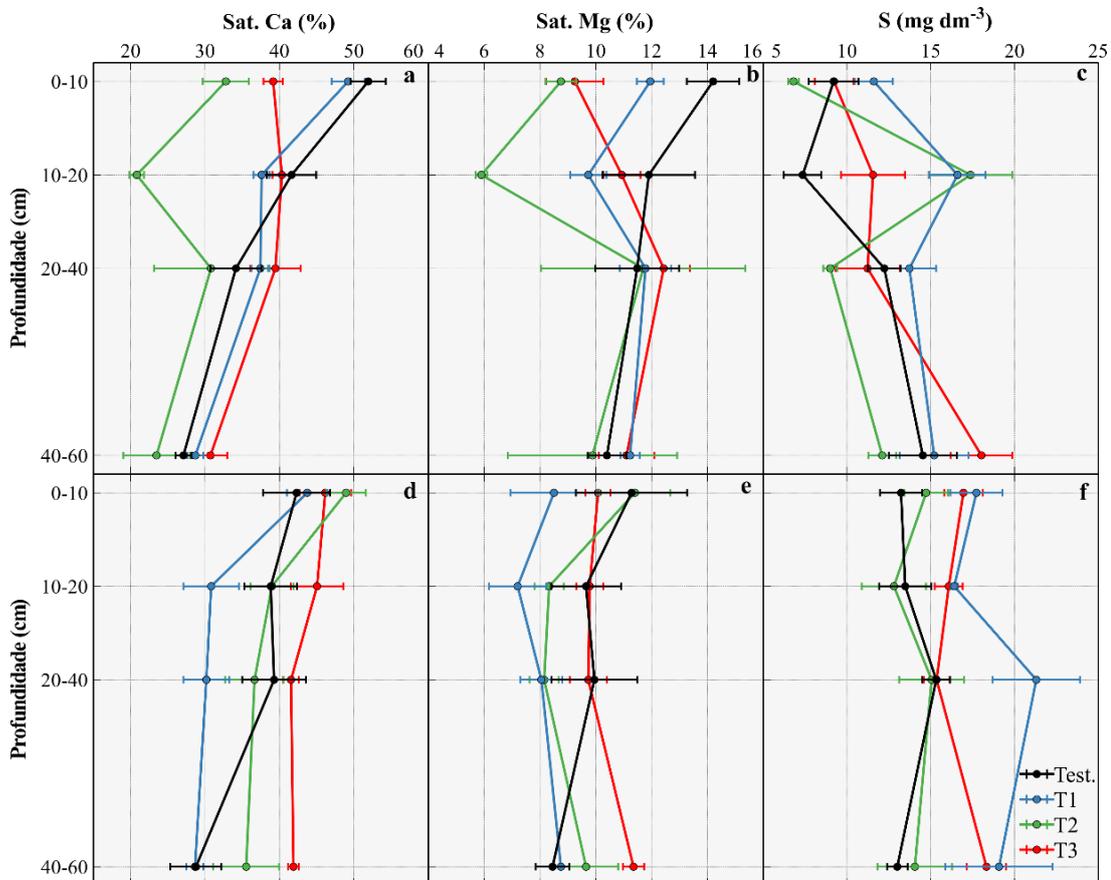
Test. – testemunha, T1 – calcário ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) + gesso ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) em superfície, T2 – subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg ( $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) com espaçamento de 70 cm, e T3 – subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg ( $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) com espaçamento de 70 cm; m – saturação por alumínio; CTC – capacidade de troca de cátions.

Em ambos os períodos de avaliação, é possível verificar que o T3 incrementou os valores de pH (Fig. 4a) a valores acima de 5,5 (como recomendado pela CQFS-RS/SC). A saturação por Al também foi reduzida nesse tratamento em todas as camadas amostradas (Fig.

4b), atingindo 0% na camada de 40-60 cm após 18 meses da aplicação.

O uso de óxido de Ca e Mg como ferramenta para incrementar os valores de pH e reduzir a m do solo também foi observado por Lima et al. (2017) e pode ser definido como uma alternativa eficiente para melhoria química do perfil do solo, principalmente quando aplicada em profundidade (RICHARDS et al., 1995). Ernani, Ribeiro e Bayer (2005) também reportam a eficiência da incorporação de corretivos no solo para melhoria química do ambiente de exploração radicular. No entanto, quando realizada a aplicação profunda deste corretivo associada a descompactação (ambas com espaçamento de 70 cm) (T2), estes resultados não foram observados.

Figura 4. Efeito dos tratamentos sobre a saturação de Ca e Mg e teor de S: 6 meses após a aplicação (a, b, c) e 18 meses após a aplicação dos tratamentos (d, e, f).



Test. – testemunha, T1 – calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície, T2 – subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm, e T3 – subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm; Sat. Ca – saturação por cálcio; Sat. Mg – saturação por magnésio; S – enxofre.

O incremento dos valores de pH e redução da m observados no T3, principalmente após 18 meses da aplicação dos tratamentos, podem ser atribuídos ao efeito da dissolução do óxido

de Ca e Mg no solo, a qual pode ter sido facilitada devido às elevadas precipitações incidentes (Fig. 1) e ao aumento da capacidade de infiltração de água no solo em função da descompactação intensa desse tratamento (Fig. 3) (CALONEGO et al., 2017).

Com relação à CTC a pH 7 (Fig. 4c), é possível observar que, após 6 meses da aplicação, o T2 apresentou os maiores valores para este atributo na camada de 20-60 cm. Esse comportamento pode ser explicado pelo incremento da m observado nesse tratamento na mesma camada.

Os tratamentos aplicados não incrementaram a saturação por Ca e Mg da camada de enraizamento do solo. Esses resultados corroboram com o observado por De Vargas et al. (2019) e Duiker e Beegle (2006) ao avaliar os efeitos da incorporação de um corretivo no solo, e contrastam de Dalla Nora et al. (2017), os quais relatam a eficiência da aplicação combinada de calcário e gesso em superfície para incrementar esses nutrientes no solo.

