

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR NORTE - RS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA:
AGRICULTURA E AMBIENTE**

Diego Armando Amaro da Silva

**ESTRATÉGIAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO PARA
DEFINIÇÃO DE PLANOS DE MANEJO INTELIGENTES**

Frederico Westphalen, RS
2016

Diego Armando Amaro da Silva

**ESTRATÉGIAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO PARA DEFINIÇÃO DE
PLANOS DE MANEJO INTELIGENTES**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luis Santi

Frederico Westphalen, RS
2016

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

Silva, Diego Armando Amaro da
Estratégias de agricultura de precisão para definição de planos de manejo inteligentes / Diego Armando Amaro da Silva.-2016.
128 p.; 30cm

Orientador: Antônio Luis Santi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, CESNORS-FW, Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, RS, 2016

1. Manejo sítio-específico 2. Qualidade do solo 3. Sistemas de culturas 4. Plantas de cobertura do solo 5. Manejo do solo I. Santi, Antônio Luis II. Título.

© 2016

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

Endereço: Av. Guilherme Schaw, 1078, Centro. Campo Novo, RS, CEP 98570-000.

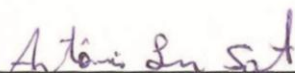
Fone: (0xx55) 8113 4871; Endereço eletrônico: damaro.agro@gmail.com

Diego Armando Amaro da Silva

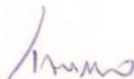
**ESTRATÉGIAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO PARA DEFINIÇÃO DE
PLANOS DE MANEJO INTELIGENTES**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

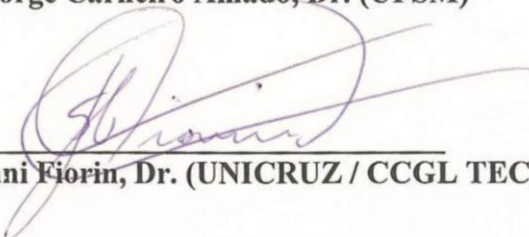
Aprovado em 17 de fevereiro de 2015:



Antônio Luis Santi, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM)



Jackson Ernani Fiorin, Dr. (UNICRUZ / CCGL TEC)

Frederico Westphalen, RS

2016

DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos pais, Nelci e Vera, aos meus avós Florisbal (in memoriam),
Natália, Armando e Cecília, pela vida, a minha mentora, inspiração e irmã,
Danni, aos meus irmãos, Dionni e Daiana, a todos os meus familiares e amigos,
desde o início dessa caminhada, pelo incentivo, carinho e confiança.
A Isadora, pelo amor, pelo carinho, por acreditar em mim, e estar ao meu
lado...*

DEDICO...

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pela qualidade do ensino público e gratuito, por fornecer um lar (Casa do Estudante), e as ferramentas necessárias para uma boa formação desde o início de minha graduação até este presente momento (Bolsas de graduação, mestrado, RU).

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente (PPGAAA), por tornar possível a realização deste sonho, e a todos os professores do Programa, pelas ótimas disciplinas ofertadas, que sem dúvida alguma corresponderam a todas as minhas expectativas. Ao secretário do PPGAAA, Valdecir, pela prestatividade e dedicação, por estar sempre disposto a esclarecer dúvidas e ajudar, mesmo fora do horário de expediente. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos, do início ao fim do mestrado, tornando possível a realização deste com dedicação exclusiva.

Ao Prof. Dr. e orientador Antônio Luis Santi, pela receptividade, por abrir as portas e acreditar na minha palavra e dedicação, mesmo sem me conhecer pessoalmente, pelo companheirismo, incentivos, oportunidades e portas abertas desde o primeiro dia nesta cidade. Serei eternamente grato pela chance recebida, meu sincero muito obrigado. Ao Prof. Dr. Claudir José Basso pela coorientação, e pelas belas palavras de incentivo.

A meu pai Nelci pela vida, pelos ensinamentos, pelo caráter admirável, por ser a pessoa que eu sempre irei querer ser, por sempre ter acreditado no potencial do seu filho. A minha mãe Vera, pela vida, pela educação, pelas oportunidades que me proporcionou, e até mesmo, por duvidares de mim em certos momentos, por ser minha motivação. Aos meus avós Florisbal (*in memoriam*), Armando, Natália e Cecília, pela vida, e por serem as pessoas de bom coração que mesmo depois de meses longe, sempre me receberam com um sorriso tão sincero e feliz, renovando as energias, dando vontade de continuar e querer cada vez mais.

A minha mãe/irmã Danni, pelo apoio incondicional, pela educação, pela inspiração, por ter tido a coragem de enfrentar o desconhecido, abrindo portas que antes nos eram fechadas na vida. E sempre repetirei, desde meu TCC, monografia de especialização, e futuramente minha tese, sem você, nada disso estaria acontecendo agora. A todos os meus tios, primos, sobrinhos, por serem a base de tudo, por alegrar cada fim de semana que era possível ir embora, continuem sendo essas pessoas maravilhosas que cada um de vocês é.

A Isadora pelo amor, carinho, companheirismo, confiança, e acima de qualquer coisa, apoio e compreensão. Por me fazer continuar a ser a pessoa que sou e querer o nosso bem,

independentemente da cidade onde mora, ou para onde irá amanhã. A minha ex-namorada Andressa, por tudo que ela significou e ainda significa na minha vida, por todo o apoio e companheirismo indiscutível, mesmo até quando eu não mereci e, principalmente por ter me transformado em uma pessoa melhor, sempre irei torcer por ti.

Ao meu eterno amigo Tiago Ramos (*in memoriam*), o qual dificilmente fica um dia sem me ajudar em qualquer coisa, seja através da sua luz ou até mesmo das lembranças que permanecem vivas.

Aos Laboratórios de Física do Solo, de Química do Solo e de Agrometeorologia da UFSM-CESNORS, aos professores Vanderlei Rodrigues da Silva, Clóvis Orlando da Ros, Lucindo Somavilla e Braulio Otomar Caron, por terem contribuído ativamente com este trabalho, abrindo as portas para a realização das análises necessárias para a realização desta pesquisa.

