

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

Fábio Evandro Grub Hauschild

**SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO EM ÁREAS
IRRIGADAS POR PIVÔ CENTRAL**

Santa Maria, RS
2019

Fábio Evandro Grub Hauschild

**Sistemas de manejo de solo em áreas
irrigadas por pivô central**

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

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado
Co-orientador: Prof. Dr. Jackson Ernani Fiorin

Santa Maria, RS
2019

Hauschild, Fábio
Sistemas de manejo de solo em áreas irrigadas por pivô
central / Fábio Hauschild.- 2019.
71 p.; 30 cm

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado
Coorientador: Jackson Ernani Fiorin
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2019

1. Sistema Plantio Direto 2. Irrigação 3. Compactação
4. Plantas de cobertura I. , Telmo Jorge Carneiro Amado
II. , Jackson Ernani Fiorin III. Título.

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

© 2019.

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

Endereço: Rua Major Antonio Cardoso, 366. Centro, Cerro Largo – RS.

E-mail: fabio@coopatrigo.com.br

Fábio Evandro Grub Hauschild

**SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO EM ÁREAS
IRRIGADAS POR PIVÔ CENTRAL**

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

Aprovado em 08 de agosto de 2019:

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

Jackson Ernani Fiorin, Dr. (Unicruz)

Douglas Dalla Nora, Dr. (IFFar)

Vitor Cauduro Girardello, Dr. (URI)

Tiago de Andrade Neves Horbe, Dr. (UFSM)

Cristiano Keller, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas pessoas que colocou em minha vida. Todas, sem exceção, contribuíram para meu sucesso e para meu crescimento como pessoa.

Aos meus filhos, Lucas e Lynda, pela oportunidade de experimentar a mais pura forma de amor e por terem me acompanhado mesmo na distância, revelando-me a certeza de que todos os dias, ao lado deles, são maravilhosos.

A minha esposa Shirlei Sztormowski, pelo carinho, dedicação, paciência e pelas inúmeras vezes que você me enxergou melhor do que eu sou. Pela sua capacidade de entender minha ausência nas horas dedicadas aos estudos e viagens técnicas na busca da qualificação profissional.

Aos meus pais, irmãos, sogros, cunhados, sobrinhos e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

A Cooperativa Tritícola Regional Sãoluizense por ter oportunizado condições para o aprimoramento das minhas funções, demonstrando confiança na minha qualificação profissional.

Aos meus colegas de Coopatrigo pelo apoio, incentivo e pelo suporte nos momentos que estive ausente no decorrer do curso.

Aos produtores irmãos Rogério Pieniz e Romar Pieniz pela confiança e cedência da área para a realização da pesquisa.

Ao professor orientador Telmo J. C. Amado pelo incentivo e auxílio primordial para ingressar no curso, auxiliando com seus ensinamentos didáticos e de vida para vencer este grande desafio.

Um abraço especial aos colegas Marcieli Piccin e Cristiano Keller pelo auxílio na elaboração e análise dos dados da pesquisa.

Um carinho especial ao professor Jackson E. Fiorin pelo convívio, amizade, ensinamentos e auxílio na elaboração da tese e de eventos ligados ao curso.

Aos professores da banca examinadora da tese, contribuindo para o aprimoramento desta pesquisa.

A Coordenação e docentes do PPGEA da Universidade Federal de Santa Maria, pelo estímulo à busca do conhecimento.

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

RESUMO

SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO EM ÁREAS IRRIGADAS POR PIVÔ CENTRAL

AUTOR: Fábio Evandro Grub Hauschild
ORIENTADOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

O manejo da irrigação em áreas sob Sistema Plantio Direto tem sido estabelecido considerando apenas o potencial da água no solo, como fator limitante para o crescimento das plantas. Entretanto, as condições físicas e químicas do solo como a compactação e a distribuição dos nutrientes ao longo do perfil também podem limitar o crescimento e consequentemente a produtividade das culturas, mesmo com o potencial de água no solo estando dentro do intervalo correspondente à água disponível. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi investigar o efeito da melhoria da qualidade química e física da camada de enraizamento, pelo uso do gesso (G), calcário (C), plantas de cobertura (PC) e escarificação (ESC) de forma isolada e combinada, sobre a produtividade de soja e milho em SPD contínuo em área irrigada, bem como realizar uma análise econômica identificando as estratégias de manejo mais rentáveis. O experimento foi conduzido em uma lavoura comercial em um Latossolo Vermelho Distrófico típico. O delineamento utilizado seguiu um esquema trifatorial, com a parcela principal constituída pelo sistema de manejo, a subparcela pelo uso de PC e a subsubparcela pelo uso de C e G. O uso de PC em SPD, comparado a ESC teve efeito semelhante na redução da resistência a penetração do solo (RP). A combinação da ESC com PC apresentou os menores valores de RP ao final do experimento. O uso da ESC+PC+C+G, teve efeito no pH na camada de 0-35 cm comparado ao tratamento SPD, elevando o mesmo acima de 5,5 até a profundidade de 15 cm. Já o SPD+PC+C+G apresentou comportamento intermediário, com efeito limitado a camada de 0-10 cm. Os maiores incrementos em profundidade nos teores de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) foram observados nos tratamentos submetidos à aplicação de C e G de forma combinada com destaque para o tratamento submetido a ESC. A combinação dos tratamentos para as três safras elevou a produtividade das culturas de forma significativa, com os maiores ganhos para o tratamento ESC+PC+C+G, e menores para a testemunha. A produtividade da cultura da soja no tratamento ESC+C+G não apresentou diferença estatística para as três safras em relação ao tratamento SPD+PC+C+G, indicando que a utilização de PC associado a aplicação de C e G em SPD é uma alternativa eficiente para elevar a produtividade sem a necessidade do revolvimento do solo. O uso de plantas de cobertura associado a escarificação apresentou retorno do investimento mais rápido em comparação aos demais tratamentos. As estratégias integradas de manejo de solo proporcionaram maior retorno econômico acumulado em relação ao uso isolado das mesmas. O uso isolado da escarificação, apesar do baixo custo de implantação, apresentou o menor retorno econômico, mostrando-se nesse caso como um manejo ineficiente. No entanto, ao combiná-la com plantas de cobertura, calcário e gesso, mostrou-se como a melhor estratégia para elevar o rendimento e o retorno econômico.

Palavras-chave: Gesso. Calcário. Plantas de cobertura. Escarificação. Camada de enraizamento. Retorno econômico.

ABSTRACT

MANAGEMENT SYSTEMS OF THE SOIL IN FIELDS IRRIGATED WITH CENTRAL PIVOT

AUTHOR: Fábio Evandro Grub Hauschild

ADVISOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

The management of the irrigation in fields under no-till system was established according to the water potential in the soil as limiting factor to plant growth. However, the physical and chemical of the soil subsurface, such as the compaction and the distribution of nutrients in the soil rooting layer, may also limit the growth, and consequently, the crop yield, regardless of the water potential was inside the interval corresponding to the water available. In this context, the aim of this study was investigate the effect of the chemical and physical improvement of the rooting zone of the soil, by the use of gypsum (G), limestone (C), cover crops (PC) and chiseling (ESC) isolated and combined in the soybean and maize grain yields, and too realize an economic analysis identifying the strategies of management with more profitability. The experiment was conducted in a commercial field in a Typic Hapludox. The experimental design followed a trifactorial scheme, with the principal parcel constituted by the management system, the subparcel by the use of PC and the subsubparcel by the application of C and/or G. The use of PC in SPD, in relation to ESC was effect similar in the mitigation penetration resistance (values). The combination of the ESC and PC presented the lower PR values in the final of the experimental period. The use of ESC+PC+C+G was effect in the soil layer of 0-35 cm in relation to SPD, increasing this attribute to more of 5,5 until the 15 cm depth. However, the SPD+PC+C+G presented intermediary behavior, with limited effect in the layer of 15 cm. The higher increases in the soil depth of the calcium (Ca^{2+}) e magnesium (Mg^{2+}) contents were observed in the treatments submitted to C and G application combined with highlight to treatment submitted to ESC. The combination of the treatments to three crop seasons increase significantly the grain yield of the crops, with the higher values to treatment ESC+PC+C+G and lower to control. The soybean seed yield in the treatment ESC+C+G not presented statistical difference to three crop seasons in relation to SPD+PC+C+G, indicating that the utilization of PC associated with C and G application in SPD it's an efficient alternative to increase the grain yield without the need for soil tillage with the chiseling. The use of cover crops associated with the chiseling presented economic return faster in relation to other treatments. The integrated strategies of soil management provided higher economic return accumulated in relation to isolated use of these strategies. The isolated use of the chiseling, although of the low cost of implantation, presented in the lower economic return, identified as an inefficient management. However, with the combination of the chiseling with cover crops, limestone and gypsum was the better strategy to increase the crop yield and economic return.

Keywords: Gypsum. Limestone. Cover crops. Chiseling. Soil rooting layer. Economic return.

LISTA DE FIGURAS

MATERIAL E MÉTODOS GERAL

Figura 1: Precipitação e irrigação mensais e acumuladas durante o período experimental.....30

Figura 2: Representação esquemática do desenho experimental e da localização do experimento no município de São Luiz Gonzaga-RS.....31

ARTIGO I

Figura 1: Resistência mecânica à penetração do solo para os tratamentos: SPD – Sistema Plantio Direto; SPD+PC – Sistema Plantio Direto + plantas de cobertura; ESC – Escarificação; ESC+PC – Escarificação + plantas de cobertura.....39

Figura 2: Efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos do solo. SPD – Sistema Plantio Direto; ESC – Escarificação; PC - Plantas de Cobertura; G – Gesso; C – Calcário. Ca – cálcio; Mg – magnésio; S – enxofre.....42

Figura 3: Produtividade das culturas de milho e soja nas safras 2015/16 (1), 2016/17 (2) e 2017/18 (3). SPD – Sistema Plantio Direto; ESC – Escarificação; Test. – Testemunha; C – Calcário; G – Gesso Agrícola; PC – Plantas de Cobertura. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%.....45

Figura 4: Resposta da produtividade em função da resistência à penetração do solo (RP); a) Correlação entre a produtividade em cada sistema de preparo associado ao uso de plantas de cobertura com a RP; b) Correlação entre a produtividade média com a RP.....46

Figura 5: Correlações entre os atributos químicos do solo e a produtividade média dos três anos avaliados; a) pH; b) m - saturação por alumínio (%); c) Ca – cálcio; d) Mg – magnésio; e) CTC – capacidade de troca de cátions; f) S – enxofre.....48

ARTIGO II

Figura 1: Custos de implantação dos tratamentos e rendimento de milho e soja nas safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18.....59

Figura 2: Produtividade acumulada de soja e milho nos três anos avaliados.....63

LISTA DE TABELAS

MATERIAL E MÉTODOS GERAL

Tabela 1: Atributos químicos avaliados anteriormente à implantação dos tratamentos na área experimental.....29

ARTIGO I

Tabela 1: Atributos químicos e resistência mecânica à penetração do solo antes da aplicação do experimento.....38

Tabela 2: Descrição dos atributos químicos do solo após 32 meses a implantação dos tratamentos.....41

ARTIGO II

Tabela 1: Atributos químicos do solo anteriormente à aplicação dos tratamentos.....57

Tabela 2: Custos de implantação dos manejos realizados (R\$ ha⁻¹).....60

Tabela 3: Efeito dos tratamentos sobre o rendimento milho e soja nos três anos avaliados...61

Tabela 4: Efeito dos tratamentos sobre o rendimento acumulado, custo e payback simples..62

LISTA DE ABREVIÇÕES

Al ³⁺	– Alumínio
AP	– Agricultura de Precisão
AV	– Aveia Preta
C	– Calcário
Ca ²⁺	– Cálcio
CC	– Nabo Forrageiro + Aveia Preta
CTC	– Capacidade de troca de cátions
ESC	– Escarificação
G	– Gesso
m	– Saturação por alumínio
Mg ²⁺	– Magnésio
MOS	– Matéria orgânica do solo
K ⁺	– Potássio
P	– Fósforo
PC	– Plantas de cobertura
PD	– Plantio Direto
RP	– Resistência à Penetração
RS	– Rio Grande do Sul
Sat. Ca	– Saturação por cálcio na CTC
Sat. Mg	– Saturação por magnésio na CTC
SB	– Soma de bases
SC	– Sem cobertura
SPD	– Sistema Plantio Direto
V	– Saturação por bases

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3. HIPÓTESES	27
4. OBJETIVOS	28
4.1 OBJETIVO GERAL.....	28
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
5. MATERIAL E MÉTODOS GERAL.....	29
5.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	29
5.2 IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO	31
5.3 DESCRIÇÃO DAS AVALIAÇÕES REALIZADAS	32
5.3.1 Coleta de Solo.....	32
5.3.2 Avaliação da resistência mecânica à penetração do solo	33
5.3.3 Avaliação da produtividade.....	33
5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	33
6. ARTIGO I - ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE SOLO PARA CULTURAS DE GRÃOS EM ÁREA IRRIGADA POR PIVÔ CENTRAL.....	34
6.1 RESUMO.....	34
6.2 ABSTRACT	34
6.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
6.4.1 Caracterização da área experimental	37
6.4.2 Delineamento experimental	38
6.4.3 Determinação da resistência à penetração do solo	38
6.4.4 Coleta e análise de solo.....	38
6.4.5 Determinação da produtividade de milho e soja	38
6.4.6 Análise estatística.....	39
6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
6.5.1 Resistência à penetração do solo afetada pela aplicação dos tratamentos	39
6.5.2 Atributos químicos afetados pela aplicação dos tratamentos.....	40
6.5.3 Produtividade das culturas	43
6.5.4 Resposta da produtividade em função dos atributos físicos e químicos.....	46
6.6 CONCLUSÕES	49
6.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
7. ARTIGO II - INCREMENTO DO RETORNO ECONÔMICO EM ÁREA IRRIGADA UTILIZANDO ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE SOLO.....	54

7.1 RESUMO.....	54
7.2 ABSTRACT	54
7.3 INTRODUÇÃO.....	55
7.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	57
7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
7.6 CONCLUSÕES	63
7.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1. INTRODUÇÃO GERAL

Ao longo das últimas décadas, entre todas as atividades econômicas, a agricultura é aquela que mais sofre devido às variações climáticas. Segundo diferentes Órgãos e Institutos especializados em climatologia, constatou-se que no Rio Grande do Sul, os efeitos da deficiência hídrica acontecem de forma mais acentuada que nos demais estados produtores de soja e milho. Também, já é consenso para essas mesmas fontes que, dentro do Estado, a região denominada Missioneira é a que mais sofre pelos efeitos dessa instabilidade climática.

Trata-se de uma região com solos profundos, argilosos, bem drenados e com paisagem formada por coxilhas de pendentes longas. Em geral, pela pouca declividade, torna-se própria para a agricultura mecanizada. Originalmente foi coberta por campos ou, em menor percentagem, por matas que vegetavam sobre solos com excelentes condições físicas e biológicas, porém, normalmente carentes de fósforo e com alto índice de acidez nociva.

Nesta região se estabeleceram várias Cooperativas do ramo agropecuário que prestam um excelente serviço de difusão de tecnologias, como a Cooperativa Triticola Regional Sãoluizense Ltda - COOPATRIGO. A Cooperativa tem uma área de atuação que engloba mais de 300 mil hectares em 13 municípios: São Luiz Gonzaga, Santo Antonio das Missões, Garruchos, São Nicolau, Pirapó, Dezesesseis de Novembro, Roque Gonzales, Rolador, Caibaté, Mato Queimado, Bossoroca, Capão do Cipó e Santiago.

Além dos altos investimentos que realizaram na infraestrutura para armazenagem, comercializam os produtos e dão suporte a toda a cadeia produtiva regional. Cumprem assim, função social de valor inestimável. Devido as constantes manifestações dos agricultores de que o estresse hídrico é observado com frequência cada vez maior nas fases críticas das culturas, e que esse seria o principal motivo das oscilações na produtividade da região, dirigentes e técnicos das cooperativas passaram a se reunir para discutir a situação na busca de soluções para a classe produtora.

As cooperativas da região lideradas pela extinta Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa – FUNDACEP criaram o projeto Cooper Ativo para avaliar e diagnosticar quais os fatores que influenciavam a perda da produtividade das lavouras de soja e milho da região cultivadas no sistema plantio direto (SPD), onde constatou-se que os efeitos climáticos não eram a única variável a influenciar os resultados econômicos da produção primária da região. Foi diagnosticado no período das safras de 2002/2003, 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006 que as condições físicas do solo estavam com índices de compactação acima do nível crítico, e as condições da acidez do solo indicavam que 66,7% das propriedades necessitavam de

correção de calcário. Outro problema encontrado foi a baixa fertilidade do solo, necessitando cuidados especiais com adubação fosfatada.

Estes problemas diagnosticados são reflexos do modelo de cultivo adotado no início da atividade agrícola na região e a falta de capital para investimento em correção da acidez e da fertilidade. Com o uso do sistema de plantio convencional e sem uso de plantas de cobertura, deixavam o solo exposto a erosão causada pelas fortes chuvas, promovendo perdas do solo, nutrientes e insumos.

Outro fator que contribuiu para a manutenção do alto índice de acidez do solo foi que a região no momento da primeira revolução tecnológica ocorrida no Rio Grande do Sul em meados dos anos 60 chamada de “Operação Tatu”, programa que promoveu a calagem e correção da fertilidade dos solos, favorecendo o cultivo da soja, a região ainda era tomada na maioria de sua área por pastagens e campo para atividade pecuária não sendo contemplada pelo programa.

Para solucionar os problemas gerados pelo sistema de plantio convencional, nas últimas décadas adotou-se o uso do sistema plantio direto na região missioneira, como nas demais regiões produtoras de grãos de todo o Brasil, este sistema tem como princípio o não revolvimento do solo, com cobertura permanente e na rotação de culturas.

Porém, no estudo realizado na região Missioneira pelo projeto Cooper Ativo das Cooperativas indicou que os princípios básicos do SPD não estavam sendo cumpridos, como o uso da rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura eficazes. Outro fator importante a ressaltar, que no momento da migração do sistema convencional para o SPD não houve o correto preparo do solo para a introdução do novo sistema, como a incorporação do calcário e a correção da fertilidade do solo não ocorreu nas propriedades, devido à falta de capital para realizar o investimento.

Preocupada com o direcionamento do sistema de produção de seus associados a COOPATRIGO investe fortemente no seu quadro técnico, capacitando-os para levarem as melhores tecnologias e ferramentas aos seus produtores. A cooperativa dispõe de vários programas técnicos a fim de auxiliar o produtor na melhoria da fertilidade do seu solo na busca de incremento da produtividade das lavouras.

Dentre os programas para ajudar seus associados, a cooperativa no ano de 2008 investiu no programa de agricultura de precisão para proporcionar a correção química do solo, através da aplicação de calcário e fertilizantes em taxa variada conforme a necessidade de cada talhão da propriedade. Procurando assim, diminuir os efeitos da acidez do solo sobre o rendimento das culturas, sendo potencializada nos períodos de deficiência hídrica.

A disponibilidade de água no solo é um fator fundamental ao desenvolvimento e à produtividade das culturas agrícolas. Nas áreas não irrigadas, a quantidade de água disponível no solo para as plantas depende diretamente da capacidade do solo em reter e disponibilizar a água e da distribuição adequada das precipitações ao longo do ciclo da cultura.

Entre os anos de 2010 a 2015, houve um crescente aumento no uso de sistemas de irrigação, o qual teve sua representatividade aumentada na região Missioneira do Estado e se tornou uma das tecnologias mais utilizadas atualmente pelos produtores com o objetivo de evitar frustrações de safras e manter níveis de produtividade elevados ao longo dos anos. Perante este cenário, a cooperativa promoveu vários seminários a fim de auxiliar o produtor na tomada de decisão, como de buscar financiamentos bancários, aproximação de empresas de irrigação para montagem dos projetos e das empresas do setor energético para fornecimento de luz, além de toda a informação técnica necessária para implantação e condução das culturas em área irrigada.