A aplicação superficial combinada de calcário e gesso no solo, incrementou o teor de S do solo, principalmente após 18 meses da aplicação (Fig. 5f). Esse resultado também foi observado por Dalla Nora et al. (2017) e Caires et al. (2003), até 30 meses após a aplicação combinada de calcário e gesso.

#### **6.4.3 Comprimento, volume e distribuição das raízes na camada de enraizamento do solo**

Ao comparar as camadas analisadas (Fig. 5), percebe-se que o comprimento e o volume totais de raízes são expressivamente menores na camada na camada de 15-30 cm. Este comportamento pode ser atribuído à maior concentração de nutrientes, menores valores de m, maiores valores de pH e menores valores de RP na camada superficial do solo, o que é evidenciado pela testemunha (Test.) deste estudo.

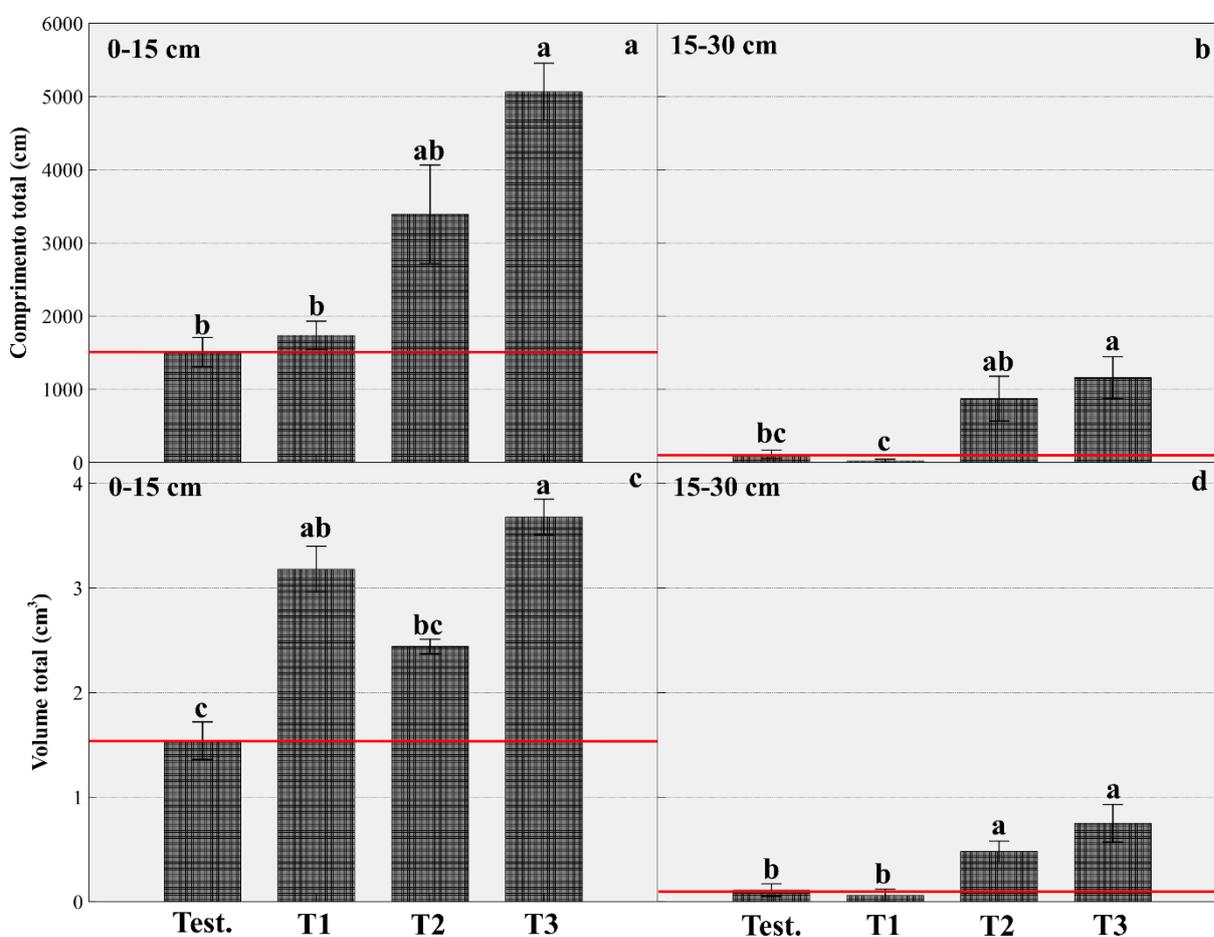
No entanto, ao utilizar estratégias de manejo para mitigar as limitações da subsuperfície, é possível observar que o T1, T2 e o T3 apresentaram mudanças no comportamento dos parâmetros radiculares avaliados, comprimento, volume e distribuição de raízes no perfil do solo (Fig. 5 e Fig. 6).

Na figura 5 é possível observar que os tratamentos que receberam correção física e química associadas (T2 e T3) apresentaram maior comprimento e volume totais de raízes, tanto na camada superficial, quanto na subsuperficial. O efeito da melhoria química e física da camada de enraizamento sobre o comprimento e volume do sistema radicular também foi observado por Bortoluzzi et al. (2014) e Hansel et al. (2017).

A aplicação combinada de calcário e gesso na superfície do solo (T1) incrementou o volume total de raízes na camada de 0-15 cm (Fig. 5c), mostrando que a aplicação desta

combinação possibilitou o crescimento e desenvolvimento de raízes de maior diâmetro nesta camada. O incremento de raízes nesta camada em função da aplicação associada de calcário e gesso no solo também foi reportado por Caires, Feldhaus e Blum, (2001).

Figura 5. Comprimento total (a) e volume total (b) do sistema radicular da soja afetados pelos tratamentos.



Test. – testemunha, T1 – calcário ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) + gesso ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) em superfície, T2 – subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg ( $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) com espaçamento de 70 cm, e T3 – subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg ( $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) com espaçamento de 70 cm.