Aos colegas de mestrado Cleiton, Ivan, Douglas, André, Patrícia, Marlo, Vanessa e Francisco pela ótima recepção do único ingressante de fora, pela amizade, jogos de futebol, conversas, ajudas em análises e disciplinas, e pela vontade em comum de querer ir além.

Ao Laboratório de Agricultura de Precisão do Sul do Brasil (LAPSul), pela receptividade, pela dedicação, por mostrar que a falta de estrutura e incentivos financeiros não impede ninguém de progredir e realizar uma excelente e útil pesquisa para a agricultura brasileira. Aos lapianos Dejalles, Felipe, Ronei, Marcelo, Danimar, Mateus, Junior, Osmar, Leila, William, Renan, Fernanda, Fagner e Diandra, pela ajuda nas quentes tardes e geladas manhãs e noites, semeando, colhendo, coletando, analisando, rindo. Um especial agradecimento aos lapianos Mauricio e Alencar, pela confiança e dedicação neste trabalho em especial, e um abraço ao meu braço direito, Romano, por ser uma pessoa de caráter exemplar, e dedicação invejável, você irá longe, só basta querer, ainda não consegui mensurar seu real potencial, sempre me surpreende. Ao ex-lapiano e agora doutorando, obrigado Geomar pela infinita ajuda profissional e pessoal desde minha chegada ao LAPSul. A todos os lapianos um muito obrigado, espero ter ajudado muito, ter sido sempre útil, ter sido um amigo, e acima de tudo ter superado as expectativas, de quem era apenas um agrônomo "cabeludo" e "tatuado" na seleção do mestrado, nós trabalhamos duro, acho que nós conseguimos, juntos.

Ao Anderson Moresco, pelas ótimas sementeiras realizadas nos experimentos do LAPSul, estando sempre disponível a ajudar e contribuir para a pesquisa. Ao Carlos Pires pelo auxílio nas análises de agregados e de resistência do solo a penetração.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho e minha formação, meu **Muito Obrigado!** E um **até logo!** . .

EPIGRAFE

“As plantas de inverno servem pra 'engordar' a terra, melhorando a terra e aumentando a produtividade da soja e do milho no verão.”

Florisbal Amaro da Silva
(*in memoriam*)

"Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si."

Ayrton Senna

*"Our greatest weakness lies in giving up.
The most certain way to succeed is always to try just one more time."*

Thomas Edison

"Life can be wonderful if you're not afraid of it..."

Charles Chaplin

RESUMO

ESTRATÉGIAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO PARA DEFINIÇÃO DE PLANOS DE MANEJO INTELIGENTES

AUTOR: Diego Armando Amaro da Silva
ORIENTADOR: Antônio Luis Santi

Este trabalho usou de técnicas de agricultura de precisão (AP) para compreender a dinâmica de atributos físicos, químicos e biológicos do solo em função de diferentes sistemas de culturas de inverno após três anos de cultivo dos mesmos, visando servir como base na definição e indicação de Planos de Manejos Inteligentes (PMI) de forma eficiente e prática. O trabalho foi realizado no município de Frederico Westphalen, RS, sendo avaliados dez sistemas de culturas de inverno - pousio invernal (PO), aveia preta (Ap), aveia branca (AB), azevém (AZ), nabo forrageiro (NF), ervilhaca (E), tremoço branco (TB) e consórcios de ApNFE, ApNF e ApE -, com amostras coletadas nos pontos de cruzamento de uma malha de 5 x 2,5 m, totalizando 100 pontos de amostragem, de modo que houvessem dez pontos amostrais por sistema de cultura de inverno. O estudo baseou-se na avaliação dos efeitos de destes sistemas sobre a dinâmica de distribuição espacial e horizontal dos indicadores físicos, químicos e biológicos do solo, fazendo por fim, uma análise integrada através da proposição de um índice de qualidade do solo (IQS), dando suporte com embasamento firme para futuras indicações de PMI. Além disso, foi avaliada a eficiência do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na estimativa da produção de matéria seca pelos sistemas de culturas de inverno, de modo a fornecer uma ferramenta prática que auxilie no monitoramento do funcionamento dos sistemas escolhidos. Os instrumentos proporcionados pela AP facilitaram a compreensão da dinâmica dos indicadores da qualidade do solo nos sistemas testados, servindo como ferramenta valiosa na definição e indicação de PMI, além de ter proporcionado maior conhecimento da ecologia e comportamento da biologia do solo, sendo possível determinar bioindicadores da qualidade do solo. Com base nos resultados, não recomenda-se optar por determinado sistema baseado em benefícios isolados (indicadores), sendo necessária a avaliação conjunta das variáveis, o que foi facilitado pelo IQS proposto. De forma geral, os sistemas que proporcionaram maior qualidade do solo foram ApNFE, ApE e NF, destacando o crescimento radicular facilitado, além do maior suprimento de nutrientes propiciado por estes sistemas. O uso de gramíneas monocultivadas ocasiona a deterioração dos atributos químicos, devido a baixa relação C/N e C/P destas, funcionando como imobilizadores de nutrientes, devendo ser rotacionados ou consorciados com outras espécies ao longo dos anos. O PO deve ser evitado na prática ou até mesmo extinto, com base na degradação física e biológica proporcionada por este sistema. O NDVI foi capaz de determinar a matéria seca produzida pelos sistemas de forma satisfatória, com exceções de sistemas que apresentem flores visíveis, em consórcio. Os objetivos propostos ao início deste trabalho foram considerados sanados, visto as respostas obtidas nos artigos propostos por este, visando tornar a proposição de manejo multi-plantas ou PMI, mais fundamentada e especializada.

Palavras-chave: Manejo sítio-específico. Qualidade do solo. Sistemas de culturas. Plantas de cobertura do solo. Manejo do solo.