O manejo de irrigação em áreas difundidas com o Sistema Plantio Direto (SPD) tem sido estabelecido considerando-se apenas o potencial da água no solo como fator limitante para o crescimento das plantas. Entretanto, as condições físicas e químicas do solo como a compactação e a distribuição dos nutrientes ao longo da camada de enraizamento também podem limitar o crescimento de plantas e, conseqüentemente, sua produtividade, mesmo com o potencial da água no solo estando dentro do intervalo correspondente à água disponível.

Neste sentido, o departamento técnico da cooperativa criou o Programa mais solos, a fim de levar informações aos associados da importância do uso de plantas de cobertura eficazes, da rotação de culturas e da correção física do solo, através de dias de campo, seminários, orientações a campo e programas de rádio. Pois, o simples fato da instalação do sistema de irrigação não era garantia de altas produtividades, a maioria dos produtores não estavam obtendo resultados planejados e ficando com dificuldade econômica para pagar o investimento e os custos da lavoura. Portanto, cabe uma reflexão quanto ao sistema, sendo necessário termos uma qualidade química, física e biológica do solo para termos uma maior eficiência do sistema irrigado.

A viabilidade dos sistemas de irrigação em áreas manejadas pelo SPD necessita de estudos aprofundados e contínuos para definir o real efeito de determinado sistema de manejo e das diferentes culturas, sobre a dinâmica da água, de forma a gerar informações que permitam a implantação de sistemas de produção agrícolas sustentáveis, sem comprometer a produtividade.

Uma das alternativas para ruptura das camadas compactadas é a escarificação mecânica do solo, facilitando o desenvolvimento radicular das plantas, elevando a taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento de água no solo. Outra ferramenta que pode ser utilizada para esse fim é o uso de culturas de cobertura, as quais envolvem o uso de plantas caracterizadas por possuir elevada produção de fitomassa e por raízes vigorosas e profundas, como o consórcio aveia preta + nabo forrageiro. Os resíduos produzidos por essas espécies aumentam o teor de matéria orgânica do solo (MOS) e diminuiu a compactação.

Por outro lado, o uso de corretivos e condicionadores de solo podem constituir em uma alternativa viável para a melhoria das camadas subsuperficiais, as quais, quando aliadas à escarificação mecânica ou biológica do solo, podem beneficiar as propriedades físicas e químicas ao longo do perfil. O calcário tem como característica a baixa mobilidade no solo, o que faz com que a subsuperfície seja pouco influenciada em relação à redução dos atributos de acidez. A aplicação de gesso agrícola pode ser uma prática viável para a complementação da calagem, pois possui a capacidade de melhorar o ambiente subsuperficial do solo onde o calcário aplicado de forma isolada não atuaria.

Em áreas irrigadas, o manejo da água deve ser realizado com o objetivo de garantir às culturas condições de disponibilidade hídrica que possibilite a máxima expressão do potencial genético de produtividade da cultivar de soja utilizada. Desta forma, estabelecer qual o sistema de manejo de solo ideal para áreas irrigadas é uma maneira preventiva de evitar perdas de rendimento das culturas devido a estresses de natureza físico-químico-hídrica.

Considerando o exposto, a proposta do presente trabalho foi avaliar o uso da escarificação mecânica e biológica do solo aliado a aplicação de calcário e gesso agrícola, visando a melhoria das propriedades físicas e químicas em subsuperfície e sua influência no aumento da produtividade das culturas em áreas irrigadas por pivô central.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A disponibilidade de água no solo é um fator fundamental ao desenvolvimento e à produtividade das culturas agrícolas. Nas áreas não irrigadas, a quantidade de água disponível no solo para as plantas depende diretamente da capacidade do solo em reter e disponibilizar a água e da distribuição adequada das precipitações ao longo do ciclo da cultura.

Nos últimos anos, o Rio Grande do Sul tem sido afetado pelas estiagens, o que tem acarretado problemas na produção agrícola, trazendo consequências negativas aos agricultores e demais setores da cadeia produtiva (DALLA NORA et al., 2017).

Nesses anos, o suprimento de água nos períodos de estiagens só é suficiente nas áreas irrigadas. Perante este cenário, houve um crescente aumento no uso de sistemas de irrigação, o qual teve sua representatividade aumentada na área agrícola do Estado e se tornou uma das tecnologias mais utilizadas atualmente pelos produtores com o objetivo de evitar frustrações de safras e manter níveis de produtividade elevados ao longo dos anos.

O manejo de irrigação em áreas difundidas com o Sistema Plantio Direto (SPD) tem sido estabelecido considerando-se apenas o potencial da água no solo como fator limitante para o crescimento das plantas. Entretanto, as condições físicas e químicas do solo como a compactação e a distribuição dos nutrientes ao longo da camada de enraizamento também podem limitar o crescimento de plantas e, conseqüentemente, sua produtividade, mesmo com o potencial da água no solo estando dentro do intervalo correspondente à água disponível.

No Rio Grande do Sul e nas demais lavouras de terras altas do Brasil, o SPD está difundido quase que na sua totalidade, segundo dados da Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (FEBRAPDP, 2012) correspondendo a 31,8 milhões de hectares.

Um dos preceitos básicos do SPD é o não revolvimento do solo e a rotação de culturas, sendo uma técnica eficiente no controle das perdas de solo e água. Porém, quando não realizado de maneira correta, o sistema acaba por apresentar alguns problemas, dentre os quais, a compactação do solo tem se destacado (COLLARES; REINERT; REICHERT, 2008; DENARDIN; FAGANELLO; SATTLER, 2008; DRESCHER et al., 2011), limitando o crescimento radicular e a taxa de infiltração de água no solo (DENARDIN; FAGANELLO; SANTI, 2009). Além disso, a redução na rugosidade superficial em áreas sob plantio direto há alguns anos (PANACHUKI et al., 2011), associada à baixa produção de palhada em muitas situações, estão potencializando perdas de água por escoamento superficial (DENARDIN; FAGANELLO; SATTLER, 2008). Suzuki (2005); Genro Junior, Reinert e Reichert (2004) verificaram que no SPD, a camada compactada está localizada a uma profundidade que varia de 0,08 – 0,15 m.

Outro problema recorrente nos solos manejados sob SPD de longa duração é a concentração de nutrientes na superfície do solo (AMADO et al., 2006), tornando-o enriquecido na superfície, porém com algumas limitações em profundidade. Este mesmo comportamento pode ocorrer em áreas manejadas sob agricultura de precisão (AP), pois com esta técnica se intensificou a aplicação superficial de insumos (TRINDADE, 2013).

A viabilidade dos sistemas de irrigação em áreas manejadas pelo SPD necessita de estudos aprofundados e contínuos para definir o real efeito de determinado sistema de manejo e das diferentes culturas, sobre a dinâmica da água, de forma a gerar informações que

permitam a implantação de sistemas de produção agrícolas sustentáveis, sem comprometer a produtividade.

Uma das alternativas para ruptura das camadas compactadas é a escarificação mecânica do solo. Segundo Kochhann e Denardin (2000), a descompactação facilita o desenvolvimento radicular das plantas, eleva a taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento de água, aumentando a permeabilidade do solo, tendo como objetivo, segundo Inoue et al. (2002), a redução da resistência mecânica do solo à penetração de raízes, oferecendo assim um ambiente menos restritivo fisicamente ao desenvolvimento das culturas.

Outra ferramenta que pode ser utilizada para esse fim é o uso de culturas de cobertura, as quais envolvem o uso de plantas caracterizadas por possuir elevada produção de fitomassa e por raízes vigorosas e profundas, como o consórcio aveia preta + nabo forrageiro. Os resíduos produzidos por essas espécies aumentam o teor de matéria orgânica do solo (MOS) e diminuiu a compactação do mesmo. As raízes dessas plantas são capazes de crescer através de camadas compactadas, gerando bioporos que favorecem a infiltração de água e aeração, além de se constituírem em caminhos por meio dos quais as raízes da soja e milho, menos agressivas, podem se desenvolver.

Por outro lado, o uso de corretivos e condicionadores de solo podem constituir em uma alternativa viável para a melhoria das camadas subsuperficiais, as quais, quando aliadas à escarificação mecânica ou biológica do solo, podem beneficiar as propriedades físicas e químicas ao longo do perfil. O calcário tem como característica a baixa mobilidade no solo, o que faz com que a subsuperfície seja pouco influenciada em relação à redução dos atributos de acidez. A aplicação de gesso agrícola pode ser uma prática viável para a complementação da calagem, pois possui a capacidade de melhorar o ambiente subsuperficial do solo onde o calcário aplicado de forma isolada não atuaria (SUMNER, 1995).

Em áreas irrigadas, o manejo da água deve ser realizado com o objetivo de garantir às culturas condições de disponibilidade hídrica que possibilite a máxima expressão do potencial genético de produtividade da cultivar de soja utilizada. Desta forma, estabelecer qual o sistema de manejo de solo ideal para áreas irrigadas é uma maneira preventiva de evitar perdas de rendimento das culturas devido a estresses de natureza físico-químico-hídrica.

2.1 SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

Nos últimos anos, é possível verificar uma crescente pressão no setor agrícola em busca do aumento da eficiência e do aperfeiçoamento das ferramentas produtivas disponíveis.

Neste contexto, o uso eficiente de sistemas de irrigação possui elevada importância devido ao seu aumento na área agrícola e se tornando uma das tecnologias mais utilizadas atualmente pelos produtores.

A irregularidade da distribuição da precipitação pluviométrica e, conseqüentemente, da disponibilidade de água durante o ciclo das culturas, sobretudo nos períodos críticos, tem sido reconhecida como um dos principais fatores responsáveis pela variabilidade temporal dos rendimentos nas culturas do milho e da soja (LAMB et al., 1997; BAKHSH et al., 2001; MIAO; MULLA; ROBERT, 2006).

No Rio Grande do Sul, as chuvas são bem distribuídas entre as quatro estações do ano, porém, em muitos anos ocorrem estiagens em função da alta demanda evaporativa e da sequência de dias sem chuva, o que pode acarretar prejuízos na produtividade das culturas e gerar elevada variabilidade de produção ao longo das safras (MATZENAUER et al., 2007).

A irrigação pode consistir em uma alternativa para reduzir esta variabilidade, porém a eficiência para atender plenamente a demanda das plantas também está relacionada com a taxa de infiltração, a capacidade de armazenamento de água no solo, a disponibilidade de água às plantas, a química do solo e a nutrição de plantas (AMADO; GIOTTO, 2009).

Atualmente, o uso desta alternativa vem ganhando destaque e está se tornando uma das tecnologias mais empregadas pelos produtores com o objetivo de evitar frustrações de safras e manter níveis de produtividade elevados ao longo dos anos. Nos últimos 10 anos, a média de produtividade do estado foi de 3,49 Mg ha⁻¹ para a cultura do milho e 2,05 Mg ha⁻¹ para a cultura da soja, podendo estas chegarem em produtividades de aproximadamente 12 Mg ha⁻¹ e 4,8 Mg ha⁻¹ respectivamente, em áreas irrigadas (CONAB, 2013).

A agricultura irrigada e seu incremento na produtividade estão diretamente relacionados com a utilização de sistemas de irrigação eficientes, os quais podem garantir retorno econômico considerável em relação ao investimento realizado pelo produtor, pois permite um melhor aproveitamento da água aplicada e maior número de colheitas em um determinado período de tempo (DANTAS NETO et al., 2009). Alves, Frizzone e Dourado Neto (2001), Santos et al. (2001) e Frizzone e Dourado Neto (2003), comprovaram que a irrigação utilizando sistemas de pivô central pode aumentar a produtividade das culturas e reduzir perdas por percolação de água e que estas melhorias resultam em benefícios econômicos e ambientais, devido a sua elevada uniformidade de distribuição da água.

O sistema de irrigação por pivô central é baseado no manejo da irrigação por aspersão, o qual gira em torno do seu próprio eixo em 360° é constituído de torres, lances,

motoredutores e é abastecido por uma adutora e um conjunto de moto-bomba, bombeando água de rio ou barragens para a irrigação.

O Brasil possui uma área irrigada total de 4.453.910 ha, sendo que desses, 840.050 ha utilizam pivô central (PAULINO et al., 2011). Já o RS, segundo especialistas na área de irrigação, atualmente possui uma área sob pivô central de aproximadamente 130.000 ha sejam manejados com auxílio da irrigação. De acordo com um levantamento realizado pela UERGS em 2017, na região das Missões do RS, aproximadamente 23 mil ha possuem algum tipo de sistema de irrigação.

2.2 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

A variabilidade na produtividade de uma cultura dentro do campo pode ser inerente ao tipo de solo ou propriedades do mesmo, clima ou induzida pelo manejo. Entre as modificações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo causadas por práticas de manejo, estão à compactação do solo pelas máquinas agrícolas, a variabilidade no estande das culturas e nos teores de nutrientes no solo devido à aplicação desuniforme de sementes, fertilizantes ou corretivos (PLANT et al., 1999). Desta forma, há a necessidade de estabelecer relações entre a produtividade das culturas e as propriedades do solo, bem como de outras variáveis, definindo os principais fatores de influência.

Pouca importância tem se dado aos atributos físicos do solo, os quais necessitam de maior atenção por parte dos produtores, principalmente em solos argilosos suscetíveis à compactação. Nos últimos anos, estudos direcionados aos parâmetros edáficos indicam a relação direta da compactação com a redução da produtividade, principalmente com o advento do sistema de plantio direto. Neste sistema tem sido observado o aumento da densidade do solo superficial, o qual é caracterizado pela maior resistência à penetração ou índice de cone (VIACHESLAV; ADAMCHUK; MOLIN, 2006).

Nas Regiões Noroeste e Missões do Estado do RS, é possível observar, ao longo dos anos, a ocorrência de períodos com déficit hídrico no verão, o que afeta de maneira significativa a produtividade das culturas. Além disso, predominam nesta região solos com textura argilosa, onde as condições físicas são muito sensíveis ao manejo adotado. Em trabalho realizado por Fiorin, Schnell e Ruedell (2007), observaram que, além da necessidade de correção dos indicadores da fertilidade do solo, a condição física do solo encontra-se acima dos níveis críticos, sendo que 36,0% e 69,6% das propriedades rurais pesquisadas apresentam

condições preocupantes de compactação superficial e subsuperficial, principalmente nas camadas de 0 a 0,07 m e de 0,07 a 0,14 m, respectivamente.

O processo de compactação caracteriza-se por mudanças resultantes de aumento de densidade, decréscimo no volume de macroporos, infiltração e movimento interno de água mais lentos e maior resistência mecânica ao crescimento das raízes, o que limita o desenvolvimento das culturas implantadas. Segundo Molin (2002), as principais causas da compactação estão relacionadas aos sistemas de manejo adotados, onde a perda da matéria orgânica (MOS) causa o adensamento do solo e influencia diretamente em sua resistência à penetração. Além disso, o uso de máquinas e implementos cada vez maiores e mais pesados, agrava ainda mais a condição de compactação dos solos, principalmente devido às condições de trabalho inadequadas, como o excesso de umidade.

A compactação do solo gera substancial alteração da estrutura do solo, desencadeando a reorganização das partículas e de seus agregados e podendo limitar a absorção de nutrientes, a infiltração e redistribuição de água, as trocas gasosas e o crescimento do sistema radicular, o que resultam no decréscimo da produtividade das culturas (ROQUE et al., 2008).

Entre as propriedades físicas afetadas pela compactação, a RP tem sido bastante estudada. Conforme Molin e Silva Júnior (2004), a medida da RP serve para identificar o estado de compacidade do solo. A eficiência da medida da RP como indicativo da compactação do solo, é obtida por esta apresentar relações diretas com o desenvolvimento das plantas e por ser mais eficiente na identificação de estados de compactação do solo. Sendo assim, a avaliação e o monitoramento das camadas de impedimento químico do solo ao desenvolvimento radicular, tornam-se ferramenta importante para caracterizar a evolução de sistemas agrícolas (CHERUBIN et al., 2011).

A resistência mecânica à penetração do solo é determinada com a utilização de equipamentos, os quais são denominados de penetrômetros, os quais consistem em instrumentos de medida que caracteriza a RP por um método uniforme padrão. A pressão necessária para cravar um cone circular de 30 graus até uma determinada profundidade no solo é um índice da resistência do solo e é chamado de índice de cone. De acordo com Molin et. al., (2011), o uso de penetrômetros para fins de diagnóstico de compactação do solo em grandes áreas exige tempo e dispêndio de mão-de-obra e, com as práticas de agricultura de precisão, a amostragem passa a ser georreferenciada e em grande quantidade.

Na literatura, ainda não há consenso sobre o valor de RP que seja crítico ou limitante ao desenvolvimento de raízes e produtividade das culturas, pois este pode variar com a espécie vegetal e até mesmo entre cultivares. Em geral, adota-se o valor de 2000 KPa como

crítico ao desenvolvimento radicular, em condição de capacidade de campo (CC). No entanto, para a análise das condições físicas do solo, devem ser levados em consideração os dados de umidade do solo na condição de CC, sendo que na prática, as medições quase nunca são realizadas quando o solo encontra-se nesta condição (CHERUBIN et al., 2011).

Gomes e Filizola (2006), classificam a compactação, levando em consideração índices de RP, onde 0 é considerado como ambiente ótimo ou não limitante ao enraizamento das plantas (RP < 1000 KPa); 0,5 como ambiente bom com pouca limitação ao enraizamento (RP entre 1000 a 2000 KPa); e 1 como ambiente restritivo ao enraizamento e não adequado ao crescimento de plantas (RP > 2000 KPa).

A determinação dos limites de RP geralmente ocorre em condições experimentais controladas em laboratório ou casa de vegetação. Reichert, Susuki e Reinert (2007), sugeriram alguns limites de RP considerando o crescimento radicular, sob condições de laboratório. Valores menores que 2500 KPa não apresentariam limitações ao crescimento radicular; valores entre 2600 e 10000 KPa causariam algumas limitações e valores superiores a 10000 KPa não possibilitariam o crescimento radicular. Taylor et al. (1966), trabalhando em condições controladas, indicaram RP > 2000 KPa como restritiva.

Segundo Reichert, Susuki e Reinert (2007), trabalhos experimentais realizados no campo com vistas em obter uma resistência crítica ou restritiva as plantas expressam, com mais segurança, a situação a que realmente as plantas estão sujeitas, como condições climáticas diferenciadas durante seu ciclo e heterogeneidade e bioporosidade do solo. Trabalhando no campo, Reichert, Susuki e Reinert (2007), estabeleceram como valor restritivo 3000 KPa.

Entre os atributos físicos, a densidade do solo acaba sendo o de maior relação com o processo de compactação. A diminuição de volume de macroporos interfere diretamente na aeração do solo, bem como no desenvolvimento radicular, sendo que em solos de elevada densidade, possíveis déficits hídricos são mais corriqueiros e têm seus efeitos potencializados. Entre as propriedades físicas, o teor de argila é a que mais influencia na densidade do solo, e consequentemente, na sua suscetibilidade à compactação.

Segundo Jimenez et. al. (2008), em solos compactados o número de macroporos é reduzido e a densidade é maior, o que, em solo seco, resulta em maior resistência física ao crescimento das raízes e decréscimo no potencial de água, enquanto em solo úmido gera falta de oxigênio, com consequente produção de etileno na zona de crescimento radicular. Desta forma, a agregação excessiva das partículas de solo, impede o crescimento normal das raízes, levando a modificações morfológicas e fisiológicas.

2.3 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Conhecer a variabilidade dos atributos químicos do solo é uma ferramenta importante no contexto de áreas irrigadas. Problemas básicos já se encontram amenizados através do uso de corretivos e fertilizantes à taxa fixa e variável nas áreas manejadas com o SPD. Porém, ainda se observa grande variabilidade das propriedades químicas ao longo do perfil do solo, devido à baixa dinâmica dos nutrientes neste sistema, ocasionando a concentração de nutrientes na superfície do solo (AMADO et al., 2006), tornando-o enriquecido na superfície, porém com algumas limitações em profundidade.

O mesmo comportamento desta camada superficial enriquecida pode ocorrer em áreas manejadas sob agricultura de precisão (AP), a qual se caracteriza por ser uma técnica moderna e eficiente de gerenciamento onde se obtém elevadas quantidades de informações coletadas, podendo contribuir para o estabelecimento de relações espaciais de atributos de solo com a produtividade das culturas (AMADO; GIOTTO, 2009), porém com esta técnica se intensificou a aplicação superficial de insumos agrícolas a qual contribui para este processo.