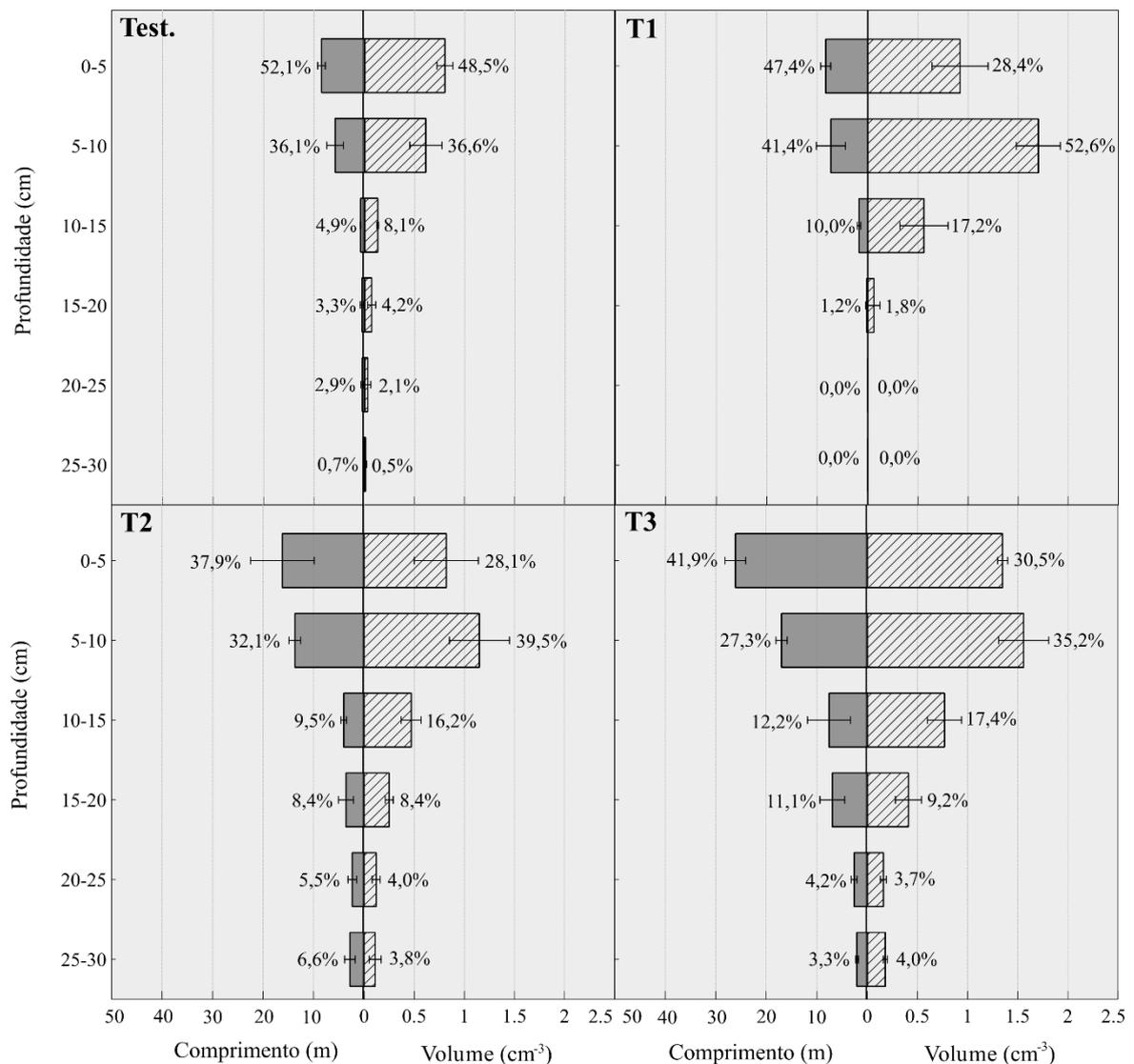
Ao analisar a distribuição das raízes no perfil do solo, é possível observar, na figura 6, que aproximadamente 90% das raízes da testemunha e T1 estão concentradas na camada de 0-10 cm, comprovando a existência de limitações físicas e/ou químicas nas camadas subsuperficiais do solo ao aprofundamento do sistema radicular. Li et al. (2017) também reportam o acúmulo de raízes na superfície do solo (0-10 cm) quando não é utilizada nenhuma estratégia de manejo para mitigar as limitações físicas e/ou químicas da subsuperfície.

Ao combinar estratégias de manejo físico e químico (T2 e T3), observa-se o aumento

do comprimento e do volume de raízes abaixo dos 10 cm de profundidade. A distribuição de raízes no perfil também foi mais homogênea nesses tratamentos, evidenciando que nos mesmos as limitações químicas (pH e m) e física (RP) ao aprofundamento radicular foram minimizadas.

Observa-se também que a aplicação combinada de calcário e gesso em superfície incrementou o volume de raízes na camada de 10-15 cm em relação a testemunha, no entanto, devido ao impedimento físico, abaixo dos 20 cm, o comprimento e o volume de raízes foi praticamente insignificante.

Figura 6. Efeito dos tratamentos sobre o comprimento, volume e distribuição das raízes na camada de enraizamento do solo.



Test. – testemunha, T1 – calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície, T2 – subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm, e T3 – subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm.

Na tabela 2, é possível observar que as maiores correlações foram encontradas entre os parâmetros radiculares, a saturação por cálcio e a saturação por bases no solo. Esses assemelham ao observado por Caires et al. (2008), Silva, Reinert e Reichert (2000) e Noble, Fey e Sumner (1988).

Também é possível verificar na tabela 2 a influência significativa da RP do solo sobre o comprimento e o volume de raízes. Esse resultado explica o fato do T2 ter apresentado mudanças na distribuição do sistema radicular no perfil do solo (Fig. 6), mesmo não tendo apresentado melhorias químicas evidentes (Fig. 4 e Fig. 5). Estes resultados corroboram com o observado por Leonel et al. (2007), Bengough et al. (2011 e 2006) e Guan et al. (2014), os quais reportam a influência negativa da compactação do solo sobre o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das culturas. De acordo com Vepraskas e Miner (1986), valores de RP entre 2,8 e 3,2 MPa são suficientes para o retardamento das raízes, enquanto que a partir de 4,0 MPa, o crescimento é paralisado.