ABSTRACT

PRECISION AGRICULTURE STRATEGIES FOR DEFINITION OF INTELLIGENT MANAGEMENT PLANS

AUTHOR: DIEGO ARMANDO AMARO DA SILVA
ADVISER: ANTÔNIO LUIS SANTI

This study used precision agriculture (AP) techniques to understand the dynamics of physical, chemical and biological soil for different winter management systems after three years of cultivation, to serve as the basis of the definition and indication of Intelligent Management Plans (PMI) in an efficient and practical way. The work was conducted in the city of Frederico Westphalen, RS, were evaluated ten winter management systems - fallow (PO), wild oat (Ap), white oat (AB), ryegrass (AZ), forage turnip (NF) vetch (E), white lupine (TB) and consortiums ApNFE, ApNF and ApE - with samples collected at the intersection points of a grid of 5 x 2.5 m, totaling 100 sampling points, so that there were ten points by sampling winter management system. The study was based on the evaluation of the effects of systems on the dynamics of spatial and horizontal distribution of physical, chemical and biological indicators of soil quality, an integrated analysis by proposing a soil quality index (IQS), providing support for future directions of PMI. In addition, it assessed the efficiency of the normalized difference vegetation index (NDVI) for estimating the production of the dry matter of winter management systems in order to provide a practical tool to assist in monitoring the operation of selected systems. The tools provided by AP facilitate the understanding of the dynamics of soil quality indicators in the tested systems, serving as a valuable tool in the definition and indication of PMI, providing greater knowledge of the ecology and behavior of soil biology, being possible to determine soil quality bioindicators. Based on the results, not recommended to opt for a system based in isolated benefits (indicators), requiring the joint evaluation of the variables, which was facilitated by the proposed IQS. In general, the systems that provide soil quality were ApNFE, ApE and NF, highlighting the facilitated root growth, in addition to greater nutrient supply afforded by these systems. The use of grass monocultures causes deterioration of chemical properties, due to low C/N and C/P ratios these systems, acting as nutrients immobilizers, must be rotated or consorted with other species over the years. The PO should be avoided in practice or even extinct, based on physical and biological degradation provided by this system. The NDVI was able to determine the dry matter produced by cover crops, except systems with visible flowers or consorted. The objectives proposed by this study were considered solved, since the answers obtained in the articles proposed by the latter, in order to make the multi-plant management or PMI proposition, more grounded and specialized.

Key words: Site-specific management. Soil quality. Management systems. Cover crops. Soil Management.

LISTA DE TABELAS

ARTIGO I

Tabela 1 – Histórico de cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen, RS, 2014	30
Tabela 2 – Média dos valores de umidade gravimétrica do solo dos sistemas de culturas de inverno analisados, em cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014	31
Tabela 3 – Estatística descritiva dos atributos físicos do solo em dez sistemas de culturas de inverno em diferentes profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	32
Tabela 4 – Valores da resistência do solo à penetração, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, e porosidade total do solo (P_t , $m^3 m^{-3}$), em dez sistemas de culturas de inverno e cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	34
Tabela 5 – Valores médios dos atributos físicos do solo em cinco profundidades sob dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014	37
Tabela 6 – Distribuição de agregados em cinco classes em dez sistemas de culturas de inverno e duas profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	43
Tabela 7 – Coeficientes de correlação simples de Pearson entre os atributos físicos do solo analisados em dez sistemas de culturas de inverno, Frederico Westphalen, RS, 2014	44

ARTIGO II

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen, RS, 2014	55
Tabela 2 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo em dez sistemas de culturas de inverno em cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014 ...	57
Tabela 3 – Valores médios dos atributos químicos do solo em cinco profundidades sob dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	58
Tabela 4 – Valores dos atributos químicos analisados em dez sistemas de culturas de inverno em cinco profundidades, Frederico Westphalen, RS, 2014.....	60
Tabela 5 – Coeficientes de correlação simples de Pearson entre os atributos químicos do solo analisados em dez sistemas de culturas de inverno, Frederico Westphalen, RS, 2014.	63

ARTIGO III

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen, RS, 2014	75
Tabela 2 – Valores dos atributos matéria orgânica do solo, pHágua e teores extraíveis de P e K no solo em dez sistemas de culturas de inverno na profundidade de 0,00 - 0,10 m. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	76

Tabela 3 – Estatística descritiva e dos atributos biológicos e químicos do solo, e produção de matéria seca da área experimental. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	77
Tabela 4 – Frequência relativa de ocorrência total e por ordem da fauna do solo em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	78
Tabela 5 – Matriz de correlação simples de Pearson entre os atributos químicos do solo analisados em dez sistemas de culturas de inverno, Frederico Westphalen, RS, 2014.....	84

ARTIGO IV

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	95
Tabela 2 – Funções principais e indicadores físicos, químicos e biológicos utilizados na avaliação da qualidade do solo em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	97
Tabela 3 – Valores dos indicadores químicos de qualidade do solo na camada 0,00 - 0,10 m em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	99
Tabela 4 – Valores dos indicadores físicos de qualidade do solo na camada 0,00 - 0,10 m em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	100
Tabela 5 – Valores dos indicadores biológicos de qualidade do solo na camada 0,00 - 0,10 m em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	101
Tabela 6 – Valores das funções principais e dos índices de qualidade do solo (IQS) em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	102
Tabela 7 – Análise de componentes principais dos indicadores de qualidade química, física e biológica do solo em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014.....	104

ARTIGO V

Tabela 1 – Composição e características químicas e físicas do solo da área experimental..	115
---	-----

LISTA DE FIGURAS

INTRODUÇÃO

- Figura 1 – Esquema demonstrativo da definição das áreas de baixa produtividade estáveis a serem executados Planos de Manejo Inteligentes (PMI's). Boa Vista das Missões, RS, 2015 22

ARTIGO I

- Figura 1 – Produção de matéria seca em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014..... 35
- Figura 2 – Distribuição espacial horizontal e vertical da resistência do solo à penetração e densidade do solo em dez sistemas de culturas de inverno e cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014 36
- Figura 3 – Distribuição espacial horizontal e vertical da macroporosidade, microporosidade, porosidade total do solo, diâmetro médio geométrico, e agregados > 4,75 mm em dez sistemas de culturas de inverno e cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014 38
- Figura 4 – Profundidade necessária até 2 MPa (topo) da resistência do solo à penetração em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014..... 40
- Figura 5 – Representação gráfica (3D) da espacialização horizontal e vertical da profundidade necessária até 2 MPa (topo) de resistência do solo à penetração em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014..... 41
- Figura 6 – Diâmetro médio geométrico nas profundidades de 0,00 - 0,05 e 0,05 - 0,10 m em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014 42