Com a larga adoção do sistema de plantio direto (SPD), o não revolvimento do solo, o aporte de resíduos vegetais e a rotação de culturas (GOULART, 2009) aliados a ciclagem e altas exportações de nutrientes pelas culturas, dentre outros fatores, levaram à reformulações de tabelas de adubações e critérios de recomendação de calagem (NOLLA; ANGHINONI, 2006). Para a manutenção do pH desejável as culturas em SPD consolidado, passou-se a aplicar e manutenção do calcário apenas em superfície (CQFS-RS/SC, 2016), preservando a integridade física do solo e, as fertilizações das culturas depositadas nos primeiros centímetros superficiais. Desta forma, a mobilidade vertical de nutrientes, sobretudo de cátions, em solos manejados em SPD passou a ser de interesse dos pesquisadores no entendimento da distribuição e disponibilidade em maior profundidade no perfil (WERLE; GARCIA; ROSOLEM, 2008).

Mais recentemente, as fertilizações à lanço na superfície do solo também passaram a ser comuns como ferramenta para melhorar a operacionalidade na propriedade e também na aplicação em taxa variável na agricultura de precisão. Porém, o que tem se observado na prática é que em algumas situações, solos manejados sob SPD apresentam um gradiente de fertilidade no seu perfil (NEIS et al., 2010). Tal gradiente mostra elevados teores de nutrientes nas camadas superficiais (SORATTO; CRUSCIOL, 2008; SCHLINDWEIN et al., 2013) e em algumas situações de alumínio tóxico nas camadas

inferiores (CIOTTA; BAYER; ERNANI, 2002) causando toxidez, distrofia e disfuncionalidade de raízes (MACHADO, 1997).

Diversos pesquisadores já têm caminhado em busca de alternativas para mitigar o problema do empobrecimento químico da subsuperfície do solo. Desta forma, a aplicação bem planejada de fertilizantes à taxa variada na agricultura de precisão, por exemplo, tem se mostrado como uma ferramenta eficiente com relação a disponibilidade de alguns nutrientes, excluindo-se a necessidade de inversão de camadas de solo. Nas áreas manejadas sob SPD de longa duração, tem se constatado ainda, que a manutenção inadequada (falta de rotação de culturas e ausência/insuficiência de palhada), pode haver o aumento da compactação do solo (COLLARES et al., 2008; NEIS et al., 2010), limitando o crescimento radicular e a taxa de infiltração de água no solo (REICHERT; SUSUKI; REINERT, 2007; DENARDIN; FAGANELLO; SANTI, 2009), que associado ao gradiente de fertilidade, pode estar potencializando perdas de nutrientes via escoamento superficial (DENARDIN; FAGANELLO; SATTTLER, 2008).

Na maioria das vezes, para mitigar esses problemas são necessárias intervenções mecânicas, como arações e/ou escarificações que, apesar de um efeito efêmero do ponto de vista físico (DRESCHER et al., 2011), são ferramentas eficientes no curto prazo.

2.4 SISTEMAS DE MANEJO

Nos últimos anos, tem-se observado um descumprimento dos preceitos básicos do Sistema Plantio Direto, o que reflete diretamente nas produtividades das principais culturas anuais cultivadas, tais como a soja e o milho. Segundo Denardin, Faganello e Sattler (2008), esse comportamento é fruto de uma visão equivocada do SPD, o qual é manejado simplesmente como plantio direto (PD). De acordo com Drescher et al. (2011), no PD há uma incipiente rotação de culturas com aporte de resíduos orgânicos aquém da demanda biológica do solo. Além disso, toda a fertilização do solo é realizada em superfície ou nos primeiros centímetros, bem como a calagem excessiva, tanto com relação à dose quanto em frequência de aplicação. Os autores também alertam para o excessivo e indiscriminado tráfego de máquinas agrícolas e para algumas situações o manejo inadequado da integração lavoura-pecuária.

Tais descumprimentos dos preceitos do SPD resultam na formação de uma camada subsuperficial compactada que restringe a infiltração de água e o aprofundamento radicular (REICHERT; SUSUKI; REINERT, 2007; COLLARES et al., 2008; DENARDIN;

FAGANELO; SANTI, 2009; NEIS et al., 2010) e, na concepção de alguns autores, a intervenção mecânica com escarificação se faz necessária para aliviar as repercussões negativas ao crescimento vegetal (DRESCHER et al., 2011). Além dessas desordens físicas, ocorre a formação de gradiente de fertilidade, com maiores disponibilidades de nutrientes nas camadas superficiais (SORATTO; CRUSCIOL, 2008; SCHLINDWEIN et al., 2013), limitando a absorção pelas plantas, principalmente quando da ocorrência de veranicos.

A função principal do escarificador é romper a camada compactada que se forma no solo, especialmente em áreas nas quais se adota o sistema de plantio direto. Nestas áreas é comum ocorrer o adensamento do solo, na profundidade de 15 à 20 cm, devido ao trânsito de máquinas e implementos. Com o uso do escarificador, rompe-se esta camada adensada que, num manejo associado ao estabelecimento de culturas para cobertura do solo durante o inverno e com o enraizamento destas no solo descompactado, promove uma maior infiltração de água. Isso permite um melhor desenvolvimento do sistema radicular das plantas e diminui os danos de erosão causados pelo escoamento da água das chuvas.

No mercado existem vários modelos de escarificadores, sendo o modelo Fox® da Empresa Stara S/A o mais usado no momento pelos agricultores, principalmente em área de plantio direto, diferenciando-se por realizar a descompactação em profundidade máxima de 26 cm, mantendo 70% da palhada no solo, proporcionando maior capacidade de armazenamento da água das chuvas, melhorando consideravelmente o ambiente para o desenvolvimento radicular das plantas e, conseqüentemente, a produtividade.

Além do método mecânico, a outra ferramenta que pode ser utilizada para aliviar a compactação do solo é o uso de culturas de cobertura envolvendo plantas caracterizadas por uma elevada produção de fitomassa e por raízes vigorosas e profundas, como o consórcio aveia preta + nabo forrageiro. Os resíduos produzidos por essas espécies aumentam o teor de matéria orgânica do solo, o que diminuiu a compactação do solo. As raízes dessas plantas são capazes de crescer através de camadas compactadas, gerando bioporos que favorecem a infiltração de água e aeração, além de se constituírem em caminhos por meio dos quais as raízes da soja e milho, menos agressivas, podem crescer (CUBILLA et al., 2002).

O uso de consórcio ou associação de plantas, ou mesmo coquetel de plantas (2, 3 ou mais espécies) é recomendável em razão da maior diversificação promovida, por reunir as vantagens/benefícios de diversas plantas ao mesmo tempo. Caso ocorra seca, ou mesmo ataque de pragas/doenças, normalmente o coquetel fica menos susceptível porque pelo menos algumas plantas poderão se desenvolver. O sistema radicular diferenciado, explorando diferentes camadas do perfil do solo, reciclando diferencialmente os nutrientes e promovendo

efeitos diversos no solo, devido à produção de diferentes tipos de ácidos orgânicos, tende a promover melhores efeitos nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo.

Na adoção de plantas de cobertura no período que antecede a cultura principal, é relevante priorizar plantas que tenham capacidade de fixação biológica de nitrogênio (N), ou mesmo, plantas com alta capacidade de ciclagem de nutrientes. Assim, além dos benefícios como cobertura do solo também propicia benefícios às culturas sucessoras economicamente mais rentáveis (FIORIN; SCHNELL; RUEDELL, 2007).

As áreas de SPD apresentam inúmeras características próprias que exigem manejo diferenciado, principalmente na fertilidade. Essas características são decorrentes, principalmente do não revolvimento do solo e do acúmulo progressivo de restos culturais, da adubação sucessiva em sulcos ou a lanço, da sucessão de plantas adotada nas rotações de culturas, tanto em relação à quantidade quanto à qualidade da biomassa produzida, da dinâmica da água no solo e da condição diferenciada em relação a pragas, doenças e plantas invasoras (CREMON et al., 2009). Isso levou pesquisadores a buscar um melhor entendimento da dinâmica dos nutrientes sob essas condições, sobretudo na mobilidade no perfil do solo como forma de disponibilizá-los eficientemente às plantas (WERLE; GARCIA; ROSOLEM, 2008).

O uso do gesso agrícola tem sido apontado como uma ferramenta usual no melhoramento químico do perfil do solo seja como carreador de cátions para as camadas subsuperficiais (QUAGGIO et al., 1993; RAMPIM et al., 2011; SERAFIM et al., 2012; RAMOS et al., 2013), ou como alterador das formas tóxicas de alumínio em subsuperfície (SORATTO; CRUSCIOL, 2008; RAMPIM et al., 2011), contribuindo desta forma, diretamente no crescimento radicular (SOBRAL; CINTRA; SMYTH, 2009). Os benefícios indiretos do gesso na produção de grãos se devem em decorrência do incremento de Ca^{2+} , relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ e do S-SO_4^{2-} disponíveis no solo (CAIRES et al., 1999, 2001), aumentando a concentração desses nutrientes no tecido das plantas, e pelo maior crescimento radicular na exploração de um maior volume de solo em profundidade.

3. HIPÓTESES

- O uso combinado de estratégias de manejo mecânico, biológico e químico é mais eficiente do que o uso isolado das mesmas e resulta em incremento de produtividade das culturas de soja e milho em Sistema Plantio Direto irrigado.
- O uso de estratégias combinadas gera incrementos de produtividade e aumenta o retorno econômico da atividade.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar a resposta de sistemas de manejo do solo sobre as propriedades físicas e químicas do solo e a produtividade das culturas em áreas irrigadas por pivô central.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o impacto do uso da escarificação mecânica e biológica associado ao uso de calcário e gesso agrícola sobre as propriedades químicas e físicas do solo ao longo do seu perfil;
- Avaliar a produtividade das culturas do milho e da soja nos diferentes sistemas de manejo do solo, bem como estimar o retorno econômico dos tipos de manejo por meio de análise econômica.

5. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

5.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em uma área comercial situada na localidade de São Lourenço das Missões no município de São Luiz Gonzaga, pertencente à Mesorregião Noroeste, também conhecida como Missões, no Estado do Rio Grande do Sul nas safras de soja e milho de 2015/16, 2016/17 e 2017/18, nas quais a soja era cultivada durante o período caracterizado como safrinha.

A área é de propriedade dos irmãos Rogério Pieniz e Romar Pieniz, a qual é pioneira na região em Agricultura de Precisão, com início ao Programa de AP da COOPATRIGO, em abril de 2008. Nesta área também está alocada a pesquisa pertencente ao Projeto Cooperativo de Agricultura de Precisão do Rio Grande do Sul (APcoop), servindo como área piloto de pesquisa do convênio com a Cooperativa Central Gaúcha Ltda. (CCGL TEC/FUNDACEP), em parceria com a Universidade Federal de Santa Maria. A área vem sendo conduzida desde o ano de 1995 sob o sistema de plantio direto, com o cultivo de monoculturas comerciais como o trigo (*Triticum aestivum*), aveia preta (*Avena strigosa*), soja (*Glycine max* L.), e o milho (*Zea mays*), principais culturas utilizadas na região. Porém, a falta de uso de plantas de cobertura com potencial de acúmulo de palha, ciclagem de nutrientes e de descompactação do solo vem comprometendo o funcionamento do sistema de plantio direto na propriedade.

Na tabela 1 está descrita a caracterização inicial dos atributos químicos e da resistência à penetração da área experimental

Tabela 1. Atributos químicos avaliados anteriormente à implantação dos tratamentos na área experimental.

Prof.	pH	SMP	Ca	Mg	Al ⁺³	CTC _{pH7}	S	P	MOS	m	V	Argila	RP
cm	H ₂ O						- mg dm ⁻³			%			KPa
0-5	5,5	5,8	8,8	3,2	0,0	18,1	8,7	12,3	4,2	0,0	71,0	50,0	948,3
5-10	5,1	5,4	5,7	1,7	0,3	16,1	9,7	7,7	4,5	3,0	50,0	51,0	3342,6
10-15	5,0	5,3	5,6	2,4	0,6	17,4	17,7	8,1	3,9	6,0	49,0	56,0	4232,6
15-20	4,8	5,3	5,1	1,7	1,1	16,0	36,6	19,9	2,9	13,0	44,0	48,0	3940,6
20-25	4,8	5,4	4,1	1,5	1,4	13,8	20,1	2,4	2,2	19,0	42,0	54,0	3419,6
25-30	4,8	5,4	3,4	1,1	1,1	12,6	16,0	1,5	1,8	20,0	37,0	65,0	3483,4
30-35	4,8	5,3	4,0	1,5	1,3	14,5	24,4	1,3	1,9	18,0	39,0	51,0	3631,0
35-40	4,8	5,5	1,8	0,8	1,0	9,9	13,4	1,2	1,8	27,0	27,0	72,0	4172,3

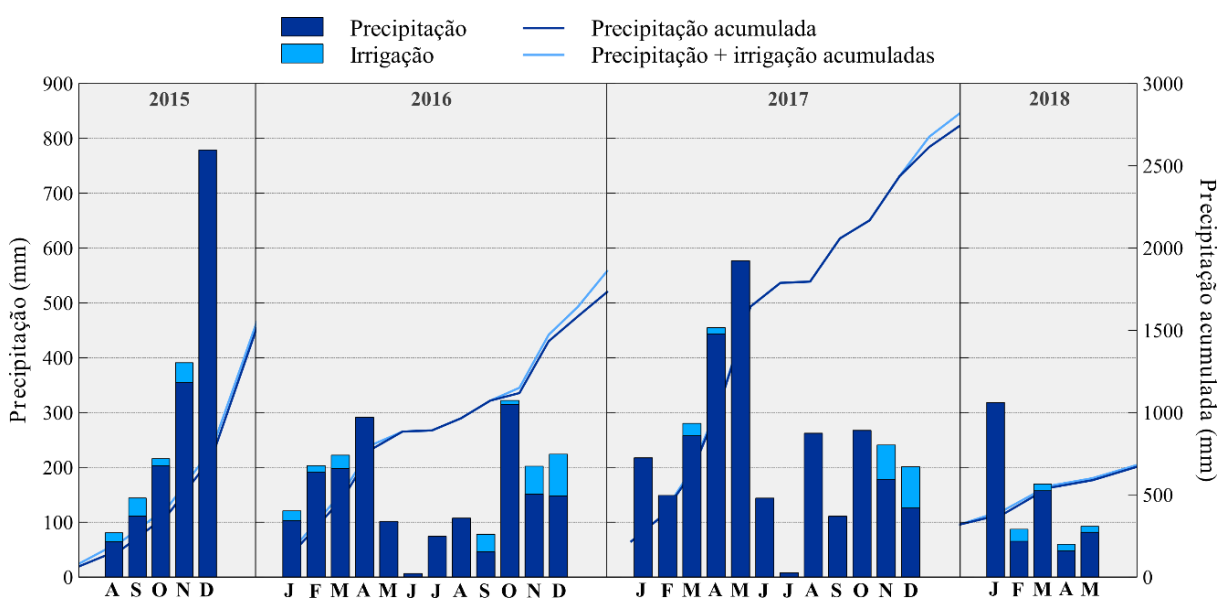
Prof. – profundidade; pH - potencial hidrogeniônico; SMP – medida da acidez potencial; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Al⁺³ – Alumínio; CTC_{pH7} – capacidade de troca de cátions; S – enxofre; P – fósforo; MOS – matéria orgânica do solo; m – saturação por alumínio; V – saturação por bases; RP – resistência à penetração do solo.

A área possui 23,60 hectares, situada no meridiano 54 entre as coordenadas geográficas S 28°25'44" e W54°44'02", com altitude aproximada de 245 metros. Nessa região, o relevo é suave ondulado, com predominância de solos de textura argilosa, bem drenados, profundos a muito profundos. De acordo com Embrapa (2018) o solo da área estudada classifica-se como Latossolo Vermelho Distrófico típico pertencente à Unidade de Mapeamento Santo Ângelo.

Quanto ao histórico do manejo de correção do solo na área, o mesmo vem sendo realizado pelo sistema de Agricultura de Precisão, tendo a primeira intervenção no ano de 2010, e a segunda no ano de 2013, onde em ambas as correções foram aplicados calcário, superfosfato triplo e cloreto de potássio seguindo as recomendações do Projeto (APcoop), para elevar o pH a 5,75, o fósforo a 14 mg dm⁻³ e o potássio a 180 mg dm⁻³ no solo.

O clima da região, segundo classificação Köppen (1938), é do tipo Cfa – subtropical úmido, com precipitação média anual elevada e bem distribuída ao longo do ano, e subtropical do ponto de vista térmico. A temperatura média anual é próxima a 18°C, com máximas no verão podendo atingir 41°C e mínimas no inverno atingindo valores inferiores a 0°C. A precipitação e irrigação mensais durante o período experimental estão ilustradas no gráfico 1.

Figura 1. Precipitação e irrigação mensais e acumuladas durante o período experimental.

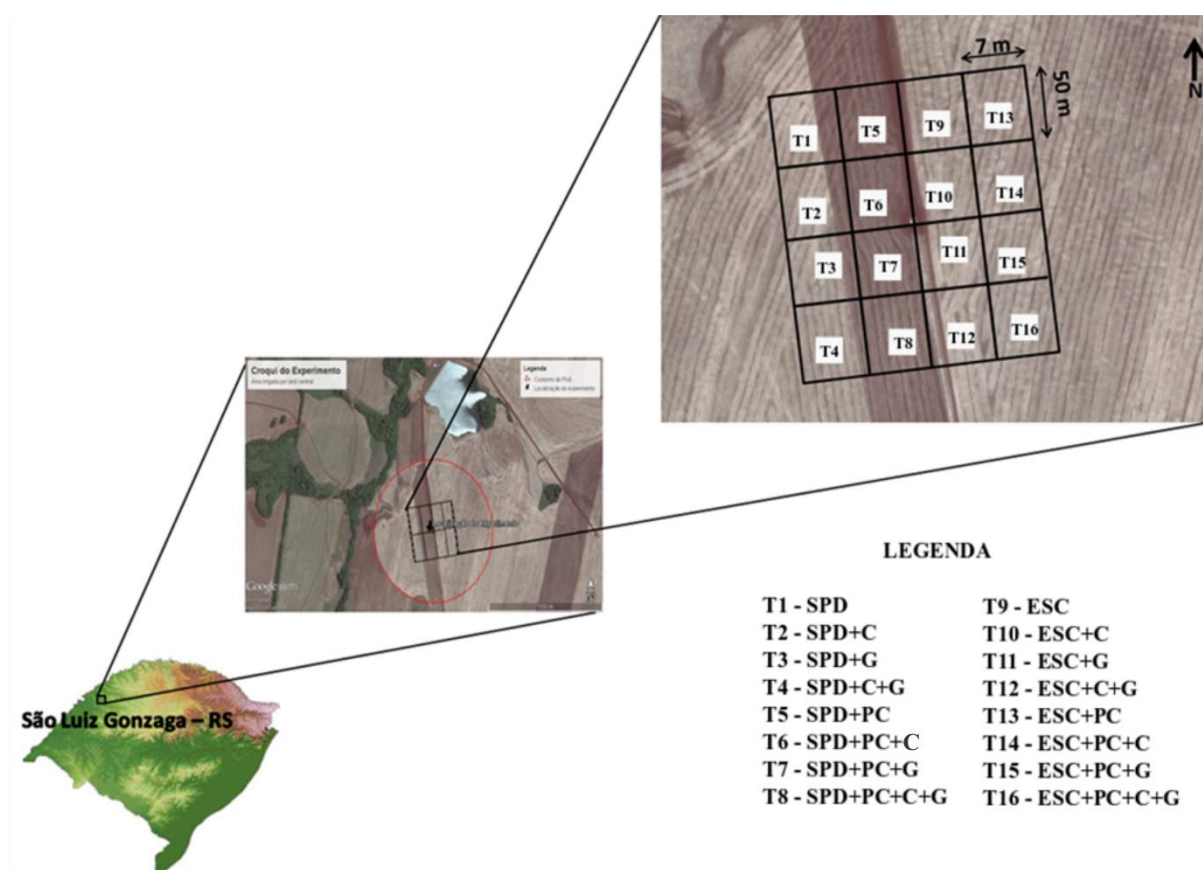


J – janeiro; F – fevereiro; M – março; A – abril; M – maio; J – junho; J – julho; A – agosto; S – setembro; O – outubro; N – novembro; D – dezembro.