Tabela 2. Coeficientes normalizados de regressão múltipla através do método “stepwise” entre os parâmetros radiculares, a produtividade e os atributos do solo.

<b>Parâmetros Radiculares</b>	<b>Intercepto</b>	<b>RP</b>	<b>pH</b>	<b>CTC</b>	<b>S</b>	<b>Sat. Ca</b>	<b>Sat. Mg</b>	<b>m</b>	<b>V</b>	<b>Prod.</b>
<b>Comprimento total (m)</b>	1156,2	-455,8	350,6	-505,2	-290,1	1932,4	-	599,2	-1817,2	-
<b>0&lt;C.&lt;0,2</b>	818,3	-331,5	312,5	-336,5	-226,8	1632,9	-	475,3	-1524,4	-
<b>0,2&lt;C.&lt;0,8</b>	274,8	-91,05	102,8	-88,74	-47,36	673,24	-	-143,6	-655,9	16,35
<b>C.&gt;0,8</b>	62,4	-10,3	20,3	-	-	70,8	-7,3	12,7	-66,9	-
<b>Volume total (cm<sup>3</sup>)</b>	1,0	-	0,6	-	-0,2	1,1	-	0,4	-1,4	0,3
<b>0&lt;Vol.&lt;0,2</b>	0,1	-0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,2	-	0,1	-	-
<b>0,2&lt;Vol.&lt;0,8</b>	0,3	-0,1	0,1	-0,1	-0,1	1,0	-0,1	0,2	-0,1	0,1
<b>Vol.&gt;0,8</b>	4,8	-0,9	3,7	1,0	-	-1,2	-	1,6	-	-

RP – Resistência à penetração; m – Saturação por alumínio; CTC – Capacidade de troca de cátions; S – Enxofre; Sat. Ca – Saturação por cálcio; Sat. Mg – Saturação por magnésio; V – Saturação por bases; Prod. - Produtividade; C. – Comprimento; Vol. – Volume.

A saturação por alumínio (m) também apresentou correlações significativas com os parâmetros radiculares, principalmente com o comprimento e volume de raízes de menor diâmetro, corroborando com o observado por Adams (1981). De acordo com Tang et al. (2002), a m é a principal limitação química para o crescimento radicular principalmente em situações

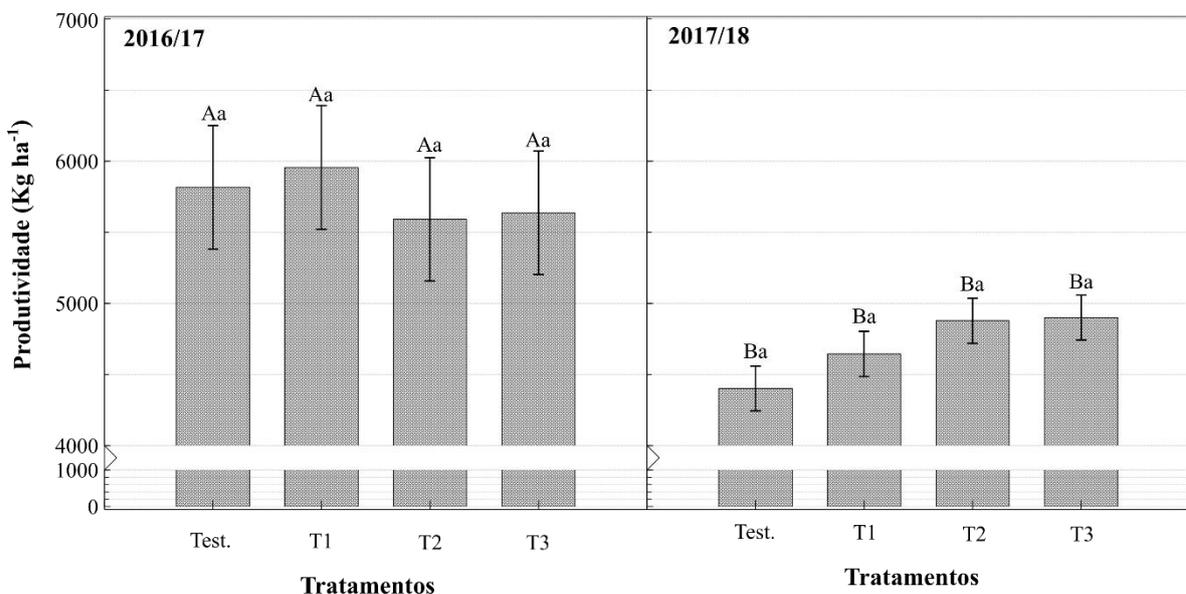
de déficit hídrico, pois causa deformações e até paralisação do crescimento e desenvolvimento radicular (SINGH et al., 2017). Esse resultado permite inferir que em solos compactados e/ou com elevada m, as raízes de menor diâmetro são as mais afetadas, confirmando o reportado por Ramos et al. (2010).

#### 6.4.4 Produtividade da soja

Em ambas as safras avaliadas, não foi observada diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre a produtividade dos tratamentos (Fig. 7). Estes resultados corroboram com o reportado por Jones e Lutz (1971), os quais não reportam efeito significativo da subsolagem sobre a produtividade da soja. Caires et al. (2003) também não reportaram incrementos de produtividade da soja com a incorporação de calcário ou com a aplicação de calcário e gesso em superfície em um Latossolo argiloso. Fidalski, Yagi e Tormena (2015) também não reportaram incrementos de produtividade de milho, aveia-preta e soja com a incorporação de calcário no solo.

No entanto, ao comparar as safras avaliadas, percebe-se diferença entre elas, a qual pode ser atribuída à precipitação incidente (Fig. 2), qual foi distinta entre as safras analisadas. Caires et al. (1999, 2003 e 2006) e Maschietto (2009) destacam que, em anos de precipitação abundante e com distribuição regular, a resposta a aplicação de gesso no solo não é observada.

Figura 7. Efeito dos tratamentos na produtividade da soja na primeira (2016/17) e na segunda safra (2017/18).