ARTIGO II

- Figura 1 – Produção de matéria seca em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014..... 62

ARTIGO III

- Figura 1 – Produção de matéria seca em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014..... 79
- Figura 2 – Distribuição espacial dos atributos químicos e biológicos do solo, e produção de matéria seca das plantas em sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014..... 81
- Figura 3 – Peso da biomassa da fauna do solo, abundância de indivíduos riqueza de ordens, e índices de dominância de Simpson (Is), diversidade de Shannon (H) e de uniformidade de Pielou (J) em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014. 83

ARTIGO IV

Figura 1 – Escala de pontuação padronizada: (a) "mais é melhor", (b) "ótimo" e (c) "menos é melhor"	98
---	----

ARTIGO V

Figura 1 – Produção de Massa da matéria seca em diferentes sistemas e plantas de cobertura do solo	117
Figura 2 – NDVI observado no momento da coleta em diferentes sistemas de plantas de cobertura do solo.	118
Figura 3 – Análise de regressão entre a produção de fitomassa seca e NDVI em dez sistemas de plantas de cobertura do solo.....	119

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	HIPÓTESE	23
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivo geral	23
1.2.2	Objetivos específicos	24
2'	ARTIGO I – EFEITO DE SISTEMAS DE CULTURAS DE INVERNO NA VARIABILIDADE HORIZONTAL E VERTICAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	25
2.1	RESUMO	25
2.2	ABSTRACT	26
2.3	INTRODUÇÃO	26
2.4	MATERIAL E MÉTODOS	29
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
2.6	CONCLUSÕES	43
2.7	AGRADECIMENTOS	44
2.8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
3	ARTIGO II – EFEITO DE SISTEMAS DE CULTURAS DE INVERNO NA DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS SOLO	51
3.1	RESUMO	51
3.2	ABSTRACT	52
3.3	INTRODUÇÃO	52
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	54
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
3.6	CONCLUSÕES	64
3.7	AGRADECIMENTOS	65
3.8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
4	ARTIGO III – DETERMINAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE BIOINDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE CULTURAS DE INVERNO NO SUL DO BRASIL	71
4.1	RESUMO	71
4.2	ABSTRACT	72
4.3	INTRODUÇÃO	72
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	74
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.6	CONCLUSÕES	85
4.7	AGRADECIMENTOS	85
4.8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
5	ARTIGO IV – USO DE ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO NA DEFINIÇÃO DE PLANOS DE MANEJO INTELIGENTES EM ÁREA MANEJADA COM AGRICULTURA DE PRECISÃO	91
5.1	RESUMO	91
5.2	ABSTRACT	92
5.3	INTRODUÇÃO	92
5.4	MATERIAL E MÉTODOS	94

5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	98
5.6	CONCLUSÕES	105
5.7	AGRADECIMENTOS	105
5.8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
6	ARTIGO V – USO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE PLANTAS DE COBERTURAS DO SOLO .	113
6.1	RESUMO.....	113
6.2	ABSTRACT	113
6.3	INTRODUÇÃO.....	114
6.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	115
6.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	117
6.6	CONCLUSÕES	120
6.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
7	DISCUSSÃO	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

1 INTRODUÇÃO

A inovação tecnológica é imprescindível para o desenvolvimento do país, ocorrendo em todos os setores, não sendo diferente no agronegócio (BERNARDI et al., 2015), como é o caso da agricultura de precisão (AP), que vem se destacando e se consolidando nos últimos anos como uma excelente forma de gerenciamento da lavoura, realizada através da disponibilização de ferramentas que permitem a identificação detalhada da variabilidade dos atributos da lavoura, permitindo uma intervenção de forma localizada (MENEGATTI et al., 2005), através do georreferenciamento das atividades (SOARES FILHO e CUNHA, 2015).

A AP compreende um conjunto de técnicas e instrumentos que visam gerenciar com eficiência a utilização de insumos nas áreas produtivas, prezando pela racionalização das técnicas de cultivo e preservação do meio ambiente (EITELWEIN, 2013), e segundo Zhao et al. (2010), podendo ser considerada uma solução para manter o equilíbrio entre o desenvolvimento sustentável e os benefícios ambientais.

O ciclo de atividades da AP pode iniciar um mapeamento da produtividade da lavoura, sendo esta a informação mais completa para o conhecimento da variabilidade produtiva (MOLIN, 2002), representando o resultado final de todas as técnicas utilizadas para a produção (EITELWEIN, 2013). A partir desta informação pode-se investigar as causas das produtividades encontradas, buscando correlacionar indicadores da qualidade do solo com atributos de planta, identificando aqueles que possam estar limitando a produtividade, como os indicadores químicos e físicos do solo (SANTI et al., 2012; BERNARDI et al., 2014a; SANA et al., 2014), além do biológico (CORASSA, 2013), fator pouco pesquisado até agora.

Porém, mesmo com os inegáveis reflexos do uso dessas tecnologias observadas diretamente na produção de grãos em curto prazo (SANTI et al., 2013), o pensamento de que amostragem georreferenciada de atributos de solo e planta, elaboração de mapas temáticos, aplicação em taxa variada de corretivos e fertilizantes, manejo de nitrogênio (N) baseado em sensores em tempo real, uso de imagens aéreas e de outras tecnologias proporcionadas pela AP, irão por si só garantir altas produtividades e sustentabilidade econômica e ambiental, é um erro que conduzirá, em poucos anos, a degradação do sistema solo (SANTI et al., 2014).