5.2 IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido em esquema trifatorial (Figura 2), com sistemas de manejo (parcela principal), tipo de cobertura de solo (subparcela) e condicionadores de solo (subsubparcela). A parcela principal foi constituída por dois sistemas de manejo: a) Plantio Direto (PD) e b) Escarificação (ESC). A subparcela foi constituída por dois tipos de cobertura: a) Sem cobertura (SC), b) Associação de Aveia Preta (AV) (*Avena strigosa* Schieb.) com Nabo Forrageiro (CC) (*Raphanus sativus* L.). A subsubparcela foi composta por um corretivo e um condicionador de solo: a) Calcário e b) Gesso Agrícola, respectivamente.

Figura 2. Representação esquemática do desenho experimental e da localização do experimento no município de São Luiz Gonzaga-RS.



SPD – Sistema Plantio Direto; PC – Plantas de cobertura; C – calcário; G – Gesso; ESC – escarificação.

Na parcela principal (sistema de manejo), o PD constituiu-se na mobilização do solo apenas na linha de semeadura, permanecendo as entrelinhas intactas e cobertas pelos resíduos da cultura anterior e a ESC foi realizada com a utilização do escarificador Fox® (Stara S/A),

com sete hastes na profundidade média de 0,26 m. A semeadura em ambos os sistemas de manejo, foi realizada com semeadora Prima 4590 Stara. A escarificação foi realizada apenas no início do experimento.

As subparcelas (plantas de cobertura) foram implantadas no início de abril de 2015, 2016 e 2017 com o consórcio de aveia e nabo forrageiro. A semeadura foi realizada em linha utilizando 80 kg ha⁻¹ e 20 kg ha⁻¹ de sementes viáveis, respectivamente, com espaçamento entre linhas de 0,175 m.

As subsubparcelas (uso de calcário e gesso) foram formadas com aplicação a lanço de 3,0 Mg ha⁻¹ de calcário (PRNT 70%) antes da escarificação e de 3,0 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola no mês de julho de 2015, 2016 e 2017 (antes da semeadura do milho) pelo distribuidor a taxa variável Hércules 24000® (Stara S/A). As doses de calcário seguiu a recomendação proposta pelo CQFS-RS/SC (2016).

A cultura do milho foi implantada utilizando o híbrido AG 9025 PRO3 nas três safras (2015/16, 2016/17 e 2017/18). A adubação da cultura do milho foi realizada em quatro etapas: antes da semeadura, com adubação a lanço de 200 kg ha⁻¹ de KCl; durante a semeadura, com aplicação em linha de 350 kg ha⁻¹ de um fertilizante formulado (07-24-00 - Top Phos724), o qual possuía 11% de cálcio e 7% de enxofre em sua composição, e em cobertura, nas fases V4 e V6, com a aplicação à lanço de 250 kg ha⁻¹ de Sulfammo (22% de nitrogênio, 5% de cálcio e 9% de enxofre) e 200 kg ha⁻¹ de ureia, respectivamente.

Após a colheita do milho nos três anos agrícolas, foi realizada a semeadura da cultura da soja (cultivar TEC 7849 IPRO). A adubação desta cultura foi realizada em duas etapas, antes da semeadura, com aplicação à lanço de 100 kg ha⁻¹ de KCl, e durante a semeadura, com a aplicação em linha de 300 kg ha⁻¹ de um fertilizante formulado (03-28-00 - Top Phos280), o qual possuía 17% de cálcio e 7% de enxofre.

5.3 DESCRIÇÃO DAS AVALIAÇÕES REALIZADAS

5.3.1 Coleta de Solo

Para a determinação das propriedades químicas do solo, em cada tratamento foram coletadas amostras de solo para análise química (pH, Ca, Mg, Al, MOS, m, V e CTC) seguindo metodologia proposta por Tedesco et al. (1995), nas profundidades 0-0,5; 0,5-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25; 0,25-0,30 e 0,30-0,40 m. As determinações químicas de pH em H₂O foram feitas por potenciômetro na suspensão solo-água na proporção de 1:1, teor de

Al obtido na extração com KCl 1 mol L⁻¹ e titulado com NaOH 0,0125 mol L⁻¹, Ca e Mg obtidos na extração com KCl 1 mol L⁻¹ e P e K no solo extraídos pelo método do extrator duplo ácido Mehlich-I e determinados por espectroscopia e fotometria de chama, respectivamente.

5.3.2 Avaliação da resistência mecânica à penetração do solo

A RP foi determinada através de 3 leituras dentro de um raio máximo de 5 m em relação ao ponto central georreferenciado de cada repetição, por meio do penetrômetro manual, seguindo-se à norma ASAE S 313.3 (ASABE, 2009). Os registros ocorrem através de uma célula de carga e por intermédio da inserção da haste, com velocidade automatizada em 0,024 m s⁻¹. O equipamento foi configurado para registrar leituras a cada 0,01 m, da superfície do solo até a profundidade de 0,38 m.

5.3.3 Avaliação da produtividade

Os dados de produtividade das culturas do milho e da soja foram obtidos através de colheita mecanizada pela colhedora da marca New Holland Modelo NH8055 e posterior pesagem em balança digital e correção para umidade de 13% na unidade da Coopatrigo em São Lourenço das Missões para obtenção da massa de grãos.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os efeitos dos tratamentos sobre a produtividade foram submetidos à análise de variância (anova), seguido de análise descritiva dos dados, fazendo uso da média e do erro padrão. Quando houve interação significativa entre os sistemas de manejo, tipos de cobertura e corretivo mais condicionador do solo, o efeito sobre produtividade, as propriedades físicas e químicas do solo foi analisado através do Teste de Tukey a 5% de significância, com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2018).

6. ARTIGO I - ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE SOLO PARA CULTURAS DE GRÃOS EM ÁREA IRRIGADA POR PIVÔ CENTRAL

6.1 RESUMO

O Sistema Plantio Direto trouxe diversas melhorias físicas, químicas e biológicas no solo, no entanto, tais melhorias se restringem às camadas superficiais, limitando o desenvolvimento radicular em subsuperfície. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi investigar o efeito da melhoria da qualidade química e física da camada de enraizamento, pelo uso do gesso (G), calcário (C), plantas de cobertura (PC) e escarificação (ESC) de forma isolada e combinada, sobre a produtividade de soja e milho em área irrigada. O delineamento utilizado seguiu um esquema trifatorial, no qual a parcela principal foi o sistema de manejo (SPD ou ESC), a subparcela o uso de PC e a subsubparcela o uso de C e G. O uso de PC em SPD, teve efeito semelhante à ESC na redução da resistência a penetração do solo e a combinação da ESC com PC apresentou os menores valores desse indicador. A melhoria química foi observada pelo tratamento ESC+PC+C+G, o qual apresentou as maiores produtividades de soja e milho.

Palavras-chave: gesso; calcário; plantas de cobertura; escarificação; camada de enraizamento.

6.2 ABSTRACT

The no-till system (NTS) brought physical, chemical and biological improvement in the soil, however, these improvements are restricted to surface layers, limiting the root development in the subsurface. In this scenario, the aim of this study was to investigate the effect of the chemical and physical improvement improvement of the soil rooting layer, by the use of the gypsum (G), limestone (C), cover crops (PC) and chiseling (ESC) applied isolated and combined, in the soybean and maize yields in long term NTS in an irrigated field. The experimental design was of a trifactorial scheme, with the principal parcel constituted by the management system, the subparcel by the PC and de subsubparcel by the C and G uses. The use of the PC in the SPD had a similar effect to ESC in the reduction of soil penetration resistance and the association of the ESC with PC result the lower values of these parameter. The chemical improvement was observed by the ESC+PC+C+G, that present the higher increases of soybean and corn yields.

Keywords: gypsum; limestone; cover crops; chiseling; rooting layer.

6.3 INTRODUÇÃO

A irregularidade da distribuição da precipitação pluviométrica e, conseqüentemente, da disponibilidade de água em períodos críticos do desenvolvimento das culturas tem sido reconhecida como um dos principais fatores, responsáveis pela variabilidade temporal dos rendimentos nas culturas de milho e soja (LAMB et al., 1997; BAKHSH et al., 2001; MIAO; MULLA; ROBERT, 2006). Nos últimos 10 anos, a média de produtividade do estado foi de 3,49 Mg ha⁻¹ para a cultura do milho e 2,05 Mg ha⁻¹ para a cultura da soja, sendo que em áreas irrigadas, esses valores pode alcançar 12 Mg ha⁻¹ e 4,8 Mg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2013).

No entanto, a eficiência do uso da irrigação para atender plenamente a demanda das plantas está relacionada com a taxa de infiltração, armazenamento de água no solo, disponibilidade de água às plantas (AMADO et al., 2009) e profundidade do sistema radicular ao longo do perfil do solo. A ocorrência de impedimentos químicos e físicos tem reduzido o aprofundamento do sistema radicular das culturas, intensificando os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre a produtividade de grãos (DENARDIN; FAGANELLO; SATTLER, 2008; WINGEYER et al., 2015).

A dificuldade de realizar melhorias químicas nas camadas subsuperficiais em SPD se dá pela lenta movimentação vertical do calcário, devido à ausência de incorporação mecânica deste corretivo (BORTOLUZZI et al., 2014). Notadamente, nos Latossolos ácidos, a aplicação superficial de calcário, em doses reduzidas e espaçadas em intervalos longos de tempo, geralmente resulta na formação de um perfil com acentuado gradiente vertical de qualidade química entre a camada superficial e o subsolo (CAIRES, 2013; BORTOLUZZI et al., 2014; DALLA NORA et al., 2014).

A barreira química ao aprofundamento do sistema radicular, induzida pelo elevado teor de alumínio (Al³⁺) e baixo teor de cálcio (Ca²⁺), compromete a eficiência no uso da água armazenada no solo, e por isto, intensifica o impacto de estresse hídrico de curta duração sob a produtividade das culturas (DALLA NORA et al., 2014; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Assim, a ocorrência de gradiente vertical de qualidade química na camada de enraizamento (CE) contribui para a instabilidade temporal da produtividade em regiões tropicais.

Como alternativa para redução dos efeitos do impedimento químico observado em Latossolos sob SPD, a aplicação combinada do gesso e calcário tem revelado um efeito de interação entre os produtos, com resultados superiores ao efeito isolado de cada insumo

(RAIJ, 2010; DALLA NORA et al., 2014). Ao passo que o calcário eleva o pH e os teores de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) na superfície do solo, o gesso, insumo de maior solubilidade que o calcário, se dissocia liberando cálcio e sulfato (S-SO_4^{2-}) (RAIJ, 2010). Com isso, há uma rápida lixiviação do S-SO_4^{2-} para as camadas mais profundas do perfil, que ao se movimentar verticalmente, favorece a movimentação de cátions como é o caso do Ca^{2+} , Mg^{2+} e em menor quantidade o potássio (K^+) (RAIJ, 2010). Além disso, ocorre a formação do complexo AlSO_4^{4+} que possui menor atividade e, conseqüentemente, tem seu efeito tóxico reduzido, favorecendo o desenvolvimento radicular das culturas (DALLA NORA; AMADO, 2013; BLUM et al., 2014; WATTS; DICK, 2014).

Em relação aos impedimentos físicos ao aprofundamento do sistema radicular, estudos direcionados aos parâmetros edáficos indicam a relação direta da compactação com a redução da produtividade, principalmente com o advento do SPD. Em sistemas de semeadura direta tem sido observado aumento da densidade do solo subsuperficial, tendo como consequência maior resistência à penetração ou índice de cone (VIACHESLAV; ADAMCHUK; MOLIN, 2006).

Nas Regiões Noroeste e Missões do Estado do RS, é possível observar que, ao longo dos anos, a ocorrência de períodos com déficit hídrico no verão afetam de maneira significativa a produtividade das culturas. Além disso, nestas regiões predominam solos com textura argilosa, em que as condições físicas são muito sensíveis ao manejo adotado. Em pesquisas realizadas por Fiorin, Schnell e Ruedell (2007), observaram que, além da necessidade de correção dos indicadores da fertilidade do solo, a condição física encontrava-se acima dos níveis críticos, sendo que 36,0% e 69,6% das propriedades rurais pesquisadas apresentaram situação preocupante em relação as condições de compactação do solo nas camadas de 0 a 0,07 m e de 0,07 a 0,14 m, respectivamente.

O processo de compactação caracteriza-se por mudanças resultantes do aumento de densidade, decréscimo no volume de macroporos, infiltração e movimento interno de água mais lentos associados a maior resistência mecânica à penetração das raízes, o que limita o crescimento e desenvolvimento das raízes.

Estratégias biológicas como a utilização de culturas de cobertura em consórcio ou pastagens na entressafra e a adição frequente de adubação orgânica também podem contribuir para a melhoria da camada de enraizamento (CE) do solo sob SPD. O uso alternado de culturas de grãos com o cultivo de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo resulta na melhoria da estrutura do solo, além de incrementar o aporte de N, como é o caso das culturas do nabo forrageiro e da ervilhaca. O consórcio dessas culturas resulta no aumento

da quantidade e da qualidade de resíduos aportados e possuem efeitos positivos na fertilidade das camadas superficiais e subsuperficiais do solo (AMADO; GIOTTO, 2009).

Um exemplo frequentemente observado em lavouras do RS é a formação de canais pelo sistema radicular do nabo forrageiro que favorece o crescimento das raízes do milho ou de trigo em sucessão. A ausência de preparo do solo, como no plantio direto contínuo, permite que esta condição física seja preservada e aproveitada pela cultura cultivada em sequência. Além disso, a presença de raízes das culturas de cobertura e de pastagens favorece o aprofundamento do sistema radicular das culturas de grãos cultivados em sucessão, devido a liberação de exsudatos pelas raízes das plantas, os quais são aportados ao solo estimulando a biota e a melhoria física e química do solo na área da rizosfera (AMADO; GIOTTO, 2009).

Nesse contexto, o objetivo principal deste estudo foi investigar o efeito da melhoria da qualidade química e física da camada de enraizamento, pelo uso do gesso, calcário e plantas de cobertura de forma isolada e combinada, sobre a produtividade de soja e milho em SPD contínuo em área irrigada.

6.4 MATERIAL E MÉTODOS

6.4.1 Caracterização da área experimental

O experimento localiza-se em uma lavoura comercial com sistema de irrigação por pivô central pertencente ao município de São Luiz Gonzaga, Noroeste do Rio Grande do Sul, nas coordenadas 28°25'44"S e 54°44'02"O e com altitude de 245 m. O solo da área experimental é caracterizado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2018). O clima da região é classificado, de acordo com Köppen (1938), como Cfa (subtropical úmido) e a temperatura média do local é de 18°C. Foram avaliadas três safras de milho e três safras de soja (2015/16, 2016/17 e 2017/18), nas quais o cultivo do milho antecedia a semeadura da cultura da soja.

Os atributos químicos e a resistência mecânica à penetração do solo antes da aplicação dos tratamentos estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos avaliados anteriormente à implantação dos tratamentos na área experimental.

Prof.	pH	SMP	Ca	Mg	Al ³⁺	CTC _{pH 7}	S	P	MOS	m	V	Argila	RP
cm	H ₂ O												KPa
0-5	5,5	5,8	8,8	3,2	0,0	18,1	8,7	12,3	4,2	0,0	71,0	50,0	948,3
5-10	5,1	5,4	5,7	1,7	0,3	16,1	9,7	7,7	4,5	3,0	50,0	51,0	3342,6
10-15	5,0	5,3	5,6	2,4	0,6	17,4	17,7	8,1	3,9	6,0	49,0	56,0	4232,6
15-20	4,8	5,3	5,1	1,7	1,1	16,0	36,6	19,9	2,9	13,0	44,0	48,0	3940,6
20-25	4,8	5,4	4,1	1,5	1,4	13,8	20,1	2,4	2,2	19,0	42,0	54,0	3419,6
25-30	4,8	5,4	3,4	1,1	1,1	12,6	16,0	1,5	1,8	20,0	37,0	65,0	3483,4
30-35	4,8	5,3	4,0	1,5	1,3	14,5	24,4	1,3	1,9	18,0	39,0	51,0	3631,0
35-40	4,8	5,5	1,8	0,8	1,0	9,9	13,4	1,2	1,8	27,0	27,0	72,0	4172,3

Prof. – profundidade; pH - potencial hidrogeniônico; SMP – medida da acidez potencial; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Al³⁺ – Alumínio; CTC_{pH7} – capacidade de troca de cátions; S – enxofre; P – fósforo; MOS – matéria orgânica do solo; m – saturação por alumínio; V – saturação por bases; RP – resistência à penetração do solo.

6.4.2 Delineamento experimental

O delineamento utilizado seguiu um esquema trifatorial, no qual a parcela principal era constituída pelo sistema de manejo (Plantio Direto ou escarificado), a subparcela era constituída do uso de plantas de cobertura (ausência ou presença) e a subsubparcela representava o uso de calcário e gesso (ausência, presença isolada e presença combinada).

6.4.3 Determinação da resistência à penetração do solo

A avaliação da Resistência à Penetração do solo (RP) foi realizada ao final do experimento através do uso de um penetrômetro manual. As leituras foram realizadas a cada centímetro até 38 cm de profundidade através de uma célula de carga e inserção da haste à uma velocidade de 0,024 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° (ASABE, 2009).

6.4.4 Coleta e análise de solo

A análise de solo foi realizada ao final do experimento nas profundidades de 0-0,5; 0,5-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25; 0,25-0,30 e 0,30-0,40 m, nas quais foram realizadas a determinação de: pH, Ca, Mg, Al, MOS, m, V e CTC seguindo a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995).

6.4.5 Determinação da produtividade de milho e soja

A produtividade de milho e soja nas três safras avaliadas foram determinadas através da colheita mecanizada dessas culturas com o uso de uma colhedora da marca New Holland (Modelo NH8055). A umidade de grãos foi corrigida para 13%.

6.4.6 Análise estatística

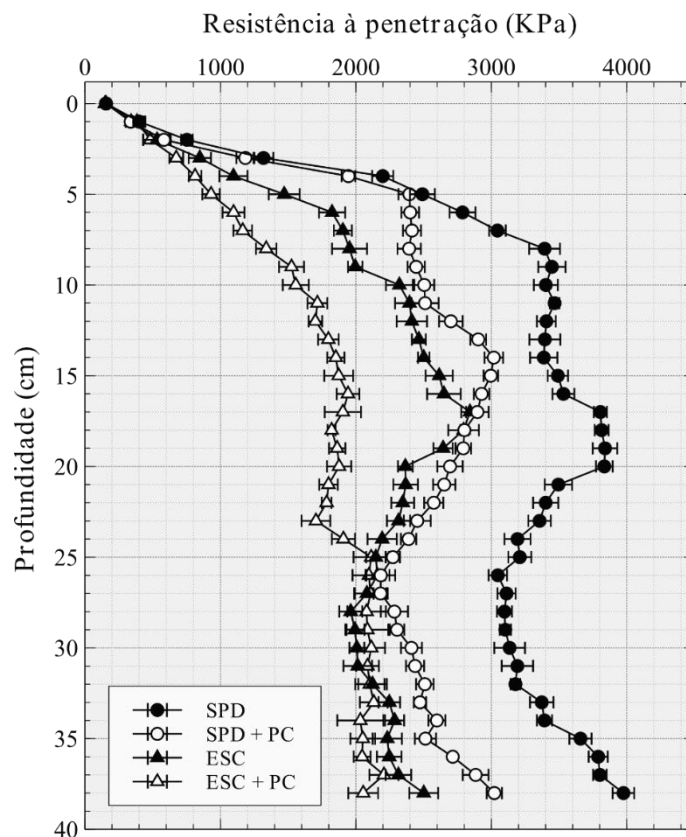
Os efeitos dos tratamentos sobre a produtividade foram submetidos à análise de variância (anova), seguido de análise descritiva dos dados, fazendo uso da média e do erro padrão. Quando houve interação significativa entre os sistemas de manejo, tipos de cobertura e corretivo mais condicionador do solo, o efeito sobre produtividade, as propriedades físicas e químicas do solo foi analisado através do Teste de Tukey a 5% de significância, com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2018).