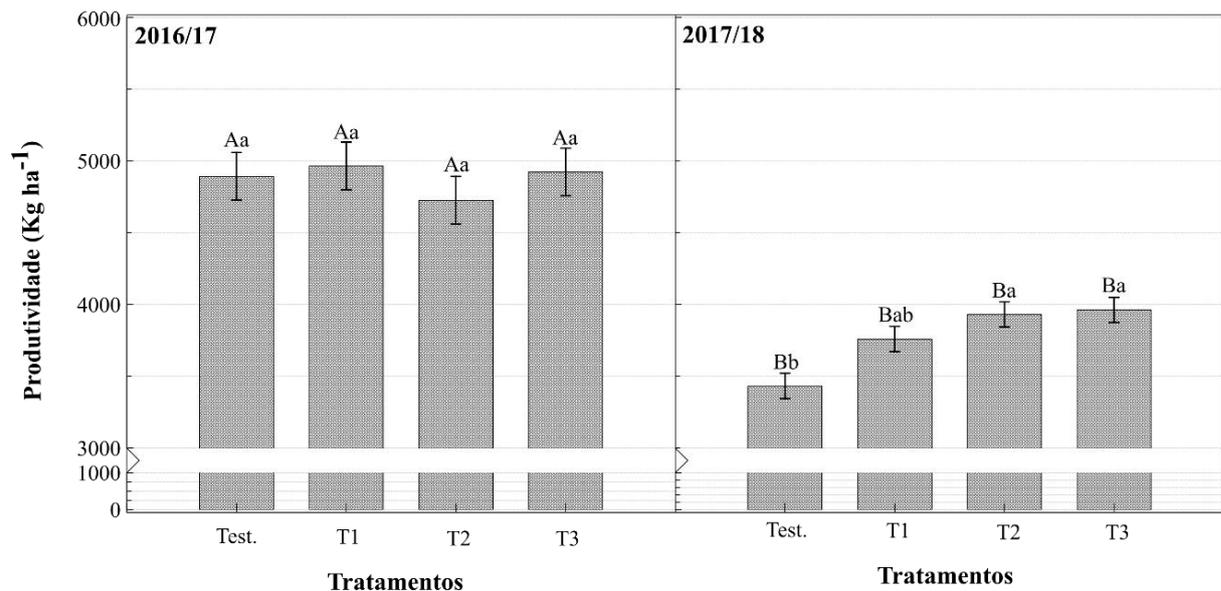


Test. – testemunha, T1 – calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície, T2 – subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm, e T3 – subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm. Letras maiúsculas comparam safras e letras minúsculas comparam tratamentos em cada safra.

No entanto, ao observar as produtividades dos tratamentos submetidos à indução da restrição hídrica (Fig. 8), observa-se que na primeira safra de soja após a aplicação dos tratamentos (2016/17), não houve diferença significativa entre a produtividade dos tratamentos. No entanto, na segunda safra analisada (2017/18), foi possível identificar a atenuação do efeito do estresse hídrico nos tratamentos que receberam estratégias de melhoria química (T1) e de melhoria química e física associadas (T2 e T3).

É possível concluir que o uso associado de estratégias físicas e químicas de melhoria da camada de enraizamento do solo (T2 e T3) podem ser eficientes para aliviar as perdas resultantes do déficit hídrico severo, no entanto, verifica-se nesse caso que a aplicação associada de calcário e gesso também atuou nesse sentido, no entanto, com menor expressão. O efeito da aplicação de gesso e calcário corrobora com o observado por Zandoná et al. (2015). Além disso, Souza et al. (2005) relatam que é possível obter incrementos de produtividade da soja com a aplicação de gesso agrícola quando ocorre estresse hídrico no período mais crítico para a cultura, a floração.

Figura 8. Efeito dos tratamentos na produtividade da soja com indução da restrição hídrica na primeira (2016/17) e na segunda safra (2017/18).



Test. – testemunha, T1 – calcário (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) + gesso (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) em superfície, T2 – subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm, e T3 – subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha<sup>-1</sup>) com espaçamento de 70 cm. Letras maiúsculas comparam safras e letras minúsculas comparam tratamentos em cada safra.

## 6.5 CONCLUSÕES

Os efeitos benéficos da associação de métodos físicos e químicos de melhoria do perfil do solo foram observados apenas com a subsolagem na linha e na entrelinha associada à aplicação profunda de óxido de Ca e Mg após 18 meses da aplicação. Os atributos mais afetados foram a RP, o pH e a m.

A subsolagem associada à aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (T2 e T3) incrementou o comprimento e volume de raízes em superfície e em subsuperfície, bem como melhorou a distribuição destas raízes no perfil do solo.

Os atributos do solo que mais afetaram o comprimento e o volume de raízes foram: a saturação por cálcio, a RP, a m e a V.

A produtividade da soja não foi afetada significativamente pelos tratamentos, no entanto, com a indução do estresse hídrico severo, a subsolagem associada à aplicação profunda de óxido de Ca e Mg atenuou as perdas de produtividade da soja.

## 6.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, F. Alleviating chemical toxicities: liming acid soils. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. eds. *Modifying the root environment to reduce crop stress*. **American Society of Agricultural Engineers**, p. 269-301, 1981.

AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 831–843, 2009.

ASABE-American Society of Agricultural and Biological Engineers. **Soil cone penetrometer: ASAE standard S313.3**. St. Joseph: ASABE, 2009.

BENGOUGH, A. G. et al. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 2, p. 437-447, 2006.

BENGOUGH, A. G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59–68, jan. 2011.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Ecological Studies, ed. Springer, v. 33, n. 1, p. 188, 1979.

BORTOLUZZI, E. C. et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 262–271, 2014.

BOTTA, G. F. et al. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 1, p. 167–174, 2010.

BUSSCHER, W. J.; FREDERICK, J. R.; BAUER, P. J. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 3, p. 999-1003, 2000.

CAIRES, E. F. Calagem e uso de gesso em Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto**, v. 128, p. 1-11, 2012.

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 275-286, 2003.

CAIRES, E. F. et al. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 28, p. 57-64, 2008.

CAIRES, E. F. et al. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 315-327, 1999.