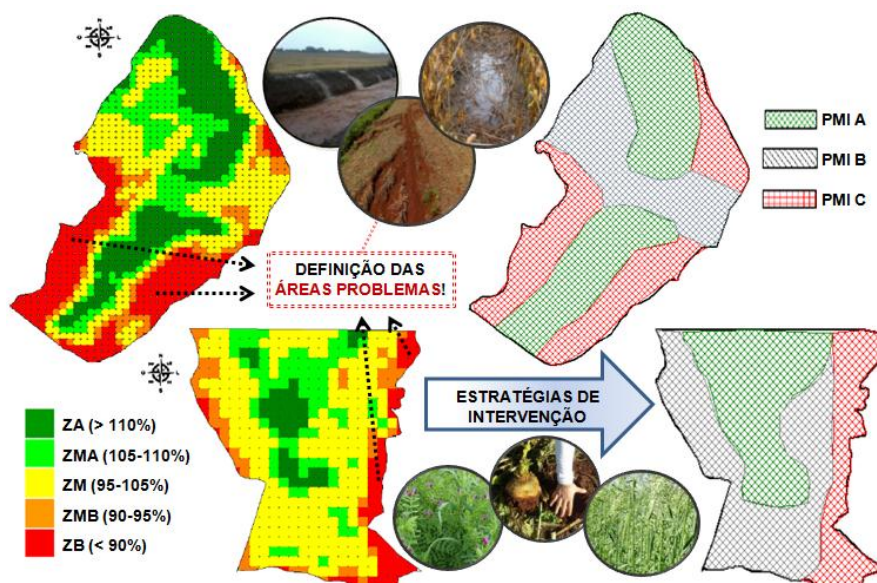
A agricultura de uma forma geral, tem passado por uma série de transformações, tornando-se uma atividade que requer cada vez mais o gerenciamento de seus processos produtivos (SOARES FILHO e CUNHA, 2015). Dessa forma, precisa-se ter a percepção, de que por mais que o conhecimento das principais culturas venha aumentando de forma organizada e haja incorporação rápida das inovações tecnológicas, ainda faltam ferramentas que auxiliem no processo de informações obtidas em cada talhão, na tomada de decisão e na

operacionalização de manejo diferenciado (RESENDE e VILELA, 2011), principalmente no que tange a melhor administração da AP, extraindo, mais dos resultados (SANTI et al., 2014), mesmo que para isso, tenha que se primar pelo uso massivo de tecnologias e a integração de conhecimentos (BERNARDI et al., 2014b).

Ainda, é realidade de muitas lavouras situações como talhões que apresentam suas características químicas acima dos padrões considerados ótimos pelas instituições de pesquisa - solos de fertilidade construída - muito devido às contribuições da AP e, mesmo assim a variabilidade produtiva continua ocorrendo, ou seja, locais "muito parecidos" estruturalmente e quimicamente, mas que são muito diferentes em se tratando de produtividade. Dessa forma, se necessita de um entendimento mais amplo em relação a multifuncionalidade dos sistemas envolvendo a cobertura do solo (SANTI et al., 2014), sendo neste contexto, que um Plano de Manejo Inteligente (PMI) pode ser executado, planejando intervenções especializadas e localizadas, considerando as particularidades e gargalos existentes em cada talhão, priorizando estratégias multi-plantas e o uso racional da rotação de culturas.

Conhecendo o histórico da lavoura, e a partir da definição das zonas de baixa produtividade, do conhecimento detalhado da área e da posterior identificação dos fatores que limitam a produtividade, pode-se planejar uma estratégia multi-plantas com intervenção localizada (Figura 1), visando mitigar os problemas encontrados, atingindo um patamar de maior sustentabilidade e estabilidade produtiva na lavoura como um todo.

Figura 1 – Esquema demonstrativo da definição das áreas de baixa produtividade estáveis a serem executados Planos de Manejo Inteligentes (PMI's). Boa Vista das Missões, RS, 2015. Fonte: adaptado de Corassa, 2015



No Sul do Brasil, são comumente usadas coberturas de aveia preta ou nabo forrageiro, no inverno e, embora seus benefícios sejam inegáveis, é necessário avaliar os efeitos sobre a qualidade do solo como um todo, sendo a integração das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, que o habilitam a exercer suas funções na plenitude (VEZZANI e MIELNICZUK, 2009). Muitos são os trabalhos que retratam os benefícios do uso de outras plantas de cobertura do solo, envolvendo atributos químicos, físicos e biológicos do solo, porém, utilizar um sistema de cultura com base em benefícios isolados de uma única planta, pode ser um erro, visto a complexidade e a variabilidade dos sistemas de culturas (FREITAS et al., 2012), resultando na incerteza sobre a sustentabilidade destas práticas.

O desafio dos estudos sobre a sustentabilidade está relacionado ao desenvolvimento de métodos para avaliação da qualidade do solo e do ambiente agrícola (MELLONI et al., 2008), havendo um esforço conjunto e multidisciplinar tentando reunir e quantificar atributos que se relacionem com a qualidade do solo, permitindo avaliar os efeitos integrados dos fatores que a influenciam, expressando o mesmo por meio de índices (MELO FILHO et al., 2009; FREITAS et al., 2012; MAIA, 2013). Assim, no sul do Brasil, onde as intervenções extra produção de grãos costumam se limitar ao manejo durante o período de inverno, há a necessidade, de se avaliar os sistemas de culturas que funcionem na prática, visando obter maior qualidade dos solos agrícolas, aumentando a sustentabilidade produtiva.

1.1 HIPÓTESE

A prática da utilização de sistemas de culturas de inverno em consórcio é capaz de promover em ambientes com histórico de baixa produtividade, melhorias positivas mais acentuadas na qualidade física, química e biológica do solo que sistemas de culturas de inverno em monocultivos ou vegetação espontânea (pousio invernal).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Usar de técnicas de agricultura de precisão para a compreensão da dinâmica de atributos físicos, químicos e biológicos do solo em função de diferentes sistemas de culturas de inverno em médio prazo, visando servir como base na definição e indicação de Planos de Manejo Inteligentes.

1.2.2 Objetivos específicos

Identificar e analisar os efeitos dos sistemas de culturas de inverno na distribuição espacial e em profundidade dos atributos físicos do solo.

Identificar e analisar os efeitos dos sistemas de culturas de inverno na distribuição espacial e em profundidade dos atributos da química do solo.