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.5.1 Resistência à penetração do solo afetada pela aplicação dos tratamentos

Pode-se verificar que todos os tratamentos, exceto o ESC+PC, apresentaram valores de RP, a partir de 0,09 m de profundidade, superiores à 2000 KPa (Fig. 1), o que representa valores superiores ao limite crítico para o desenvolvimento das raízes das plantas.

Figura 1. Resistência mecânica à penetração do solo após a aplicação dos tratamentos.



SPD – Sistema Plantio Direto; SPD+PC – Sistema Plantio Direto + plantas de cobertura; ESC – Escarificação; ESC+PC – Escarificação + plantas de cobertura.

A resistência mecânica à penetração do solo 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).

Independente da associação com a escarificação, o uso de plantas de cobertura promoveu a redução dos valores de RP do solo em relação à testemunha, o que corrobora com o encontrado por Chen e Weil (2010), Debiasi, Levien e Trein (2010) e Valicheski et al. (2012).

O uso isolado da escarificação também foi eficiente na redução da RP, Reinert et al. (2008) reportam a importância do uso de métodos mecânicos de descompactação em solos com elevada compactação, no entanto, os efeitos benéficos desta operação podem ser observados por menos tempo, como o reportado por Drescher et al. (2016) e Reichert et al. (2009).

O uso associado da escarificação e plantas de cobertura (ESC + PC) foi mais eficiente na redução da RP, Nicoloso et al. (2008) mostram que os efeitos da descompactação mecânica e biológica associadas é eficiente na redução da RP do solo e, além disso, podem ser observados por mais tempo, como reportado por Fin et al. (2018).

6.5.2 Atributos químicos afetados pela aplicação dos tratamentos

A descrição dos atributos químicos do solo após 32 meses à implantação dos experimentos encontra-se na tabela 2. É possível constatar a melhoria química dos atributos ao longo do perfil nos tratamentos que foram submetidos a aplicação de calcário e gesso, tanto em SPD como em ESC. No estado do RS e SC, a recomendação de uso de corretivos agrícolas no SPD é baseada em uma camada superficial do solo (0,00-0,10 m) com as seguintes características de acidez: $\text{pH H}_2\text{O} < 5,5$; $V < 65\%$ e saturação por Al $> 10\%$ (CQFS RS/SC, 2016). A área experimental apresentava alguns destes atributos abaixo dos valores críticos, sugerindo elevada probabilidade de resposta ao uso de corretivo.

Na figura 2a é possível observar que o pH do solo em SPD apenas na camada de 0-5 cm apresentou valor dentro do recomendado, com elevado decréscimo ao longo do perfil. O uso da ESC+PC+C+G teve efeito na camada de 0-35 cm comparado ao tratamento SPD, elevando o pH acima de 5,5 até a profundidade de 15 cm. Já o SPD+PC+C+G apresentou comportamento intermediário, com efeito limitado a camada de 0-10 cm.

Tabela 2. Descrição dos atributos químicos do solo após 32 meses a implantação dos tratamentos.

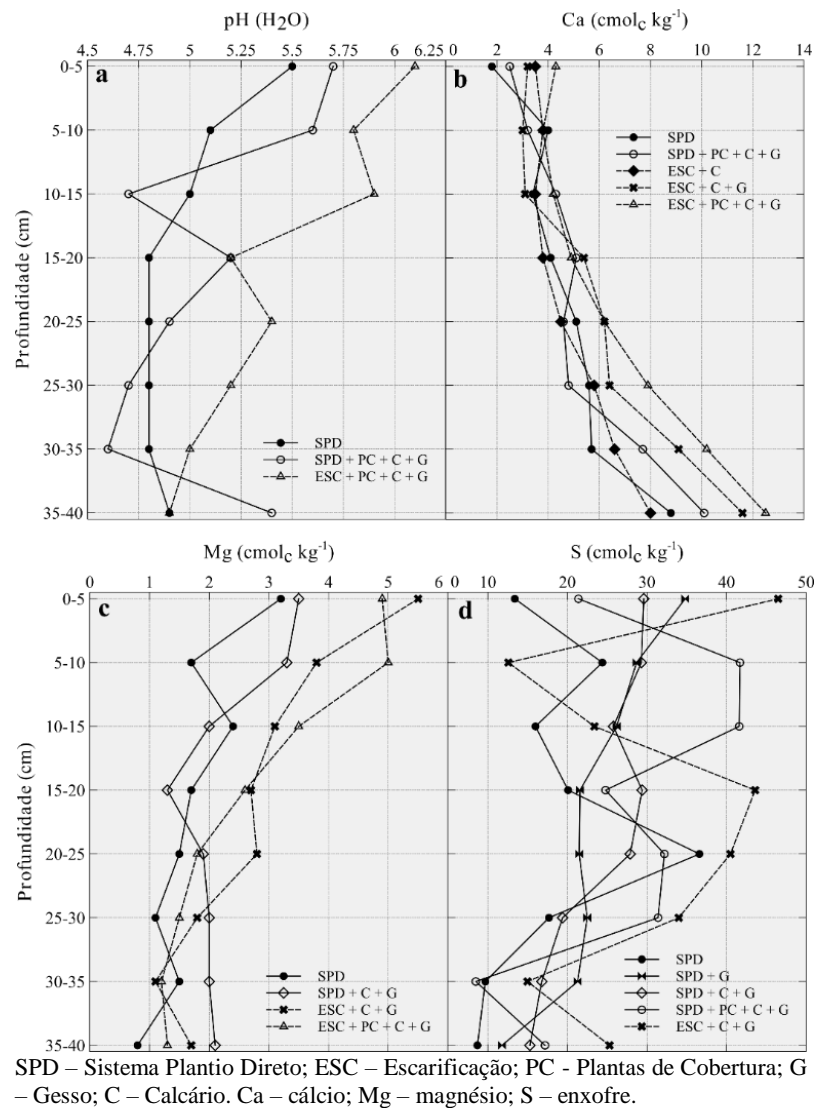
Prof (cm)	Tratamentos															
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
pH (H₂O)																
0-5	5.5	5.8	5.4	5.4	5.3	5.8	5.3	5.7	5.4	5.4	5.3	5.9	5.5	6.0	5.4	6.1
5-10	5.1	5.0	4.9	5.8	4.8	5.6	5.0	5.6	5.1	5.1	5.2	5.4	5.3	6.1	5.0	5.8
10-15	5.0	5.6	5.2	5.0	4.5	5.1	4.8	4.7	4.9	4.8	4.7	5.0	4.9	5.2	4.6	5.9
15-20	4.8	4.8	5.0	4.7	4.4	4.6	4.9	5.2	4.9	4.5	4.8	5.2	4.8	5.7	4.5	5.2
20-25	4.8	4.8	4.7	4.7	4.4	4.6	4.7	4.9	4.9	4.5	4.8	4.8	4.7	5.1	4.6	5.4
25-30	4.8	4.6	4.7	4.6	4.4	4.6	4.9	4.7	4.8	4.5	4.8	4.9	4.6	5.0	4.6	5.2
30-35	4.8	4.5	4.7	4.6	4.4	4.9	4.9	4.6	4.6	4.5	4.7	4.8	4.7	4.9	4.6	5.0
35-40	4.9	4.6	4.6	4.6	4.4	4.6	4.9	5.4	4.9	4.5	4.7	4.6	4.8	4.8	4.6	4.9
Saturação por Al (%)																
0-5	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	0.0	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
5-10	3.0	7.0	5.0	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	4.0	4.0	3.0	1.0	2.0	0.0	9.0	0.0
10-15	6.0	0.0	4.0	11.0	12.0	4.0	14.0	14.0	14.0	9.0	9.0	5.0	5.0	2.0	28.0	0.0
15-20	13.0	22.0	5.0	16.0	17.0	9.0	9.0	4.0	16.0	18.0	10.0	3.0	8.0	0.0	35.0	3.0
20-25	19.0	27.0	11.0	12.0	22.0	22.0	24.0	12.0	16.0	22.0	11.0	6.0	9.0	7.0	33.0	2.0
25-30	20.0	36.0	13.0	15.0	27.0	16.0	11.0	13.0	19.0	23.0	15.0	21.0	14.0	11.0	33.0	6.0
30-35	18.0	43.0	11.0	17.0	24.0	14.0	9.0	17.0	21.0	23.0	13.0	21.0	14.0	10.0	34.0	11.0
35-40	27.0	38.0	16.0	19.0	27.0	20.0	14.0	18.0	18.0	20.0	17.0	18.0	16.0	19.0	33.0	10.0
Cálcio (cmol_c dm⁻³)																
0-5	8.8	10.2	9.4	9.5	8.5	10.8	9.1	10.1	6.5	8.0	8.2	11.6	8.3	7.8	9.4	12.5
5-10	5.7	6.2	7.4	9.1	5.9	8.6	6.9	7.7	6.6	6.6	6.7	9.1	8.0	8.8	5.7	10.2
10-15	5.6	7.4	6.3	5.0	5.5	5.9	5.4	4.8	3.6	5.8	5.1	6.4	5.3	6.9	4.1	7.9
15-20	5.1	3.4	6.6	4.2	3.9	4.9	5.5	4.6	3.4	4.5	5.1	6.2	4.6	6.1	3.4	6.2
20-25	4.1	2.5	5.2	4.4	3.8	3.5	3.5	5.1	3.3	3.8	4.4	5.4	4.2	5.1	3.2	4.9
25-30	3.4	2.1	4.3	4.1	3.4	3.8	4.4	4.3	3.2	3.5	3.6	3.1	3.7	4.1	2.7	4.2
30-35	4.0	2.0	4.5	3.8	3.4	3.8	4.9	3.2	3.3	3.8	3.7	3.0	3.3	4.0	2.9	3.8
35-40	1.8	2.0	4.0	3.4	3.0	3.2	3.9	2.5	3.1	3.5	3.1	3.2	3.4	3.4	2.8	4.3
Magnésio (cmol_c dm⁻³)																
0-5	3.2	3.6	2.8	3.5	3.3	4.6	2.9	5.4	2.1	3.3	3.3	5.5	2.9	4.3	3.7	4.9
5-10	1.7	1.3	2.0	3.3	1.8	3.6	2.0	4.1	2.6	2.6	3.4	3.8	3.1	4.1	2.3	5.0
10-15	2.4	3.6	1.9	2.0	2.3	2.5	1.2	1.4	1.3	1.3	1.6	3.1	1.9	2.9	1.2	3.5
15-20	1.7	1.2	2.7	1.3	1.3	2.3	1.7	1.9	1.5	2.2	1.4	2.7	1.8	3.2	1.1	2.6
20-25	1.5	1.3	1.9	1.9	1.2	1.6	1.5	1.2	1.2	1.9	1.1	2.8	1.9	2.0	1.2	1.8
25-30	1.1	1.2	1.4	2.0	1.1	1.6	1.5	1.3	1.5	1.6	1.4	1.8	1.6	1.0	1.5	1.5
30-35	1.5	0.8	1.4	2.0	1.4	1.6	1.9	1.6	1.5	1.2	1.4	1.1	1.5	1.3	1.2	1.2
35-40	0.8	0.9	1.2	2.1	1.3	1.6	1.2	1.0	1.4	2.2	1.1	1.7	1.2	1.2	1.4	1.3
Enxofre (mg dm⁻³)																
0-5	8.7	6.7	11.8	15.3	14.5	11.4	24.8	17.2	26.6	14.7	19.4	25.3	15.6	14.4	26.6	19.4
5-10	9.7	18.7	21.3	16.8	18.9	17.9	23.4	8.5	28.4	28.4	22.9	15.0	19.1	9.3	28.4	14.3
10-15	17.7	17.0	22.5	19.4	23.1	25.0	32.7	31.4	22.9	30.4	33.4	34.0	24.8	17.9	31.5	32.2
15-20	36.6	8.0	21.5	27.9	27.2	28.6	19.4	32.2	36.3	29.1	27.1	40.5	18.7	5.9	30.6	25.8
20-25	20.1	29.3	21.6	29.4	29.4	27.8	18.9	24.8	42.0	29.1	29.0	43.6	22.0	24.5	25.8	6.1
25-30	16.0	33.9	26.2	25.8	23.4	29.9	23.1	41.6	5.4	30.7	27.4	23.4	22.3	26.9	26.4	10.0
30-35	24.4	31.6	28.7	29.3	21.8	13.6	21.2	41.7	30.1	27.6	30.9	12.6	8.1	29.0	24.6	18.6
35-40	13.4	30.8	34.8	29.6	27.5	12.6	17.7	21.4	25.0	7.7	33.4	46.5	11.8	18.6	25.1	28.5
Saturação de bases (%)																
0-5	71.0	78.0	67.0	70.0	63.0	79.0	61.0	81.0	57.0	65.0	62.0	84.0	76.0	77.0	68.0	85.0
5-10	50.0	45.0	45.0	73.0	45.0	71.0	49.0	70.0	52.0	52.0	64.0	76.0	74.0	80.0	43.0	82.0
10-15	49.0	69.0	51.0	50.0	45.0	52.0	36.0	38.0	35.0	40.0	44.0	53.0	55.0	66.0	25.0	74.0
15-20	44.0	35.0	54.0	34.0	40.0	40.0	43.0	54.0	35.0	36.0	40.0	51.0	46.0	65.0	20.0	58.0
20-25	42.0	29.0	45.0	40.0	37.0	35.0	34.0	37.0	35.0	28.0	39.0	46.0	53.0	50.0	23.0	59.0
25-30	37.0	24.0	37.0	41.0	32.0	31.0	41.0	39.0	33.0	28.0	37.0	39.0	52.0	39.0	22.0	45.0
30-35	39.0	19.0	45.0	40.0	38.0	38.0	44.0	36.0	31.0	27.0	37.0	36.0	47.0	40.0	22.0	39.0
35-40	27.0	24.0	42.0	41.0	36.0	31.0	39.0	38.0	34.0	32.0	35.0	36.0	43.0	34.0	20.0	44.0

T1-SPD; T2-SPD+C; T3-SPD+G; T4-SPD+C+G; T5-SPD+PC; T6-SPD+PC+C; T7-SPD+PC+G; T8-SPD+PC+C+G; T9-ESC; T10-ESC+C; T11-ESC+G; T12-ESC+C+G; T13-ESC+PC; T14-ESC+PC+C; T15-ESC+PC+G; T16-ESC+PC+C+G.

Os aumentos no pH são atribuídos à neutralização dos íons H^+ pelos íons OH^- na fase sólida do solo e pela ocupação dos sítios de troca pelos cátions acompanhantes dos carbonatos adicionados, provocando aumentos nos valores de V, em função da adição de Ca e Mg em níveis crescentes (QUAGGIO, 2000).

A presença de Al e o baixo teor de Ca e outras bases nas camadas subsuperficiais do solo manejado sob SPD cria uma barreira química ao aprofundamento do sistema radicular (DALLA NORA; AMADO, 2013). No presente experimento, a presença do gradiente de qualidade química foi identificado já na camada superficial de 0-5 cm.

Figura 2. Efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos do solo.



Em relação aos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} é possível observar incremento destes elementos em profundidade (Figuras 2b e 2c), especialmente nos tratamentos submetidos à aplicação de

calcário e gesso de forma combinada com destaque para a ESC. De acordo com RAIJ et al. (2010), uma alternativa para redução da atividade do Al^{3+} e aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} em camadas subsuperficiais do perfil do solo é o uso do gesso agrícola, um subproduto da indústria do ácido fosfórico que vem sendo frequentemente aplicado em lavouras comerciais do Brasil.

Devido a sua rápida solubilização, o gesso proporciona grande incremento do teor de Ca^{2+} na solução do solo que induz o deslocamento de Al^{3+} , Mg^{2+} e K^+ do complexo de troca. Uma vez em solução, estes cátions ficam sujeitos ao deslocamento vertical pela água de drenagem no perfil do solo, especialmente o Ca^{2+} e Mg^{2+} , devido sua afinidade na formação do par iônico com o sulfato ($S-SO_4^{2-}$) (SUMNER et al., 1995). Além disso, o gesso favorece a formação do sulfato de Al^{3+} , composto menos tóxico às plantas (FAVARETTO et al., 2008).

Além do uso isolado do gesso, sua aplicação combinada ao calcário tem sido avaliada como a alternativa mais eficaz para o aprofundamento do sistema radicular, proporcionando maior eficiência no uso da água do solo (CAIRES et al., 2011). O uso do calcário associado ao gesso atuam de forma sinérgica, pois o primeiro ao reduzir a acidez potencial e aumentar o pH da camada superficial (CAIRES et al., 1999), favorece a posterior ação do gesso no arraste de bases catiônicas no perfil do solo, notadamente do Ca^{2+} pela afinidade na formação do par iônico com o íon $S-SO_4^{2-}$ (MARKET; PAVAN; LANTMANN, 1987; RAIJ, 2010).

O aumento nos teores de S em profundidade foi constatado para os tratamentos submetidos a aplicação de gesso (figura 2d), o qual continha em sua formulação química 21,0% de Ca, 15,5% de enxofre, 0,0024% de flúor e 0,9% de fósforo.

6.5.3 Produtividade das culturas

A análise estatística dos dados de produtividade da cultura do milho apresentado na figura 3, demonstra que a combinação dos tratamentos para as três safras elevou a produtividade de forma significativa, com os maiores ganhos para o tratamento ESC+PC+C+G, e menores para a testemunha.

Para a produtividade de milho, nos anos 2 e 3 o uso da ESC apresentou maiores ganhos em relação ao SPD apenas quando combinado com plantas de cobertura, para os demais tratamentos não houve diferença estatística significativa entre ambos.

A resposta ao uso do gesso agrícola de forma isolada foi superior estatisticamente ao uso do calcário, exceto na primeira safra onde o uso do gesso em SPD não diferiu estatisticamente da utilização do calcário combinado com a ESC. O efeito do gesso no incremento da produtividade das culturas de grãos, os resultados de experimentos têm sido

divergentes e dependentes do tipo de cultura investigada (RITCHEY; SILVA; COSTA, 1982; FARINA; CHANNON; THIBAUD, 2000; ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005; RAIJ, 1994, 2010; CAIRES et al., 2011). Assim, Farina, Channon e Thibaud (2000) avaliando o efeito do gesso por longo prazo (11 safras) encontrou incremento médio de 345 kg ha^{-1} na produtividade do milho. Em estudos recentes realizados por Dalla Nora e Amado (2013) em Latossolos do Estado do Rio Grande do Sul, os autores verificaram aumentos da produtividade das culturas de milho e soja com a aplicações de gesso isoladamente e gesso combinado com calcário.

Já a combinação do calcário e gesso resultou em maiores incrementos de produtividade em relação ao uso isolado de ambos. Resultados semelhantes foram encontrados por Dalla Nora et al. (2017), onde o uso do gesso combinado com calcário elevou a produtividade das culturas em sistema plantio direto, com efeito acentuado em situação de déficit hídrico. Resultados reportados por Joris et al. (2013) demonstraram que a redução da toxicidade do Al^{3+} pela aplicação de calcário e gesso afetou diretamente a produtividade das culturas, especialmente quando foi constatado estresse hídrico.

O aporte de calcário e gesso afeta a relação entre cátions na solução do solo e a fase sólida do solo, favorecendo o seu incremento na solução, enquanto que o aporte de ânions, com elevada mobilidade na solução do solo, favorece o movimento vertical de cations através do solo (CICHOTA et al. 2007; ALVES; OKUMA, 2011). Dessa forma, enquanto o calcário eleva os teores de cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) na camada superficial, o gesso por ser mais solúvel e aportar concomitantemente o Ca^{+2} e o sulfato (S-SO_4^{2-}) atua nas camadas subsuperficiais (RAIJ, 2010; WATTS; DICK, 2014).