CAIRES, E. F. et al. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 4, p. 370–379, 2006.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e gesso. **Bragantia**, v. 60, n. 3, p. 213–223, 2001.

CALONEGO, J. C. et al. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31–37, 1 abr. 2017.

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**, v. 29, n. 5, p. 789–796, 2005.

CORRÊA, J. C. et al. Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 263–272, 2009.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11<sup>a</sup>.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2016.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 5, p. 1393–1403, 2013.

DALLA NORA, D. et al. Mitigation of the gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1–22, 2017.

DERPSCH, R. et al. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1–25, 2010.

DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 159–168, 2016.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5<sup>a</sup>. ed. Brasília: Embrapa - CNPS; 2018.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. S.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 825–831, 2005.

FERREIRA, A. de O. et al. Science of the Total Environment Driving factors of soil carbon accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 622–623, p. 735–742, 2018.

FIN, S. et al. Duration of the effects of scarification and raised bed associated with vegetation cover on soybean yield on an Alfisol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1230-1238, 2018.

GONZALES-ERICO, E. et al. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an Oxisol of central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 43, n. 6, p. 1155-1158, 1979.

GRUBA, P.; MULDER, J. Tree species affect cation exchange capacity (CEC) and cation binding properties of organic matter in acid forest soils. **Science of The Total Environment**, v. 511, p. 655–662, abr. 2015.

GUAN, D. et al. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root bleeding sap and nutrients uptake in summer maize. **Field Crops Research**, v. 157, n. 1, p. 89-97, 2014.

HANSEL, F. D. et al. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 6, p. 2936–2944, 2017.

JONES, G. D.; LUTZ, J. A. Yield of Wheat and Soybeans and Oil and Protein Content of Soybean as Affected by Fertility Treatments and Deep Placement of Limestone<sup>1</sup>. **Agronomy Journal**, v. 63, n. 6, p. 931–934, 1971.

KÖPPEN, W. P. **Das geographic system der climate**. In: W. Köppen and R. Geiger, editors, *Handbuch der Klimatologie*. C.G. Borntrager, Berlin. 1938. p. 1-44.

LEONEL, C. L. et al. Influência da compactação do solo no crescimento radicular e na produtividade de amendoim. **Científica**, v. 35, n. 1, p. 51-60, 2007.

LI, H. et al. The long-term effects of tillage practice and phosphorus fertilization on the

distribution and morphology of corn root. **Plant and Soil**, v. 412, n.1-2, p. 97–114, 2017.

LIMA, E. S et al. Variabilidade espacial das propriedades dendrométricas do eucalipto e atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 1, p. 1-11, 2017.

LIU, Z. et al. Yield response of spring maize to inter-row subsoiling and soil water deficit in Northern China. **PLoS ONE**, v. 11, n. 4, 2016.

MASCHIETTO, E. H. G. **Gesso agrícola na produção de milho e soja em solo de alta fertilidade e baixa acidez em subsuperfície em plantio direto**. 2009. 56p. Dissertação (Mestrado em Agricultura)-Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2009.

NOBLE, A. D.; FEY, M. V.; SUMNER, M.E. Calcium-aluminum balance and the growth of soybean roots in nutrient solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 6, p. 1651-1656, 1988.

NUNES, M. R. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 119–126, 2015a.

NUNES, M. R. et al. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, v. 259–260, p. 149–155, 2015b.

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 675–684, 2014.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>

RAMOS, J. C. et al. Morphological characteristics of soybean root apices as indicators of soil compaction. **Scientia Agricola**, v. 67, p. 707-712, 2010.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009a.

REICHERT, J. M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 3, p. 310–319, 2009b.

RICHARDS, J. E. et al. Incorporation of limestone into naturally compacted subsoil during deep-ripping. **Soil & Tillage Research**, v. 36, n. 1, p. 21-32, 1995.

SINGH, S. et al. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: a review. **Environmental and Experimental Botany**, v. 137, p. 177-193, 2017.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 5, p. 795–801, 2000.

SOUZA, D. M. G; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso do gesso em solos do Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa, 2005.

TANG, C. et al. Aluminium-tolerant wheat uses more water and yields higher than aluminium-sensitive one on a sandy soil with subsurface acidity. **Field Crops Research**, v. 78, p. 93-103, 2002.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico n. 5).

VEPRASKAS, M. J; MINER, G. S. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root-growth. **Soil and Tillage Research**, v. 50, p. 423-427, 1986.

ZANDONÁ, R. R. et al. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 2, p. 128–137, 2015.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de estratégias de manejo para reduzir ou atenuar os efeitos limitantes do declínio de qualidade física e química da subsuperfície dos solos manejados sob SPD de longa duração, principalmente em situações de déficit hídrico, é visto como imprescindível no cenário de produção agrícola atual. Essas limitações estão sendo observadas pelos produtores rurais e o entendimento de como a produtividade das culturas é afetada pelo manejo é imprescindível para a tomada de decisão quanto ao manejo a ser empregado.

Através da análise dos resultados obtidos nesse trabalho, é possível observar que o uso de estratégias mecânicas de descompactação do solo são eficientes para aliviar a compactação do solo, no entanto, o uso das mesmas sem a aplicação de corretivos de forma associada (em superfície ou incorporados no solo), pode reduzir a qualidade química do solo, evidenciado neste estudo pela redução do pH e incremento da saturação por Al.

A associação de estratégias de manejo físico e químico mostrou-se nesse trabalho como uma estratégia eficiente para aliviar a compactação do solo e melhorar a qualidade química da camada de enraizamento profunda do solo. Esse resultado foi obtido mais evidentemente ao associar a subsolagem na linha e na entrelinha (35 cm de espaçamento) com a aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (com espaçamento de 70 cm), o que resultou nos maiores valores de pH, saturação por Ca e Mg e V%, além de reduzir a m a valores insignificantes abaixo de 10 cm de profundidade.

Desta forma, fica evidente a importância do uso de estratégias de manejo integradas para melhoria química e física da camada de enraizamento do solo. Além disso, essa associação pode ser eficiente para reduzir as perdas de produtividade em situações de déficit hídrico, efeito que pode ser atribuído ao maior volume e comprimento e à melhor distribuição do sistema radicular das plantas no solo.