Compreender os efeitos dos sistemas de culturas de inverno sobre a ecologia e distribuição espacial da fauna edáfica utilizando ferramentas de agricultura de precisão.

Identificar possíveis bioindicadores de qualidade ou estresse do solo em diferentes sistemas de culturas de inverno utilizando ferramentas de agricultura de precisão.

Estabelecer um índice de qualidade do solo (IQS) em dez sistemas de culturas de inverno, por meio da análise conjunta dos indicadores físicos, químicos e biológicos da qualidade do solo.

Identificar quais os indicadores de qualidade do solo são mais sensíveis aos sistemas de culturas de inverno, a fim de orientar intervenções de manejo por talhão, fornecendo subsídio para indicação de Planos de Manejo Inteligentes.

Avaliar a eficiência do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na estimativa da produção de matéria seca produzida pelos sistemas de culturas de inverno.

2 ARTIGO I – EFEITO DE SISTEMAS DE CULTURAS DE INVERNO NA VARIABILIDADE HORIZONTAL E VERTICAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

2.1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de sistemas de culturas de inverno após três ciclos de cultivo na distribuição espacial horizontal e vertical dos atributos físicos do solo em área manejada sob sistema plantio direto (SPD) com ferramentas de agricultura de precisão, no sul do Brasil. O trabalho foi realizado em sistema fatorial 10 x 5, sendo analisados dez sistemas de culturas de inverno - pousio invernal (PO), aveia preta (Ap), aveia branca (AB), azevém (AZ), nabo forrageiro (NF), ervilhaca (E), tremoço branco (TB) e consórcios de ApNFE, ApNF e ApE - em cinco profundidades de coleta (0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 e 0,20-0,25 m), e fatorial 10 x 2, na análise da agregação do solo em duas profundidades (0,00-0,05 e 0,05-0,10 m), todas realizadas com dez repetições por sistema em cada profundidade e 50 na análise da resistência do solo à penetração. Os atributos físicos determinados foram: densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (Pt), resistência do solo à penetração (RP), e a estabilidade de agregados em água. As variáveis foram submetidas a análise descritiva dos dados, classificando conforme coeficiente de variação obtido, ao teste de normalidade Shapiro-Wilk, a análise de variância, agrupando as médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), além de correlação simples de Pearson. Para espacialização dos resultados, foi utilizado o software SURFER 11®. Os resultados demonstraram que as gramíneas monocultivadas proporcionaram melhorias nos parâmetros de compactação do solo, com Ap e AB reduzindo a Ds e AZ reduzindo a RP, além de aumentar a profundidade necessária para se atingir 2 MPa. O uso de NF e ApNF proporcionaram redução da Ds e aumento da porosidade na camada de 0,10 - 0,15 m. Os sistemas consorciados promoveram melhorias na física do solo, em contraposto do PO, não reduzindo a compactação do solo e tornando-a mais superficial, reduzindo a aeração e prejudicando a agregação do solo. De modo geral, o efeito dos sistemas de culturas de inverno sobre os atributos físicos do solo restringiu-se à camada entre 0,15 e 0,20 m, diminuindo em profundidades maiores após três anos de manejo.

PALAVRAS-CHAVE: Compactação do solo. Estrutura do solo. Plantas de cobertura do solo. Planos de Manejo Inteligentes. Agricultura de Precisão.

2.2 ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the influence of winter management system after three years of cultivation in the horizontal and vertical spatial distribution of soil physical attributes in managed area under no-tillage (SPD) with precision agriculture tools in southern Brazil. The study was conducted in factorial system 10 x 5 and analyzed ten winter management systems - fallow (PO), wild oat (Ap), white oat (AB), ryegrass (AZ), forage turnip (NF) vetch (E), white lupine (TB) and consortiums ApNFE, ApNF and ApE - in five depths collection (0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15, 0.15-0.20 and 0.20-0.25 m), and factorial 10 x 2, in soil aggregation analysis in two depths (0.00-0.05 and 0.05-0.10 m), all performed with ten replicates per system in each depth and 50 replicates in the analysis of soil penetration resistance. The physical attributes determined were: bulk density (Ds), macroporosity (Mac), microporosity (Mic), total porosity (Pt), penetration soil resistance (RP), and the stability of aggregates in water. The variables were submitted to descriptive analysis, ranking according variation coefficient obtained, to normality Shapiro-Wilk test, analysis of variance, gathering the means by Scott-Knott test ($p < 0.05$), and correlation of Pearson with ASSISTAT 7.7 software. For spatialization of the results, we used the SURFER 11® software. The results showed that the monoculture grasses provided improvements in soil compaction parameters, with Ap and AB reducing the Ds and AZ reducing the RP, in addition to increasing the depth needed to reach 2 MPa. The use of NF and ApNF provides Ds reduction and increased porosity in the layer of 0.10 to 0.15 m. The intercropping systems promoted improvements in soil physics in opposed the PO, that did not reduce soil compaction, making it the most superficial, reducing aeration and damaging soil aggregation. In general, the effect of winter management systems on soil physical properties was restricted to the layer between 0.15 and 0.20 m, decreasing at greater depths after three years of management.

KEYWORDS: Soil compaction. Soil structure. Cover crops. Intelligent Management Plans. Precision Agriculture.

2.3 INTRODUÇÃO

A Agricultura tem passado por uma série de transformações, tornando-se uma atividade que requer cada vez mais o gerenciamento de seus processos produtivos (SOARES FILHO e CUNHA, 2015). Dentre estas ferramentas, a agricultura de precisão (AP),

relativamente nova no Brasil, tem proporcionado metodologias que poderão solucionar vários problemas da agricultura nacional (MOLIN et al., 2010), proporcionando conhecimento detalhado da variabilidade espacial da produção e dos fatores que a definem (MOLIN, 2002). Entretanto, maior parte dos estudos tem se focado na avaliação de atributos químicos do solo, os quais por vezes já apresentam valores dentro dos limites estabelecidos pelas recomendações e pesquisas, necessitando avaliar outros fatores produtivos.