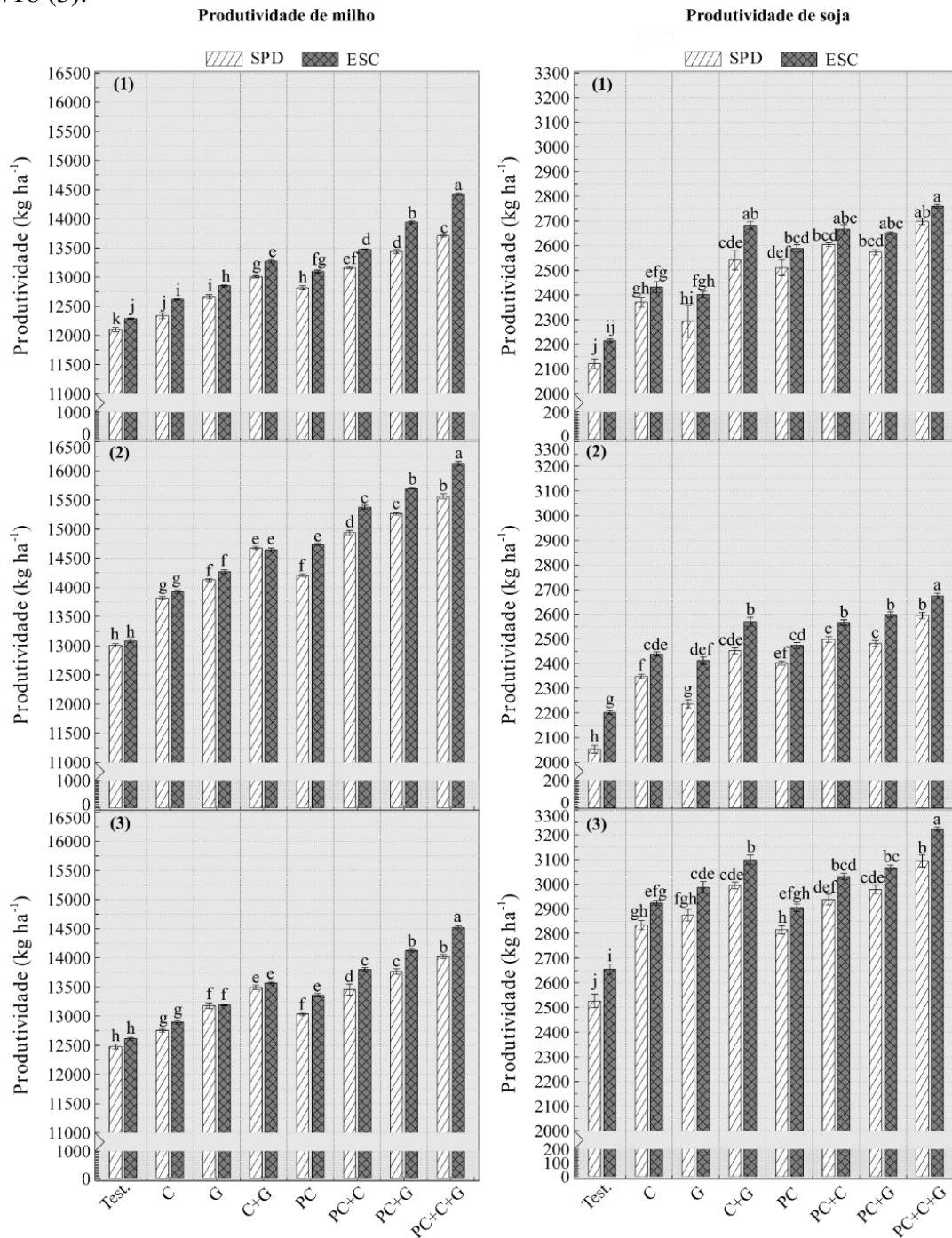
Assim, a rápida movimentação do S-SO_4^{2-} no perfil do solo sob condições de precipitação elevada, promove o deslocamento de cátions como o Ca^{+2} , Mg^{+2} e, em menor quantidade, potássio (K^+) (RAIJ, 2010). O incremento do teor de Ca^{+2} em subsuperfície favorece o deslocamento do alumínio (Al^{+3}) do complexo de troca para a solução do solo, ocorrendo a formação do complexo AlSO_4^+ que é deslocado para camadas mais profundas com a água de drenagem.

Para a cultura da soja é observado a mesma tendência em relação a cultura do milho para os dos dados de produtividade das três safras (figura 3), com aumento da mesma à medida que os tratamentos foram combinados porém sem diferença estatística para a maioria dos tratamentos.

A utilização da ESC de forma isolada apresentou diferença estatística para os anos 2 e 3 em relação ao SPD. O tratamento ESC+C+G não apresentou diferença estatística para as

três safras em relação ao tratamento SPD+PC+C+G, indicando que a utilização de PC associado a aplicação de C e G em SPD é uma alternativa eficiente para elevar a produtividade sem a necessidade do revolvimento do solo.

Figura 3. Produtividade das culturas de milho e soja nas safras 2015/16 (1), 2016/17 (2) e 2017/18 (3).

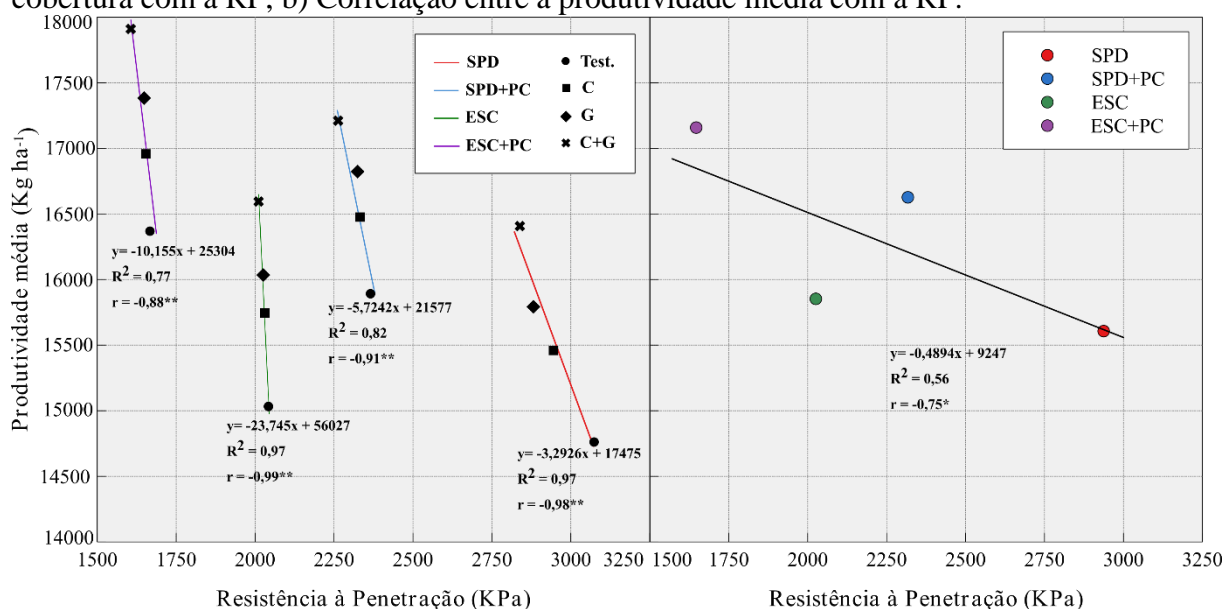


SPD – Sistema Plantio Direto; ESC – Escarificação; Test. – Testemunha; C – Calcário; G – Gesso Agrícola; PC – Plantas de Cobertura. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%.

6.5.4 Resposta da produtividade em função dos atributos físicos e químicos

Nas figuras 4a e 4b, é possível observar os coeficientes de correlação linear (R^2) e de Pearson (r) existente entre o rendimento acumulado das culturas da soja e milho e a RP. A regressão linear negativa revelou que a RP do solo afeta diretamente a produtividade das culturas, corroborando com Tormena, Silva e Libardi (1998). Os autores afirmam que valores superiores a 2000 KPa, são impeditivos ao crescimento radicular e ao desenvolvimento das culturas.

Figura 4: Resposta da produtividade em função da resistência à penetração do solo (RP); a) Correlação entre a produtividade em cada sistema de preparo associado ao uso de plantas de cobertura com a RP; b) Correlação entre a produtividade média com a RP.



SPD – Sistema Plantio Direto; ESC – escarificação; PC – plantas de cobertura; C – calcário; G – gesso.

Girardello (2010), encontrou redução da produtividade da cultura da soja de 24% com RP de 2300 KPa. Nesse estudo a redução média da produtividade acumulada para as culturas de soja e milho com RP a partir de 2000 KPa foi de 6,58%, inferior ao reportado na literatura, provavelmente pelo fato de que o experimento foi conduzido em área irrigada, o que pode ter atenuado os efeitos por déficit hídrico.

Secco (2003), estudando o efeito de estados de compactação em Latossolos manejados sob SPD, verificou que o estado de compactação mais intenso de resistência à penetração, de 2650 e 3260 KPa, proporcionou decréscimos na produtividade do trigo, milho e soja de 18,35, 34,05 e 24,30%, respectivamente. Este resultado de redução de rendimento ocasionado pelo aumento da RP acima de 2000 KPa é semelhante à encontrada por Beutler et al. (2006), que

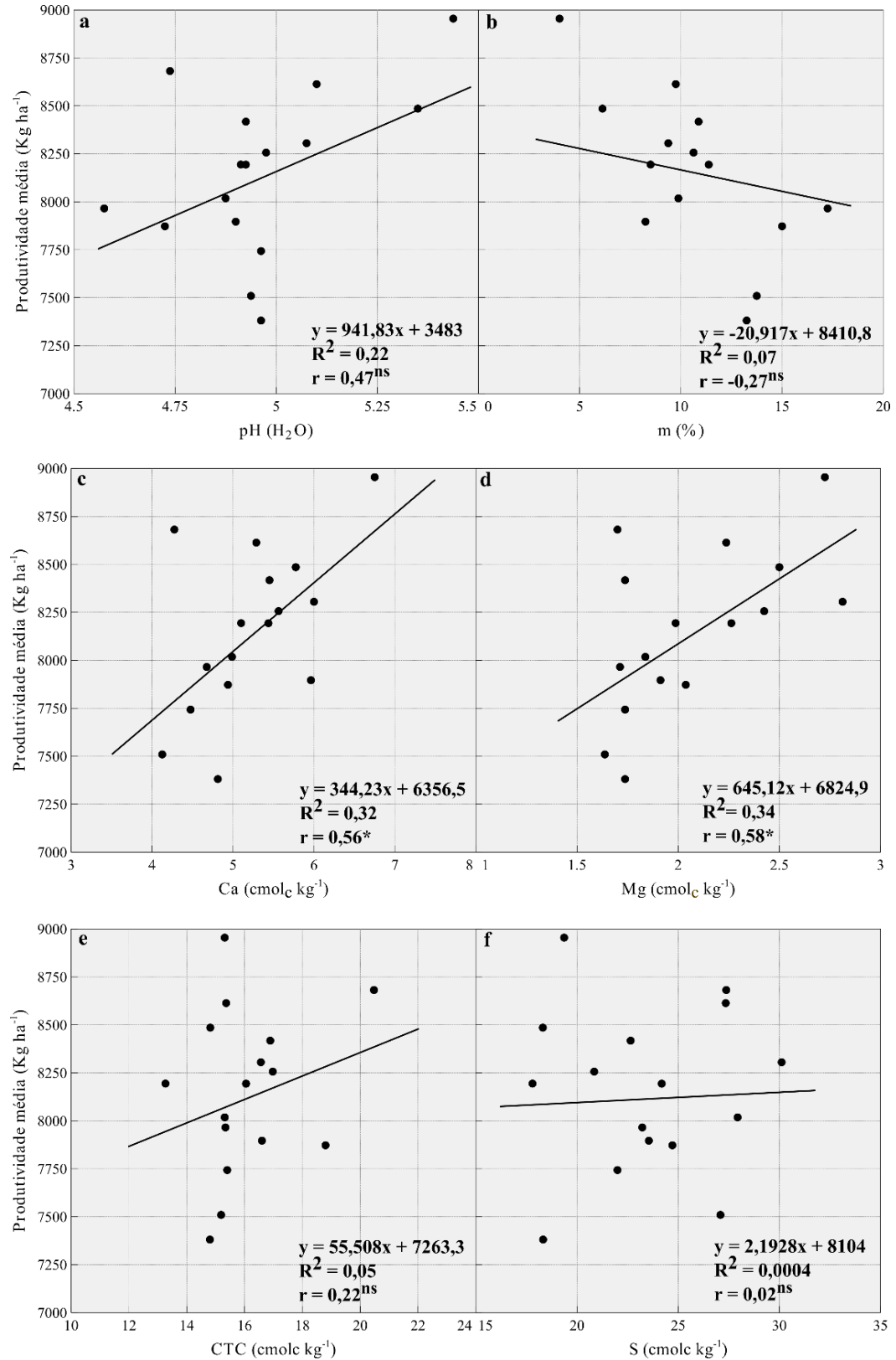
observaram, em um Latossolo com 330 g kg^{-1} , que o decréscimo da produtividade da cultura de soja iniciou-se a partir de uma RP de 2240 KPa.

As reduções acontecem pela resposta das plantas a solos com elevada RP, modificada entre culturas e cultivares. As raízes das plantas que crescem em solos com alta resistência à penetração apresentam modificações morfológicas (MIELNICZUK; CARPENEDO; PEDO, 1985), principalmente no decréscimo na divisão celular no aumento no diâmetro da raiz, reduzindo a área de solo explorada pelas raízes e a absorção de água e nutrientes (TAYLOR; BRAR, 1991). Além destes problemas citados pelos autores em solos compactados, as raízes apresentam-se com elevada massa de matéria seca e com parede celular grossa, sugerindo menor maleabilidade para desviar daqueles pontos com maior resistência do solo.

As correlações lineares (R^2) e de Pearson (r) entre os atributos químicos do solo e a rendimento médio acumulado de soja e milho estão demonstradas no gráfico 5. É possível verificar que os atributos que apresentaram coeficientes de correlação significativos foram os teores de Ca (Fig. 5c) e Mg (Fig. 5d), com valores de R^2 e r de 0,32 e 0,56 para o Ca, respectivamente, e 0,34 e 0,58 para o Mg, respectivamente. Caires et al. (2003) também reportaram incrementos significativos no teor de Ca com a aplicação de gesso em um Latossolo, enquanto que Soratto e Crusciol (2008), relatam também a elevação do teor de Mg do solo com a aplicação de calcário e gesso. A elevação destes dois macronutrientes no solo está diretamente relacionada com a produtividade das culturas, Zandoná et al. (2015) reportam incrementos da produtividade de soja e milho em função da aplicação de calcário e gesso no solo.

Não foi observada correlação significativa entre a produtividade acumulada e o pH (Fig. 5a), m (Fig. 5b), CTC (Fig. 5e) e o teor de S (Fig. 5f), o que pode ser justificado pela ausência de variação nas doses aplicadas de calcário e gesso no solo, as quais permitiriam a obtenção de faixas de produtividade-resposta mais heterogêneas e que poderiam estar mais associadas a variação desses atributos, como o reportado por Dalla Nora et al. (2017) e Mantovani et al. (2017).

Figura 5: Correlações entre os atributos químicos do solo e a produtividade média dos três anos avaliados; a) pH; b) m - saturação por alumínio (%); c) Ca – cálcio; d) Mg – magnésio; e) CTC – capacidade de troca de cátions; f) S – enxofre.



6.6 CONCLUSÕES

O uso de PC em SPD, comparado a ESC teve efeito semelhante na redução da RP. A combinação da ESC com PC apresentou os menores valores de RP ao final do experimento.

O uso da ESC+PC+C+G, teve efeito no pH na camada de 0-35 cm comparado ao tratamento SPD, elevando o mesmo acima de 5,5 até a profundidade de 15 cm. Já o SPD+PC+C+G apresentou comportamento intermediário, com efeito limitado a camada de 0-10 cm.

Os maiores incrementos em profundidade nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram observados nos tratamentos submetidos à aplicação de C e G de forma combinada com destaque para o tratamento submetido a ESC. O incremento de S em profundidade foi observado para os tratamentos com aplicação de gesso.

A combinação dos tratamentos para as três safras elevou a produtividade das culturas milho e soja de forma significativa, com os maiores ganhos para o tratamento ESC+PC+C+G, e menores para a testemunha.

A produtividade da cultura da soja no tratamento ESC+C+G não apresentou diferença estatística para as três safras em relação ao tratamento SPD+PC+C+G, indicando que a utilização de PC associado a aplicação de C e G em SPD é uma alternativa eficiente para elevar a produtividade sem a necessidade do revolvimento do solo.

6.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 Ciência do Solo**, v. 29, p.923-934, 2005.

ALVES, M.E.; D.M.; OKUMA. Anion and mineralogical effects on K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} leaching in Oxisols. **Soil Science**. v. 176, p. 115-123, 2011.

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.

AMADO, T. J. C.; GIOTTO, E. A sua lavoura na tela. **Revista A Granja**, São Paulo, SP, p. 38-42, 2009.

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

BAKSH, A. et al. Spatio-temporal analysis of yield variability for corn soybean field in Iowa. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 43, p. 31-38, 2001.

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.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84p.

BEUTLER A. N. et al., Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.639–645, 2006.

BLUM, B. S. et al. Assessing available soil sulphur from Phosphogypsum applications in a no-till Cropping system. **Exp Agric**. v. 50, p.515-532, 2014.

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.

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e reposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 275-286, 2003.

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. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 791-798, 2005.

CAIRES, E. F. et al. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, Madson, v. 27, p. 45-53, 2011.

CAIRES, E.F. **Correção da acidez do solo em sistema plantio direto**. International Plant Nutrition Institute (IPNI). 2013. (Informações Agronômicas, 141)

CHEN, G. H.; WEIL, R.R. Penetration of cover crop roots through compacted soils. **Plant Soil**, v. 331, p. 31–43, 2010.

CICHOTA, R. I. et al. Simultaneous adsorption of calcium and sulfate and its effect on their movement. **Soil Science Society of American Journal**, v. 71, p. 703-710, 2007.

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^a.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul/UFRGS; 2016.

CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira de grãos 2013/2014, Levantamento Final – Maio/2014**. Companhia Nacional de Abastecimento, – v. 1 – Brasília: Conab, 2013. Online. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_10_09_17_39_08_boletim_portugues_outubro_2013.pdf>. Acessado em: 21 de outubro de 2015.

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**, v. 1, p. 19-29, 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.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till. **Agronomy Journal**, Madson, v. 105, p. 1393-1403, 2013.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 603-612, 2010.

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SATTLER, A. **Vertical mulching**: prática conservacionista mitigadora de perdas por erosão hídrica em sistema plantio direto. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008, 8p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 53).

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.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 4^a. ed. Brasília: Embrapa-CNPS; 2018.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: I. Longterm growth effects. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 64, p. 646–651, 2000.

FAVARETTO, N. et al. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium effects on plant nutrition under conditions of intensive nutrient extraction. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 133, p. 108-118, 2008.

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.

FIORIN, J.E.; SCHNELL, A.; RUEDELL, J. **Diagnóstico das propriedades rurais na região de abrangência das cooperativas** Coopatrigo, Cooperoque, Cotap, Cotrisa, Cotrisal e Tríticola Cruz Alta: Fundacep Fecotrigo, 2007. 176p.

GIRARDELLO, V. Qualidade física de um latossolo sob plantio direto submetido à escarificação de sítio específico e o rendimento da soja. (Dissertação de mestrado) Santa Maria, 98p. Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

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

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**. Berlin: Walter de Gruyter, 1938. 388p.

LAMB, J. A. et al. Spatial and temporal stability of corn grain yields. **J. Prod. Agric.** v. 10, p. 410-414, 1997.

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.

MARKET, C. M.; PAVAN, A. M. A.; LANTMANN, A. F. **Considerações sobre o uso do gesso na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS, 1987. p.3. (Informativo agrônomo n. 40).

MIAO, Y.; MULLA, D. J.; ROBERT, P. C. Spatial variability of soil properties, corn quality and yield in two Illinois, USA fields: Implications for precision corn management. **Precision Agriculture**. v. 7, p. 5-20, 2006.

MIELNICZUK, J.; CARPENEDO, V.; PEDO, F. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 38, p. 42-43, 1985.

NICOLOSO, R. S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1723-1734, 2008.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. [s.l.] Instituto Agronomico, [2000], 2000.

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

RAIJ, B. V. 2010. **Gesso na agricultura**. São Paulo: IPNI – Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. (Informações Agrônomicas 122).

RAIJ, B.VAN. et al. Efeito de calcário e de gesso para soja cultivada em Latossolo Roxo ácido saturado com sulfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, p. 305-312, 1994.