Sugere-se, como complemento deste trabalho, o estudo do uso de mix de plantas de cobertura para prolongar os efeitos da descompactação e contribuir para a ciclagem de nutrientes no sistema, pois o manejo integrado da descompactação mecânica, aplicação de corretivos e plantas de cobertura pode ser ainda mais eficiente, além de ser mais sustentável e mais rentável ao produtor rural, potencializando ainda mais a qualidade do sistema plantio direto já existente no cenário em estudo.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASABE-American Society of Agricultural and Biological Engineers. **Soil cone penetrometer: ASAE standard S313.3**. St. Joseph: ASABE, 2009.
- BATEY, T. Soil compaction and soil management - A review. **Soil Use and Management**, v. 25, n. 4, p. 335–345, 2009.
- BENGOUGH, A. G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59–68, jan. 2011.
- BENGOUGH, A. G. et al. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 2, p. 437-447, 2006.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. O milho e o clima. In: EMATER/RS-ASCAR (Ed.). **Climate Change 2013 - The Physical Science Basis**. Porto Alegre: Cambridge University Press, 2014. 1p. 1–84.
- BERNOUX, M. et al. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil: A review. **Sustainable Agriculture**, v. 26, n. 1, p.75-85, 2006.
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: an on-farm assessment. **Soil Science Society of America**, v. 72, n. 3, 2008.
- BORTOLUZZI, E. C. et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 262-271, 2014.
- BOTTA, G. F. et al. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 1, p. 167–174, 2010.
- CAIRES, E. F. Calagem e uso de gesso em Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto**, v. 128, p. 1-11, 2012.
- CAIRES, E. F. **Correção da acidez do solo em sistema plantio direto**. International Plant Nutrition Institute (IPNI), 2013. 14p.
- CAIRES, E. F. et al. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 4, p. 370–379, 2006.
- CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 29, n. 5, p. 789–796, 2005.
- CARR, P. M.; MARTIN, G. B.; HORSLEY, R. D. Impact of Tillage and Crop Rotation on Spring Wheat Yield: II. Rotation Effect. **Crop Management Research**, v. 5, n. 1, 2006.
- CORRÊA, J. C. et al. Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,

v. 33, n. 2, p. 263–272, 2009.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 5, p. 1393–1403, 2013.

DALLA NORA, D. et al. Formação de um perfil de enraizamento profundo e a estabilidade da produtividade de culturas de grãos sob Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto, Não-Me-Toque**, v. 139, p. 1-11, 2014.

DALLA NORA, D. et al. Mitigation of the gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 41, p. 1–22, 2017.

DELHAIZA, E.; RYAN, P. R. Aluminium toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, v. 107, p. 315-321, 1995.

DERPSCH, R. et al. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1–25, 2010.

DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 159–168, 2016.

DONG, W. et al. Effect of plough pans on the growth of soybean roots in the black-soil region of northeastern China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 10, p. 2191–2196, 2017.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5<sup>a</sup>. ed. Brasília: Embrapa - CNPS; 2018.

FIDELIS, R. R. et al. Alguns aspectos do plantio direto para a cultura da soja some aspects of no-tillage system on soybean. **Bioscience Journal**, v. 19, n. 1, p. 23–31, 2003.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, v.48, n. 1, p. 21-35, 1998.

FOWLER, C. W.; HOBBS, L. Is humanity sustainable? Proceedings of the Royal Society of London. **Biological Sciences**, v. 270, n. 1533, p. 2579–2583, 2003.

FRANCHINI, J. C. et al. Root growth of soybean cultivars under different water availability conditions. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 2, p. 715–724, 2017.

FUENTES-LLANILLO, R. et al. Profitability of no-till grain production systems. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 1, p. 77, 2018.

GODWIN, R. et al. The current status of soil and water management in England. **Journal of the Royal Agricultural Society of England**, v. 169, p. 1–7, 2008.

GOODMAN, A. M.; ENNOS, A. R. The effects of soil bulk density on the morphology and

anchorage mechanics of the root systems of sunflower and maize. **Annals of Botany**, v. 83, p. 293-302, 1999.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.

HANSEL, F. D. et al. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 6, p. 2936–2944, 2017.

HARTEMINK, A. E. Soils are back on the global agenda. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 4, p. 327–330, 2008.

HODGE, A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. **New Phytologist**, v. 162, p. 9-24, 2004.

JORIS, H. A. W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, v. 365, p. 409-424, 2013.

KOCHHNANN, R. A.; DENARDIN, J. E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa, 36p., 2000.

KÖPPEN, W. P. **Das geographic system der climate**. In: W. Köppen and R. Geiger, editors, *Handbuch der Klimatologie*. C.G. Borntrager, Berlin. 1938. p. 1-44.

LAL, R. A system approach to conservation agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 70, n. 4, p. 82-88, 2015.

LAL, R.; LOGAN, T. J.; FAUSEY, N. R. Long-term tillage and wheel traffic effects on a poorly drained Mollic Ochraqulf in northwest Ohio. 1. soil physical properties, root distribution and grain yield of corn and soybean. **Soil & Tillage Research**, v. 14, n. 1, p. 341-358, 1989.

LI, H. et al. Soybean root traits after 24 years of different soil tillage and mineral phosphorus fertilization management. **Soil and Tillage Research**, v. 165, p. 258–267, 2017.

LICHT, M. A.; AL-KAISI, M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, v. 80, p. 233–249, 2005.

LIMA, E. S et al. Variabilidade espacial das propriedades dendrométricas do eucalipto e atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 1, p. 1-11, 2017.

LIU, Z. et al. Yield response of spring maize to inter-row subsoiling and soil water deficit in Northern China. **PLoS ONE**, v. 11, n. 4, 2016.

MANTOVANI, A. et al. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de gesso e calcário. **Scientific Electronic Archives**, v. 10, n. 5, p. 35–43, 2017.

MCGARRY, D. Tillage and Soil Compaction. In: **Conservation Agriculture**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003. p. 307–316.

MESSIGA, A. J. et al. Tillage practices of a clay loam soil affect soil aggregation and associated C and P concentrations. **Geoderma**, v. 164, n. 3–4, p. 225–231, 2011.