Os sistemas agrícolas que associam a monocultura ao uso de equipamentos inadequados de preparo do solo resultam em rápida degradação do solo (FERREIRA et al., 2010). Quando o enfoque é produtividade, dá-se mais atenção à parte química, fazendo com que a qualidade física do solo muitas vezes seja desconsiderada, todavia, as plantas também necessitam de solos com condições físicas favoráveis para o seu desenvolvimento adequado (COLLARES et al., 2006), representando uma função de extrema importância às culturas (CANCIAN, 2015). Dessa forma, indicadores que refletem as condições da física do solo devem ser estabelecidos de modo a apoiar melhores práticas de manejo e o gerenciamento dos solos agrícolas (PEREIRA et al., 2015).

O sistema plantio direto (SPD), com área plantada superior a 25 milhões de hectares no Brasil (FEBRAPDP, 2016), é frequentemente utilizado como uma solução para a melhoria de alguns atributos do solo (CHEN e WEIL, 2010). Entretanto, a ausência de revolvimento a longo prazo, associada à maior intensidade de uso da terra e ao tráfego de máquinas, pode resultar em alteração da qualidade estrutural do solo, acarretando em aumento da compactação do solo (COLLARES et al., 2006), com algumas práticas podendo até mesmo piorar a estrutura do solo e acelerar sua degradação (McGARRY e SHARP, 2001).

O processo de compactação aumenta a densidade e diminui a macroporosidade do solo (FIDALSKI et al., 2007), além de aumentar a resistência do solo à penetração ou crescimento radicular (RP), fazendo com que o sistema radicular se concentre próximo à superfície (MULLER et al., 2001), tornando a planta mais susceptível a problemas de déficits hídricos e com limitada capacidade de absorver nutrientes em camadas subsuperficiais (ROSOLEM et al., 1994; LANZANOVA et al., 2007; FERREIRA et al., 2010). Assim, do ponto de vista biológico, um solo com boa qualidade física requer balanço entre aeração e retenção de água, assim como RP não impeditiva ao crescimento e às funções fisiológicas das raízes (LETEY, 1985; MOREIRA et al., 2014).

Vários estudos tem buscado determinar valores limitativos ao crescimento radicular, tendo sido aceito que leituras superiores a 2 MPa atingem o limite crítico de resistência mecânica do solo à penetração, impedindo de forma significativa o crescimento radicular,

reduzindo a produtividade das culturas (TAYLOR e GARDNER, 1963; SILVA et al., 2000; HAMZA e ANDERSON, 2005), sendo portanto, o máximo de compactação do solo que as plantas podem tolerar sem prejudicar suas funções (JUNG et al., 2010).

Outro fator importante para avaliar a qualidade física, é a agregação do solo, sendo componente importante da estrutura e, portanto, de suma importância na manutenção da porosidade e aeração do solo, no crescimento das plantas e da população microbiana, na infiltração de água e no controle de processos erosivos (OADES, 1984), estando o aumento da estabilidade dos agregados intimamente ligado a capacidade da matéria orgânica - agente cimentante - de se aderir às partículas minerais do solo (EDWARDS e BREMMER, 1967; CASTRO FILHO et al., 1998; BASTOS et al., 2005).

A escarificação mecânica tem sido sugerida para aliviar a compactação do solo em áreas de SPD consolidado (CAMARA e KLEIN, 2005), pois reduz a densidade e melhora a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água, no entanto, seu efeito é temporário e o solo tende a retornar em pouco tempo à sua condição original (BUSSCHER et al., 2002), exigindo a repetição da operação regularmente (NICOLOSO et al., 2008). A alternativa é o uso de plantas de cobertura - método biológico - que possuem capacidade de crescer em solo compactado (MAGALHÃES et al., 2009), formar bioporos estáveis (CUBILLA et al., 2002; SILVA JUNIOR et al., 2012), proteger o solo contra o impacto direto das gotas de chuva (DERPSCH, 2009), manter adequadas as taxas de infiltração de água no solo (PANACHUKI et al., 2011), reduzir as perdas de água e solo por erosão hídrica (STONE e SILVEIRA, 1999; TARTARI et al., 2012), aumentar o armazenamento de água no solo (BLAINSKI et al., 2012), alterar o suprimento e distribuição de carbono (C) no solo formando material de estabilização estrutural (KAY, 1990; CAMPOS et al., 1999), além de modificar os atributos físicos direta ou indiretamente relacionados com o crescimento e a produção das plantas.

Ainda, segundo Silva Junior et al. (2012), estudos indicam que diferentes sistemas de culturas e resíduos culturais influem nos atributos físicos do solo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de sistemas de culturas de inverno após três anos de cultivo na distribuição espacial horizontal e vertical dos atributos físicos do solo, em área manejada sob SPD com ferramentas de agricultura de precisão, no sul do Brasil.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

Local

O estudo foi realizado em área experimental da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, campus do município de Frederico Westphalen, RS, localizada nas coordenadas 27°23'24.33" S e 53°25'39.58" O, com altitude de 483 m. O clima do local é subtropical de primavera úmida (STPU) com temperatura média anual de 18,1°C, e precipitação pluvial anual média de 1.919mm bem distribuídos ao longo do ano (MALUF, 2000). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS et al., 2013), com textura argilosa (660 g kg⁻¹) e relevo suave ondulado.

Coleta de dados

O presente trabalho avaliou diferentes sistemas de culturas de inverno em sistema fatorial 10 x 5, composto por dez sistemas de culturas de inverno e cinco profundidades de coleta (0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 e 0,20-0,25 m), e em fatorial 10 x 2, na análise da agregação do solo, composto pelos mesmos tratamentos e duas profundidades (0,00-0,05 e 0,05-0,10 m). Todas as análises foram realizadas com dez repetições por sistema em cada profundidade, e 50 na análise da RP. Os sistemas de culturas de inverno foram implantados, pelo terceiro ano consecutivo, na primeira quinzena do mês de maio de cada ano, sendo: aveia preta (*Avena strigosa* S. - Ap), aveia branca (*Avena sativa* L. - AB), azevém (*Lolium multiflorum* L. - AZ), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. - NF), ervilhaca (*Vicia sativa* L. - E), aveia preta + ervilhaca + nabo forrageiro (ApNFE), aveia preta + nabo forrageiro (ApNF), aveia preta + ervilhaca (ApE), tremoço branco (*Lupinus albus* L. - TB) e pousio invernal (vegetação espontânea - PO). O histórico de cultivos e as adubações na área experimental estão especificadas na Tabela 1.