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.

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.; SILVA, S. E.; COSTA, V. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savannah Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 133, p. 378- 382, 1982.

SECCO, D. Estados de compactação de dois latossolos e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas. (Tese de Doutorado) Santa Maria, 110p. Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

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, p. 675-688, 2008.

SUMNER, M.E. **Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance**. In: Subsoil management techniques (eds N. S. JAYAWARDANE; B. A. STEWART), pp. 147–185. Lewis Publishers. 1995.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 111-119, 1991.

TEDESCO, M. J. et al. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2ª.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995. (Boletim Técnico, 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.

VALICHESKI, R. et al. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012.

VIACHESLAV, I.; ADAMCHUK, V. I.; MOLIN, J. P. Hastes instrumentadas para a mensuração da resistência mecânica do solo. **Eng. Agr.**, Jaboticabal, v. 26. n. 1, p. 161-169, 2006.

WATTS, D. B.; DICK, W. A. Sustainable Uses of FGD Gypsum in Agricultural Systems: Introduction. **Journal Environmental Quality**, v. 43, p. 246-252, 2014.

WINGEYER, A. B. et al. Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. **Sustainability**, v. 7, p. 2213-2242, 2015.

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. ARTIGO II - INCREMENTO DO RETORNO ECONÔMICO EM ÁREA IRRIGADA UTILIZANDO ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE SOLO

7.1 RESUMO

Latossolos tropicais manejados sob Sistema Plantio Direto de longa duração têm apresentado diferenças entre as características físicas e químicas entre a superfície e a subsuperfície do solo. Em áreas irrigadas por pivô central, estes problemas são ainda mais recorrentes, pois os cultivos anuais e contínuos no mesmo local favorecem a alteração das propriedades do solo. Algumas estratégias de manejo do solo podem ser utilizadas para reduzir o gradiente encontrado nos mesmos, como a escarificação, o uso de plantas de cobertura e aplicação de corretivos e condicionadores. O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise econômica avaliando os custos gerados pelo uso dessas estratégias isoladas e pelas suas diferentes combinações para, posteriormente, confrontá-los com os rendimentos de soja e milho em três safras agrícolas em uma área irrigada por pivô central. Foram avaliadas três anos agrícolas de milho e soja (2015/16, 2016/17 e 2017/18). O delineamento utilizado seguiu um esquema trifatorial, no qual a parcela principal era constituída pelo sistema de preparo do solo (Sistema Plantio Direto ou escarificado), a subparcela era constituída do uso de plantas de cobertura (ausência ou presença) e a subsubparcela representava o uso de calcário e gesso (ausência, presença isolada e presença combinada). Foram determinados o rendimento acumulado de soja e milho dos três anos avaliados, o custo de implantação e o retorno econômico (ou payback simples) resultante de cada estratégia de manejo. O gesso agrícola foi eficiente para incrementar o retorno econômico independente de ter seu uso associado a outra estratégia de manejo. O uso de plantas de cobertura foi mais rentável que a escarificação e, a associação da escarificação com plantas de cobertura e a aplicação de calcário e gesso, resultou no maior valor de payback observado.

Palavras-chave: Retorno econômico. Sistema Plantio Direto. Escarificação. Plantas de cobertura. Calcário. Gesso.

7.2 ABSTRACT

Tropical Oxisols managed under long term no-till commonly present differences of the physical and chemical properties between the surface and the subsurface. In irrigated fields by the central pivot, these problems are more evidenced, because the annual and continuous crop

seasons in the same field cause changes in the soil properties. Some strategies of soil management can be used to reduce the gradient observed in these soils, such as the soil chiseling, the cover crops and the application of limestone and gypsum. The aim of this study was to evaluate the costs from these isolated strategies and from the your several combinations to, posteriorly, confront them with the soybean and maize yields in three crop years in an irrigated field by the central pivot. Were evaluated three crop years of soybean and maize (2015/16, 2016/17 and 2017/18). The experimental design consisted of a trifactorial scheme, in which the principal parcel was the soil tillage (no-till or scarified), the subparcel was the use of cover crops (presence or absence) and the subsubparcel was the use of limestone and gypsum (presence, absence or combined presence). Were determined the accumulated yield of soybean and maize in the three years evaluated, the costs of implantation and the payback resulting of each management strategy. The gypsum was efficient to increase the payback regardless of the association with another management strategy. The use of cover crops was more profitable than the chiselling and the higher payback was observed with the association of chiselling, cover crops, limestone and gypsum application (ESC+PC+C+G).

Keywords: No-till system. Chiseling. Cover crops. Limestone. Gypsum.

7.3 INTRODUÇÃO

Latossolos tropicais manejados sob SPD de longa duração têm apresentado mudanças nas características físicas e de fertilidade ao longo de seu perfil, Reichert et al. (2009) reportam os diferentes graus de compactação observados entre a superfície e a subsuperfície do solo que pode ser observada neste sistema de manejo, enquanto que Amado et al., (2009) relata a ocorrência de melhores condições de fertilidade na camada superficial contrastando com a deficiência de nutrientes e elevada acidez na subsuperfície do solo.

Em áreas irrigadas por pivô central, estes problemas são ainda mais recorrentes, pois os cultivos anuais e contínuos no mesmo local favorecem as alterações das propriedades do solo, como a acidificação e a compactação pelo tráfego intensivo de máquinas agrícolas, o que afeta diretamente a produtividade das culturas de interesse econômico. Portanto, para possibilitar a compensação integral do alto investimento com a irrigação, tais características limitantes devem ser minimizadas. Conforme levantamento realizado pela UERGS (Universidade Estadual do Rio Grande do Sul) em 2017, na região das Missões do RS, aproximadamente 23 mil ha possuem sistema de irrigação.

Como alternativa, algumas estratégias podem ser utilizadas, como o sistema de preparo do solo, o uso de plantas de cobertura, a aplicação de insumos, corretivos e condicionadores. Botta et al. (2010) relatam a eficiência do uso de escarificadores mecânicos para a atenuação da compactação do solo, enquanto que Chen e Weil (2010) e Valicheski et al. (2012) reportam que o uso de plantas de cobertura também podem ser eficazes para superar esta limitação. Além disso, as plantas de cobertura podem auxiliar no controle de plantas daninhas através da competição alelopática existente entre as espécies (CONKLIN et al., 2002; STIVERS-YOUNG, 1998) e na quebra de ciclo das doenças incidentes na cultura de interesse econômico (MCGUIRE, 2002).

Para atenuar as limitações de fertilidade subsuperficial, Caires (2012) reporta a eficiência do calcário aplicado em superfície com uma única dose elevada ou de forma parcelada em curtos espaços de tempo, pois formam uma frente alcalinizante no solo que pode reagir abaixo da zona de aplicação deste corretivo. A aplicação de gesso agrícola também é uma estratégia química de melhoria do perfil do solo. Dalla Nora e Amado (2013), relatam a eficiência deste condicionador utilizado em Latossolos manejados com objetivo de alcançar elevadas produtividades e que apresentem notável gradiente de fertilidade do solo entre as camadas superficiais e profundas.

Ao combinar estratégias de manejo, os efeitos benéficos podem ser potencializados, Nicoloso et al. (2008) mostram que a associação da escarificação e plantas de cobertura é mais eficiente que o uso isolados das mesmas para resolver o problema da compactação e, além disso, podem ter seus efeitos observados por mais tempo (FIN et al., 2018). A associação de calcário e gesso é uma estratégia de melhoria química que, de acordo com Dalla Nora et al. (2017) e Caires et al. (2006), é capaz de aumentar o valor de pH e reduzir a toxidez por Al na subsuperfície do solo, além de incrementar os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e S. A combinação de calcário, gesso e plantas de cobertura também é uma estratégia que pode incrementar a produção de matéria seca das plantas de cobertura, principalmente em anos com reduzida disponibilidade hídrica (SORATTO; CRUSCIOL, 2008).

Em sistemas irrigados, o uso de plantas de cobertura geralmente apresenta melhor performance, haja visto que nestes sistemas, a competição por água e nutrientes é reduzida, o que pode aumentar a probabilidade de retorno econômico do investimento em plantas de cobertura (SNAPP et al., 2005).

O uso destas alternativas de manejo influencia diretamente os custos de produção agrícola e determina a produtividade das culturas, portanto é necessário o levantamento e acompanhamento dos custos por elas gerados, pois de acordo com Vasconcelos et al. (2002),

é possível identificar os elementos responsáveis pelo bom desempenho da lavoura e aqueles que podem ser possíveis pontos de estrangulamento do empreendimento agrícola.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise econômica avaliando os custos gerados pela escarificação, plantas de cobertura, aplicação de calcário e gesso e pelas diferentes combinações destas estratégias para, posteriormente, confrontá-los com os rendimentos de soja e milho em três safras agrícolas em uma área irrigada por pivô central.

7.4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em uma área comercial irrigada cultivada sob Sistema Plantio Direto de longa duração com irrigação por pivô central no município de São Luiz Gonzaga, noroeste do Rio Grande do Sul em um solo caracterizado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2018). Foram avaliadas três safras agrícolas de milho e soja (2015/16, 2016/17 e 2017/18), nas quais a soja era cultivada durante a safrinha. As propriedades químicas e a resistência à penetração do solo antes da implantação do experimento estão descritas na tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos avaliados anteriormente à implantação dos tratamentos na área experimental.

Prof. cm	pH H ₂ O	SMP -----	Ca	Mg	Al ³⁺ cmol _c dm ³ -----	CTC _{pH7} -----	S - mg dm ⁻³ -	P	MOS -----	m %	V -----	Argila	RP KPa
0-5	5,5	5,8	8,8	3,2	0,0	18,1	8,7	12,3	4,2	0,0	71,0	50,0	948,3
5-10	5,1	5,4	5,7	1,7	0,3	16,1	9,7	7,7	4,5	3,0	50,0	51,0	3342,6
10-15	5,0	5,3	5,6	2,4	0,6	17,4	17,7	8,1	3,9	6,0	49,0	56,0	4232,6
15-20	4,8	5,3	5,1	1,7	1,1	16,0	36,6	19,9	2,9	13,0	44,0	48,0	3940,6
20-25	4,8	5,4	4,1	1,5	1,4	13,8	20,1	2,4	2,2	19,0	42,0	54,0	3419,6
25-30	4,8	5,4	3,4	1,1	1,1	12,6	16,0	1,5	1,8	20,0	37,0	65,0	3483,4
30-35	4,8	5,3	4,0	1,5	1,3	14,5	24,4	1,3	1,9	18,0	39,0	51,0	3631,0
35-40	4,8	5,5	1,8	0,8	1,0	9,9	13,4	1,2	1,8	27,0	27,0	72,0	4172,3

Prof. – profundidade; pH - potencial hidrogeniônico; SMP – medida da acidez potencial; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Al³⁺ – Alumínio; CTC_{pH7} – capacidade de troca de cátions; S – enxofre; P – fósforo; MOS – matéria orgânica do solo; m – saturação por alumínio; V – saturação por bases; RP – resistência à penetração do solo.

O delineamento utilizado seguiu um esquema trifatorial, no qual a parcela principal foi constituída pelo sistema de manejo (Sistema Plantio Direto ou escarificado), a subparcela era constituída do uso de plantas de cobertura (ausência ou presença) e a subsubparcela representava o uso de calcário e gesso (ausência, presença isolada e presença combinada).

A escarificação foi realizada anteriormente à semeadura do milho em agosto de 2015 com a utilização do escarificador Fox® (Stara S/A), que possuía sete hastes e atuava na

profundidade média de 0,26 m. As plantas de cobertura utilizadas foram a aveia preta (*Avena strigosa* Schieb.) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) semeadas em linha com 80 kg ha⁻¹ e 20 kg ha⁻¹ de sementes viáveis, respectivamente, e com espaçamento entre linhas de 0,18 m. A aplicação de calcário e gesso foi realizada em julho de 2015 com a dose de 3,0 Mg ha⁻¹ para ambos os produtos e foi feita com o uso do distribuidor Hércules 24000® (Stara S/A).

A semeadura do milho foi realizada com o uso de uma semeadora tratorizada com espaçamento de 0,70 m entre linhas, o híbrido utilizado foi AG 9025 PRO3, as adubações realizadas foram divididas em quatro etapas: antes da semeadura, com adubação à lanço de 200 kg ha⁻¹ de KCl; durante a semeadura, com aplicação em linha de 350 kg ha⁻¹ de um fertilizante formulado (07-24-00); e em cobertura, nas fases V4 e V6, com a aplicação à lanço de 250 kg ha⁻¹ de Sulfammo e 200 kg ha⁻¹ de ureia, respectivamente.

Após a colheita do milho, foi realizada a semeadura da cultura da soja no período caracterizado como safrinha com a cultivar TEC 7849 IPRO. A adubação desta cultura foi realizada em duas etapas, antes da semeadura, com aplicação à lanço de 100 kg ha⁻¹ de KCl, e durante a semeadura, com a aplicação em linha de 300 kg ha⁻¹ de um fertilizante formulado (01-28-00).

A produtividade de grãos de soja e milho foi determinada pela colheita mecanizada com uso de uma colhedora New Holland, modelo NH8055 e teve sua umidade corrigida para 13%.

O custo total para implantação das culturas foi realizado levando em considerações os custos referentes à semeadura, dessecação, adubação de cobertura, aplicação de herbicidas e fungicidas e colheita. Para a cultura do milho, o custo foi de R\$3339,75 para a safra 2015/16, R\$3674,70 para a safra 2016/17 e R\$3598,75 para a safra de 2017/18. Para a cultura da soja, cultivada durante a safrinha, os custos foram de R\$2145,30 em 2016, R\$2230,75 em 2017 e R\$2251,00 em 2018. O custo de implantação das culturas não foi levado em consideração para o cálculo do payback simples devido ao fato de ser constante em todos os tratamentos, pois todas as parcelas foram manejadas igualmente.

O custo de aquisição do sistema de irrigação e acessórios do mesmo foi de R\$10.617,02 ha⁻¹ e, assim como os custos referentes ao manejo das culturas, não foi levado em consideração na avaliação econômica por incidir em todos os tratamentos com a mesma lâmina de água aplicada.

A análise econômica foi baseada na determinação da receita total oriunda dos rendimentos acumulados de soja e milho das três safras avaliadas e do levantamento dos custos gerados pela escarificação, pela semeadura das plantas de cobertura e pela aplicação de

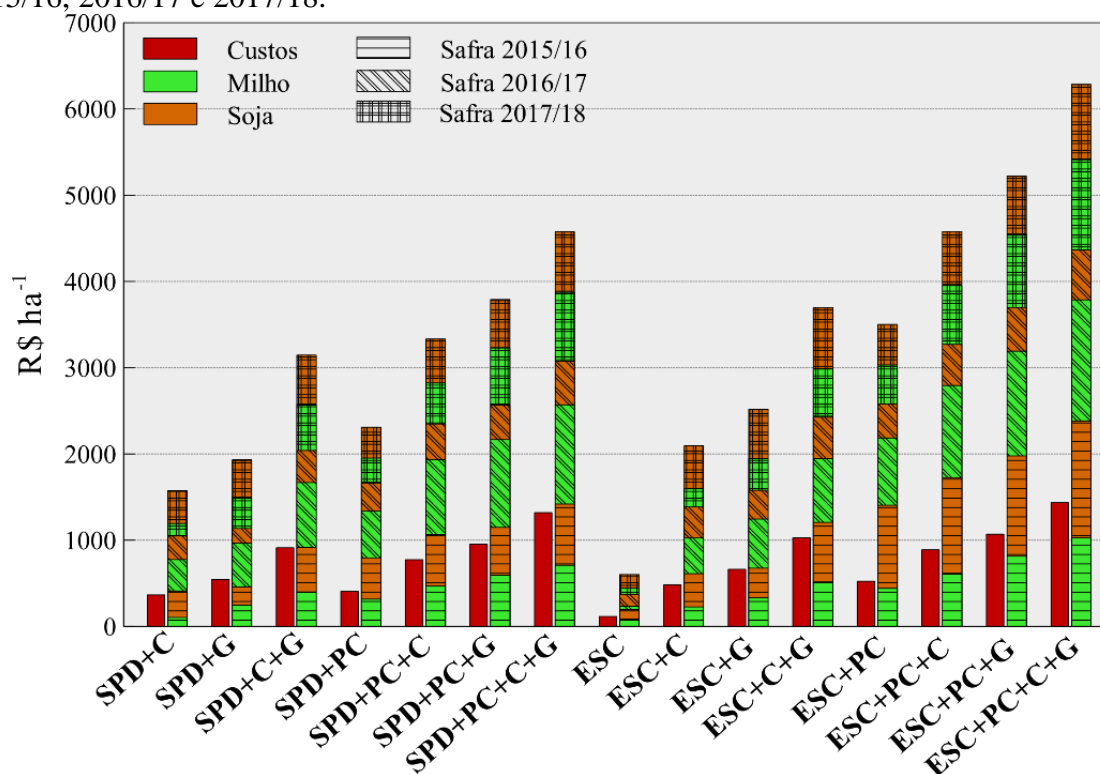
calcário e gesso, sendo que o retorno econômico (payback simples) foi mensurado através da diferença entre os mesmos.

Os custos de semeadura do milho e da soja bem como os custos de aplicações e de colheita foram desconsiderados, permitindo a análise dos custos gerados pela aplicação dos tratamentos, que tiveram como base o preço no momento da compra em julho de 2015. Os rendimentos foram baseados no preço de venda no ato da comercialização de cada safra. No ano de 2016, 2017 e 2018, o preço de comercialização do milho foi de R\$31,00, R\$27,00 e R\$26,50, respectivamente, e do da soja foi de R\$74,50, R\$56,00 e R\$74,00, respectivamente.

7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A escarificação e a aplicação de calcário e gesso foram realizadas no início do experimento, em agosto de 2015, sendo assim, os custos relativos à estas operações não incidem sobre as outras safras avaliadas. Os custos referentes ao uso de plantas de cobertura incidem sobre os três anos avaliados, pois envolvem a sua aquisição e semeadura na área experimental.

Figura 1. Custos de implantação dos tratamentos e rendimento de milho e soja nas safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18.



SPD – Sistema Plantio Direto; C – calcário; G – gesso; PC – plantas de cobertura; ESC – escarificação.

O gráfico 1 apresenta os valores de investimento da implantação dos tratamentos e a produtividade acumulada em R\$ ha⁻¹. Os dados revelam que, para a maioria dos tratamentos, o retorno do investimento ocorre principalmente a partir do segundo ano da implantação dos mesmos, considerando nesse caso os valores acumulados para as duas culturas, milho e soja (safra e safrinha), haja visto que o valor investido praticamente se iguala ao retorno acumulado dessas no primeiro ano. Nos tratamentos SPD+PC, e para todos os tratamentos ESC associado com PC, é possível observar os maiores retornos econômicos já no primeiro ano de implantação.

Na tabela 2 encontram-se descritos os custos de aplicação das estratégias estudadas (sistema de preparo do solo, a aplicação de calcário e gesso e o uso de plantas de cobertura). O custo da escarificação envolve o consumo de óleo diesel, mão-de-obra e o aluguel do escarificador (preço de uma saca de soja no momento da operação, R\$68,16).

Tabela 2. Custos de implantação dos manejos realizados (R\$ ha⁻¹).

Manejo	Variável	Anos avaliados			Total
		2015	2016	2017	
Sistema de preparo	SPD	0,00	0,00	0,00	0,00
	Escarificação	184,16	0,00	0,00	184,16
Calcário e Gesso	Calcário	366,00	0,00	0,00	366,00
	Gesso	546,00	0,00	0,00	546,00
Plantas de cobertura	Presença	138,00	139,00	130,40	407,40
	Ausência	0,00	0,00	0,00	0,00

SPD – Sistema Plantio Direto.

Os rendimentos de soja e milho em cada safra avaliada encontram-se descritos na tabela 3. Para a cultura da soja é possível observar que a safra 2016/17 apresentou os menores rendimentos comparado as demais safras, o que é explicado pelo menor preço de comercialização desta cultura nesse ano.