MILNE, R. M.; HAYNES, R. J. Comparative effects of annual and permanent dairy pastures on soil physical properties in the Tsitsikamma region of South Africa. **Soil Use and Management**, v. 20, n. 1, p. 81–88, 2004.

NICHOLS, M. L.; REAVES, C. A. Soil reaction: to subsoiling equipment. **Agricultural Engineering**, v. 39, p. 340-343, 1958.

NUNES, M. R. et al. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, v. 259–260, p. 149–155, 2015.

PATERNIANI, E. Agricultura sustentável nos trópicos. **Estudos Avançados**, v. 15, n. 43, p. 303–326, 2001.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminium to coffee in Ultisols and Oxisols amended with CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub> and CaSO<sub>4</sub>. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, p. 1201-1207, 1982.

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 675–684, 2014.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 111 p., 2000.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. Van. Resposta da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n.1, p. 275-383, 1996.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>

RAMOS, J. C. et al. Morphological characteristics of soybean root apices as indicators of soil compaction. **Scientia Agricola**, v. 67, p. 707-712, 2010.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009.

SASAKI, C.M.; GONÇALVES, J.L.M. Desempenho operacional de um subsolador em função da estrutura, do teor de argila e de água em três Latossolos. **Scientia Forestalis**, n.69, p.115-124, 2005.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 311-317, 1998.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência Mecânica Do Solo À Penetração Influenciada Pelo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 5, p. 795–801, 2000.

SOIL SCIENCE GLOSSARY TERMS COMMITTEE. **Glossary os soil science terms**. USA:

Soil Science Society of America, 2008.

STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. **Soil Science**, v. 96, n. 3, p. 153-156, 1963.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico n. 5).

TORABIAN, S.; FARHANGI-ABRIZ, S.; DENTON, M. D. Do tillage systems influence nitrogen fixation in legumes? A review. **Soil and Tillage Research**, v. 185, p. 113–121, 2019.

VEPRASKAS, M. J.; MINER, G. S. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root-growth. **Soil and Tillage Research**, v. 50, p. 423-427, 1986.

WHITELEY, G. M.; DEXTER, A. R. Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and non-tilled soil. **Soil and Tillage Research**, v. 2, n. 4, p. 379–393, 1982.

ZANDONÁ, R. R. et al. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 2, p. 128–137, 2015.

## 9. APÊNDICES

Apêndice A – Análise de variância dos atributos químicos do solo em relação aos tratamentos, profundidade e tempo de amostragem para o experimento em estudo.

Causas de variação	pH	Ca	Mg	S	Al	CTC	V	m
	H <sub>2</sub> O	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				-----%-----		
Tratamentos	**	ns	ns	**	**	**	**	**
Tempo	ns	ns	**	**	ns	*	ns	ns
Profundidades	**	**	**	**	**	**	**	**
Tratamentos x Tempo	ns	**	ns	ns	**	**	ns	**
Tratamentos x Profundidades	**	**	**	**	**	**	**	**
Tempo x Profundidades	*	**	**	**	ns	**	*	*
Tratamentos x Tempo x Profundidades	*	**	**	*	**	ns	ns	ns

<sup>ns</sup> Não significativo; \* Significativo a 5%; \*\* Significativo a 1%.

Apêndice B – Análise de variância da produtividade da soja em relação aos tratamentos e safras avaliadas.

Causas de variação	Produtividade (Kg ha <sup>-1</sup> )
Tratamentos	*
Safras	**
Tratamentos x Safras	ns

<sup>ns</sup> Não significativo; \* Significativo a 5%; \*\* Significativo a 1%.

Apêndice C – Análise de variância da produtividade da soja com restrição hídrica induzida em relação aos tratamentos e as safras avaliadas.

Causas de variação	Produtividade (Kg ha <sup>-1</sup> )
Tratamentos	**
Safras	**
Restrição	**
Tratamentos x Safras	ns
Tratamentos x Restrição	ns
Safras x Restrição	ns
Tratamentos x Safras x Restrição	ns

<sup>ns</sup> Não significativo; \* Significativo a 5%; \*\* Significativo a 1%.

Apêndice D – Análise de variância da resistência mecânica à penetração do solo em relação aos tratamentos e tempos avaliados.

Causas de variação	Resistência mecânica à penetração (KPa)
Tratamentos	**
Tempos	ns
Tratamentos x Tempos	**

<sup>ns</sup> Não significativo; \* Significativo a 5%; \*\* Significativo a 1%.

## 10. ANEXOS

Anexo A – Equipamento escarificador utilizado no experimento.



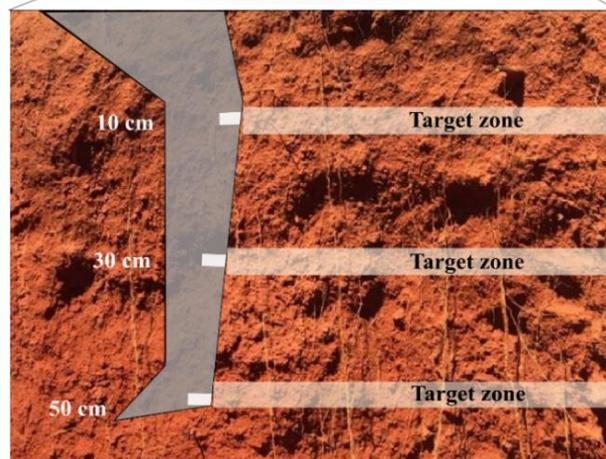
Fonte: Solos máquinas.

Anexo B – Equipamento subsolador utilizado no experimento.



Fonte: Kamaq.

Anexo C – Aplicação profunda de óxido de Ca e Mg.



Fonte: o autor.

Anexo D – Coleta de Solo no experimento.



Fonte: Acervo do autor.

Anexo E – Determinação da resistência à penetração do solo.



Fonte: Falcker (a) e acervo do autor (b).

Anexo F – Coleta de raízes.



Fonte: Acervo do autor.

Anexo G – Instalação das câmaras de restrição hídrica.



Fonte: Acervo do autor.