O rendimento acumulado (soma dos rendimentos de soja e milho nas três safras avaliadas), incremento relativo (diferença entre o rendimento acumulado em cada tratamento e no SPD), e o payback simples (diferença entre o incremento relativo e os custos de implantação dos tratamentos) estão descritos na tabela 4. Ao final das três safras é observado que o payback simples foi afetado positivamente pelos tratamentos com incrementos crescentes em função da combinação entre as estratégias avaliadas, com destaque para a associação ESC+PC+C+G, seguido pela ESC+PC+G.

Tabela 3. Efeito dos tratamentos sobre o rendimento de milho e soja nos três anos avaliados.

Tratamento	Milho (R\$ ha ⁻¹)			Soja (R\$ ha ⁻¹)		
	2015/16	2016/17	2017/18	2016	2017	2018
SPD	6252,37	5852,63	6446,76	2633,40	1915,64	3115,57
SPD+C	6373,43	6217,54	6588,85	2943,21	2191,76	3496,12
SPD+G	6542,43	6357,89	6810,38	2846,39	2087,35	3546,10
SPD+C+G	6719,69	6603,51	6971,08	3156,21	2288,69	3693,32
SPD+PC	6623,00	6392,98	6736,21	3117,48	2242,08	3472,22
SPD+PC+C	6800,26	6722,80	6921,40	3233,66	2331,82	3623,08
SPD+PC+G	6945,29	6870,18	7110,58	3194,93	2316,13	3674,06
SPD+PC+C+G	7082,26	7003,51	7245,54	3349,84	2421,66	3815,71
ESC	6349,06	5887,72	6516,57	2749,58	2054,99	3273,95
ESC+C	6518,26	6266,67	6662,74	3020,66	2276,07	3606,80
ESC+G	6639,12	6421,05	6813,52	2981,94	2251,56	3684,15
ESC+C+G	6856,66	6589,47	7009,60	3330,47	2398,14	3821,56
ESC+PC	6768,03	6631,58	6902,64	3214,29	2308,92	3582,72
ESC+PC+C	6961,40	6919,30	7129,28	3311,11	2394,85	3738,87
ESC+PC+G	7203,12	7066,66	7298,72	3291,75	2425,22	3783,47
ESC+PC+C+G	7452,89	7256,14	7502,62	3427,29	2495,85	3975,59

SPD – Sistema Plantio Direto; C – calcário; G – gesso; PC – plantas de cobertura; ESC-escarificação.

A aplicação associada de calcário e gesso em SPD afetou positivamente o payback (8,83%) em relação ao uso isolado de calcário (em 4,78%) e de gesso (em 5,48%) em SPD. O incremento da produtividade de soja e milho em resposta à aplicação de calcário em SPD também foi verificado por Miranda et al. (2005), enquanto que Dalla Nora et al. (2014) reportam a eficiência da aplicação de gesso agrícola, isolado ou combinado com calcário, no incremento da produtividade de soja, milho e trigo, inclusive em situações de reduzida disponibilidade hídrica.

Na ausência da escarificação mecânica, os tratamentos que resultaram em maiores valores de payback foram o SPD+PC+G e SPD+PC+C+G, com incrementos de 14,85% e 17,94%, respectivamente. No entanto, com o uso da escarificação, os valores de payback foram potencializados. A escarificação isolada (ESC) incrementou 2,35% o retorno econômico em comparação ao SPD, no entanto, sua associação com a aplicação de calcário e gesso (ESC+C+G) proporcionou um acréscimo de 14,45% concordando com o encontrado por Ernani, Ribeiro e Bayer (2001), e quando somada ao uso de plantas de cobertura (ESC+PC), o incremento foi de 12,17%, corroborando com o encontrado por Nicoloso et al. (2008).

Tabela 4. Efeito dos tratamentos sobre o rendimento acumulado, custo e payback simples.

Tratamentos	Rendimento Acumulado	Incremento Relativo	Custos	Payback Simples
	------(R\$ ha ⁻¹)-----			
SPD	26216,38	-	0,00	-
SPD+C	27810,70	1594,33	366,00	1228,33
SPD+G	28190,56	1974,18	546,00	1428,18
SPD+C+G	29432,49	3216,11	912,00	2304,11
SPD+PC	28583,97	2367,60	407,40	1960,20
SPD+PC+C	29633,02	3416,65	773,40	2643,25
SPD+PC+G	30111,17	3894,80	953,40	2941,40
SPD+PC+C+G	30918,52	4702,15	1319,40	3382,75
ESC	26831,86	615,49	184,16	431,33
ESC+C	28351,20	2134,82	618,32	1516,50
ESC+G	28791,34	2574,97	798,32	1776,65
ESC+C+G	30005,91	3789,53	1164,32	2625,21
ESC+PC	29408,19	3191,81	659,72	2532,09
ESC+PC+C	30454,82	4238,44	957,56	3280,88
ESC+PC+G	31068,94	4852,56	1137,56	3715,00
ESC+PC+C+G	32110,38	5894,01	1571,72	4322,29

SPD – Sistema Plantio Direto; C – calcário; G – gesso; PC – plantas de cobertura; ESC- escarificação.

Esses resultados contrastam com os observados por Pauletti et al. (2003), onde os rendimentos das culturas não foram afetados pelo sistemas de manejo de solo, e corroboram com os resultados reportados por Botta et al. (2010) e Liu et al. (2010). Os autores reportam a eficiência do uso de escarificadores mecânicos para a descompactação subsuperficial do solo e o incremento da produtividade de soja e milho, respectivamente, em resposta à este manejo.

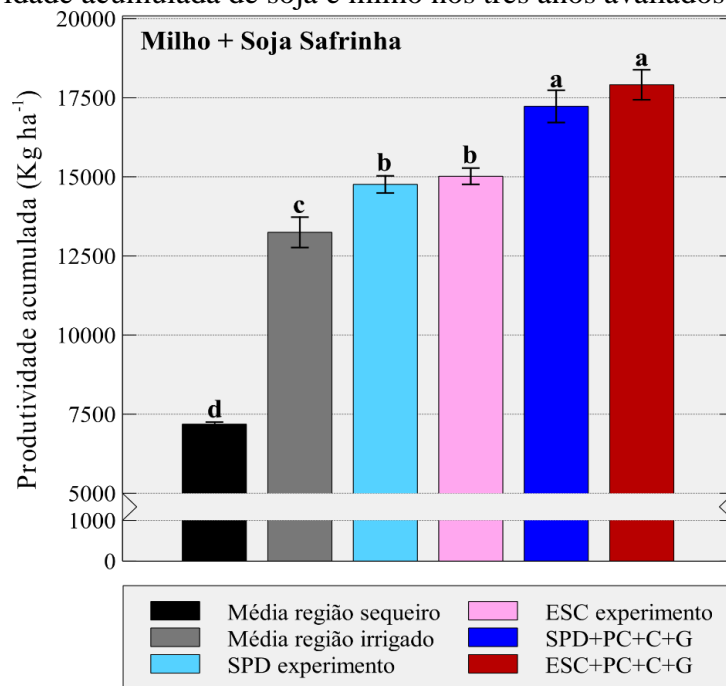
Os maiores incrementos de payback foram observados nos tratamentos ESC+PC+C+G e ESC+PC+G, os quais retornaram R\$30538,72 e R\$29931,38 por hectare, o que representa um incremento de 16,49% e 14,17%, respectivamente, em relação ao SPD, indicando a importância da utilização de manejos integrados para a obtenção de elevados rendimentos e, conseqüentemente, retornos econômicos maiores.

O uso de plantas de cobertura (SPD+PC) também foi eficiente para a atenuação da compactação do solo e, sobretudo, resultou em um retorno econômico superior ao uso da escarificação em 6,53%, o que corrobora com o observado por Debiasi, Levien e Trein (2010) em um Argissolo com problemas de compactação. Este comportamento pode ter sido resultante das diferenças estruturais resultantes da descompactação mecânica e biológica, Oades (1993) afirma que os poros oriundos do uso de plantas de cobertura têm mais

continuidade e são mais eficientes na condução de água e gases no solo, o que pode auxiliar na eficiência do uso da água, principalmente quando se trata de um sistema irrigado.

Na figura 2, é possível observar que o uso associado de plantas de cobertura, independente do sistema de preparo, apresentou as maiores produtividades acumuladas observadas nos três anos agrícolas avaliados, sendo superior, inclusive, à média observada na região com e sem irrigação.

Figura 2. Produtividade acumulada de soja e milho nos três anos avaliados.



SPD – sistema plantio direto; PC – plantas de cobertura; C – calcário; G – gesso.

7.6 CONCLUSÕES

O uso de plantas de cobertura associado a escarificação apresentou retorno do investimento mais rápido em comparação aos demais tratamentos.

As estratégias integradas de manejo de solo proporcionaram maior retorno econômico acumulado em relação ao uso isolado das mesmas.

O uso isolado da escarificação, apesar do baixo custo de implantação, apresentou o menor retorno econômico, mostrando-se nesse caso como um manejo ineficiente. No entanto, ao combiná-la com plantas de cobertura, calcário e gesso, mostrou-se como a melhor estratégia para elevar o rendimento e o retorno econômico.

7.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- 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 & Tillage Research**, v. 110, n. 1, p.167-174, 2010.
- CAIRES, E. F. Calagem e uso de gesso em Sistema Plantio. **Revista Plantio Direto, Não-Me-Toque**, v. 128, p. 1-11, 2012.
- 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.
- CHEN, G.H.; WEIL, R. R. Penetration of cover crop roots through compacted soils. **Plant Soil**, v. 331, p. 31–43, 2010.
- CONKLIN, A. E. et al. Effects of red clover (*Trifolium pretense*) green manure and compost soil amendments on wild mustard (*Brassica kaber*) growth and incidence of disease. **Plant Soil**, v. 238, p. 245-256, 2000.
- DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, 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.
- DALLA NORA, D. et al. Modern high-yielding maize, wheat and soybean cultivars in response to gypsum and lime application on no-till Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1-21, 2017.
- DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 603-612, 2010.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 4ª. 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.823-831, 2001.
- 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.

LIU, Z. A. et al. Yield responde of spring maize to inter-row subsoiling and soil water deficit in Northern China. **PLoS One**, v. 11, n. 4, p. 1-15, 2016.

MCGUIRE, A. M. Mustard green manures replace soil fumigant and improve infiltration in wheat-potato cropping system. In: **Annual Mettings Abstracts**. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, 2002.

MIRANDA L. N. et al. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 6, p. 563-572, 2005.

NICOLOSO, R. S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1723-1734, 2008.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, v. 56, p. 377-400, 1993.

PAULETTI, V. et al. Rendimento de grãos de milho e soja em uma sucessão cultural de oito anos sob diferentes sistemas de manejo de solo e de culturas. **Ciência Rural**, v. 33, n. 3, p. 491-495, 2003.

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.

SNAPP, S. S. et al. Review and interpretation: evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 322-332, 2005.

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, p. 675-688, 2008.

STIVERS-YOUNG, L. Growth, nitrogen accumulation, and weed suppression by fall cover crops following early harvest of vegetables producers in western New York. **HortScience**, v. 33, p. 60-63, 1998.

VALICHESKI, R. et al. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012.

VASCONCELOS, R. C. et al. Estimativa dos custos de produção de milho na safra agrícola 1998/1999 no município de Lavras - MG. **Ciências Agrotecnológicas**, Lavras, v. 26, n. 2, p. 283-291, 2002.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos, é possível verificar uma crescente pressão no setor agrícola em busca do aumento da eficiência e do aperfeiçoamento das ferramentas produtivas disponíveis. Neste contexto, o uso eficiente de sistemas de irrigação possui elevada importância devido ao seu aumento na área agrícola e se tornando uma das tecnologias mais utilizadas atualmente pelos produtores.

O estudo de estratégias de manejo para mitigar as limitações do declínio da qualidade química e física da subsuperfície dos solos, sobretudo os argilosos, manejados sob SPD de longa duração é imprescindível no cenário de produção agrícola atual, principalmente para otimizar a eficiência em áreas com sistemas de irrigação.

Neste estudo, é possível observar que o uso de estratégias mecânicas e biológicas de descompactação do solo são muito eficientes para aliviar a compactação do solo, no entanto, o uso destas ferramentas associadas prolonga este efeito.

Ao associar estratégias de manejo físico, químico e biológico, os resultados desse trabalho evidenciam a importância da integração de manejos, pois ao associar a escarificação, plantas de cobertura, calcário e gesso (ESC+PC+C+G), foi possível observar a mitigação da compactação do solo e a melhoria da qualidade química do solo. Além disso, esta combinação proporcionou o maior rendimento acumulado nas três safras e maior retorno econômico observado.

Os resultados deste trabalho evidenciam que as estratégias de manejo do solo integradas são mais eficientes para a melhoria física e química do perfil do solo em SPD de longa duração do que o uso das mesmas de forma isolada, além de serem mais rentáveis economicamente.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, D. R. B.; FRIZZONE, J. A.; DOURADO NETO, D. Repartição da lâmina de irrigação, aplicada via pivô central, na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 67-70, 2001.
- AMADO, T. J. C. et al. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. **J. Environ. Qual.**, v. 35, p. 1599-1607, 2006.
- AMADO, T. J. C.; GIOTTO, E. A sua lavoura na tela. **Revista A Granja**, São Paulo, SP, p. 38-42, 2009.
- ASABE-American Society of Agricultural and Biological Engineers. **Soil cone penetrometer: ASAE standard S313.3**. St. Joseph: ASABE, 2009.
- BAKSH, A. et al. Spatio-temporal analysis of yield variability for cornsoybean field in Iowa. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 43, p. 31-38, 2001.
- 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. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 1029-1040, 2001.
- 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.
- CHERUBIN, M. R. et al. Caracterização e estratégias de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7 n. 13, p. 196-210, 2011.
- CIOTTA, M. N., BAYER, C.; ERNANI, P. R. et al. Acidificação de um Latossolo Sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1055- 1064, 2002.
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. et al. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008.
- CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira de grãos 2013/2014, Levantamento Final – Maio/2014**. Companhia Nacional de Abastecimento, – v. 1 – Brasília: Conab, 2013.
- CREMON, C. et al. Análise micromorfológica de agregados de um Latossolo Vermelho distroférrico em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.1, p.1399-146, 2009.

CUBILLA, M. et al. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 71, p. 29-32, 2002.

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.

DANTAS NETO, J. et al. Desempenho do sistema de irrigação por aspersão, tipo pivô central rebocável. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 4, p. 481-491, 2009.

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SATTLER, A. **Vertical mulching**: prática conservacionista mitigadora de perdas por erosão hídrica em sistema plantio direto. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008, 8p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 53).

DENARDIN, J. E.; FAGANELO, A.; SANTI, A. Falhas na implementação do sistema plantio direto: Problemas têm acontecido e são resultantes do descaso com a adoção plena do complexo de processos tecnológicos que compõem o sistema de plantio direto. **Revista A Lavoura**, Rio de Janeiro: SNA, v. 112, n. 671, p. 20-22, 2009.

DRESCHER, M. S. et al. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1713-1722, 2011.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 4ª. ed. Brasília: Embrapa-CNPS; 2018.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO E IRRIGAÇÃO – **FEBRAPDP**. Disponível em: http://www.febrapdp.org.br/download/AREA_PD_MUNDO.pdf Acesso em: 09 set. 2013.

FIORIN, J.E.; SCHNELL, A.; RUEDELL, J. **Diagnóstico das propriedades rurais na região de abrangência das cooperativas**. COOPATRIGO, COOPEROQUE, COTAP, COTRISA, COTRISAL (SB) e TRITÍCOLA. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 2007. 176p.

FRIZZONE, J. A.; DOURADO-NETO, D. Avaliação de sistemas de irrigação. In: Miranda, J. H.; PIRES, R. C. M. (Org.). **Irrigação**. Jaboticabal-SP: FUNEP, 1 ed., v. 2, p. 573-651, 2003.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 477-484, 2004.

GOMES, M. A. F; FILIZOLA, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariuna, 2006. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/.../gomes_filizola_indicadores. Acesso em: 15 abril de 2015.

GOULART, A. C. P. Sistema de plantio direto: Sinônimo de Sustentabilidade. **A Lavoura**. Out. 2009

INOUE, T. T. et al. Influência da escarificação em propriedades físicas de um Latossolo vermelho distroférrico após 13 anos de PD. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14. 2002, Cuiabá. **Resumos Expandidos...** Cuiabá: SBCS, 2002. CD-ROM.

JIMENEZ, R. L. et al. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Ver. Bras. Eng. Agr. Ambiental**, v.12 n. 2. Campina Grande. Mar./abr. 2008.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E. Implantação e manejo do sistema plantio direto. Passo Fundo, Embrapa-CNPT, 2000. 36p

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**. Berlin: Walter de Gruyter, 1938. 388p.

LAMB, J. A. et al. Spatial and temporal stability of corn grain yields. **J. Prod. Agric.** v. 10, p. 410-414, 1997.

MACHADO, P. L. O. A. **Considerações gerais sobre a toxicidade de alumínio nas plantas**. Rio de Janeiro: EMBRAPA – CNPS, 1997. 22p.

MATZENAUER, R. et al. Regime anual e estacional de chuvas no estado do Rio Grande do Sul. In: Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. **Anais**, 2007.

MIAO, Y.; MULLA, D. J.; ROBERT, P. C. Spatial variability of soil properties, corn quality and yield in two Illinois, USA fields: Implications for precision corn management. **Precision Agriculture**. v. 7, p. 5-20, 2006.

MOLIN, J. P. et al. **Agricultura de Precisão**. In: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Agricultura de precisão. (Boletim Técnico). – Brasília: Mapa/ACS, 2011. p. 5-27.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92. 2002.

MOLIN, J. P.; SILVA JUNIOR, R. L. D. A. Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com textura e produtividade. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 14, n. 1, p. 49-57, 2004.

NEIS, L. et al. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 409-416, 2010.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Critérios de calagem para a soja no sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p.475-486, 2006.

NOLLA, A et al. Indicadores para a tomada de decisão de calagem em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Agrocência**, Pelotas, v. 11, n. 4, p. 471-476, 2005.

PANACHUKI, E. et al. Rugosidade da superfície do solo sob diferentes sistemas de manejo e influenciada por chuva artificial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 34, n. 2, 2011.

PAULINO, J. et al. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o Censo Agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163-176, Abr./jun., 2011.

PLANT, R. E. et al. Factors underlying grains yield spatial variability in three irrigated wheat fields. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 42, n. 5, p. 1187-1202, 1999.

QUAGGIO, J. A. et al. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 3, p. 375-383, 1993.

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

RAMOS, B. Z et al. Doses de Gesso em cafeeiro: Influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1018-1026, 2013.

RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1687-1698, 2011.

REICHERT, M. R.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do Solo em Sistemas Agropecuários e Florestais: Identificação, Efeitos, Limites Críticos e Mitigação. **Tópicos Ci. Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

ROQUE, M. W. et al. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Rev. Bras. Ciên. Solo**, v. 32, p. 1827-1835, 2008.

SANTOS, A. O. et al. Monitoramento localizado da produtividade de milho cultivado sob irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 88-95, 2001.

SCHLINDWEIN, J. A. et al. Phosphorus and potassium fertilization in no till Southern Brazilian soils. **Agricultural Sciences**, v. 4, n. 12a, p. 39-49, 2013.

SERAFIM, M. E. et al. Alterações físico-químicas e movimentação de íons em Latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 1, p. 75-81, 2012.

SOBRAL, L. F.; CINTRA, F. L. D.; SMYTH, J. T. Lime and gypsum to improve root depth of Orange crop in na Ultisol of the Coastal Tablelands. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, (Suplemento), p. 836-839, 2009.

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, p. 675-688, 2008.

SUZUKI, L. E. A. S. Compactação do solo e sua influência nas propriedades Físicas. 2005. 149f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance. In: JAYAWARDANE, N. S.; STEWART, B. A. (Eds.). Subsoil management techniques. Athens: **Lewis Publishers**, p. 147-185, 1995.

TAYLOR, H. M. et al. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966.

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

TRINDADE, B. S. **Atributos químicos do solo e a produtividade de grãos afetados pelo gesso agrícola**. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

VIACHESLAV, I.; ADAMCHUK, V. I.; MOLIN, J. P. Hastes instrumentadas para a mensuração da resistência mecânica do solo. **Eng. Agr.**, Jaboticabal, v. 26. n. 1, p. 161-169, jan. 2006.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2297-2305, 2008.