Na primeira semana de setembro de 2014 foi coletada uma amostra das plantas por parcela, com quadro metálico de 0,5 x 0,5 m, sendo secas em estufa (65°C) até peso constante, de modo estimar o peso da matéria seca (MS) produzida por cada sistema de cultura de inverno.

As amostragens de solo nas áreas estudadas foram realizadas em outubro de 2014, 40 dias após a dessecação das plantas de cobertura do solo, sendo coletadas amostras indeformadas através de anéis volumétricos (98 cm³), nas cinco camadas de solo em cada

parcela, para determinar a densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e a porosidade total (Pt) do solo. Para a determinação dos agregados estáveis em água foram coletadas amostras nas duas camadas mais superficiais em cada parcela, sendo obtida através do método proposto por Kemper e Chepil (1965), sendo calculados o diâmetro médio geométrico (DMG) e a porcentagem de agregados estáveis em cada classe (8,00 - 4,76; 4,76 - 2,00; 2,00 - 1,00; 1,00 - 0,21 e menor que 0,21 mm), calculados segundo as proposições da metodologia de Tisdall et al. (1978).

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen, RS, 2014

Ano	Período	Cultura	Data de sementeira	Adubação (NPK)	Quantidade (kg ha ⁻¹)	Forma de aplicação
2012	Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	Calagem **	3500* **	Lanço/Incorporado **
	Verão	Feijão	2ª semana de outubro	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
			Milho safrinha	4ª semana de janeiro	09-25-15 45-00-00	350 250
		Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	**	**
2013	Verão	Feijão	2ª semana de outubro	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
	2014	Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	**	**

(*) Calcário dolomítico PRNT 85%; (**) Sem Adubação (NPK).

As avaliações de RP foram procedidas até a profundidade de 0,25 m, em quatro diferentes épocas, realizadas entre os meses de setembro e novembro de 2014, todas efetuadas até 48 h após plena saturação do solo, a fim de proceder as leituras próximas à capacidade de campo (PREVEDELLO, 1999; SANTOS et al., 2013), procurando minimizar os efeitos da coesão entre partículas de solo (BELTRAME et al., 1981; ARSHAD et al., 1996; NEIRO et al., 2003). Para a determinação da umidade gravimétrica do solo (Tabela 2), foram coletadas duas amostras de solo por época em cada sistema, as quais não apresentaram diferença significativa entre sistemas de culturas.

A RP foi determinada através de um penetrômetro digital marca Falker modelo penetroLOG PLG1020®, haste de 0,40 m, cone com diâmetro de 0,00794 m e ângulo de cone de 30°. Em cada época foram analisadas cinco repetições por parcela, totalizando 20 repetições por ponto nas quatro avaliações, sendo analisadas em conjunto de modo a obter maior consistência dos dados e maior precisão nos resultados. Para uma análise mais profunda dos efeitos dos sistemas de culturas sobre a compactação do solo, foi determinada a profundidade necessária (cm) para se chegar a 2 MPa, resistência considerada limitante ao crescimento radicular (JUNG et al., 2010).

Tabela 2 – Média dos valores de umidade gravimétrica do solo dos sistemas de culturas de inverno analisados, em cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014

Umidade gravimétrica do solo (kg kg ⁻¹)					
Profundidade (m)	Época 1	Época 2	Época 3	Época 4	Média das Épocas
0,00 - 0,05	0,26	0,26	0,24	0,25	0,25
0,05 - 0,10	0,26	0,26	0,24	0,25	0,25
0,10 - 0,15	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26
0,15 - 0,20	0,27	0,25	0,25	0,25	0,26
0,20 - 0,25	0,27	0,27	0,26	0,27	0,27

⁽¹⁾ Época 1: 21/09/2014; Época 2: 03/10/2014; Época 3: 05/11/2014; Época 4: 09/11/2014.

Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise exploratória (estatística descritiva), objetivando verificar a posição e dispersão dos dados, e sendo verificada a existência de tendência central (normalidade) dos dados por meio do Teste Shapiro-Wilk (W) a $p < 0,05$ (SHAPIRO e WILK, 1965). Para mensuração da dispersão espacial, os valores de coeficiente de variação (CV) foram classificados segundo Warrick e Nielsen (1980), utilizados para atributos físicos, sendo: baixa ($CV < 12\%$), moderada ($12\% < CV < 60\%$), e alta variabilidade ($CV > 60\%$). Foi efetuada a análise da variância e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), conforme Ferreira et al. (2012), além da correlação simples de Pearson entre os atributos analisados, classificados como: fraca ($0,1 < r < 0,3$), moderada ($0,4 < r < 0,6$), forte ($r > 0,7$), e ideal ($r = 1$), conforme Dancy e Reidy (2006). Na análise dos dados foi utilizado o programa estatístico ASSISTAT 7.7. Para espacialização dos resultados através de mapas temáticos, foi utilizado o software SURFER 11®.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes a análise descritiva exploratória dos atributos físicos do solo são apresentados na Tabela 3. Em relação ao teste Shapiro-Wilk, observa-se normalidade apenas para as variáveis RP, profundidade necessária até 2MPa, além da Mic na camada de 0,20 - 0,25 m, apresentando assimetrias e curtoses menores que 1. Todavia, apesar da distribuição normal ser desejada, a mesma não é exigida para a interpolação dos dados através da krigagem na espacialização dos dados (CRESSIE, 1991).

Tabela 3 – Estatística descritiva dos atributos físicos do solo em dez sistemas de culturas de inverno em diferentes profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014

Variável ⁽²⁾	Profundidade de amostragem (m)	Parâmetros Estatísticos ⁽¹⁾								
		n	Valores			DP	Coeficientes			Teste W ⁽³⁾
			Mínimo	Média	Máximo		CV	Cs	Ck	
RP (MPa)	0,00 - 0,05	500	0,74	1,15	1,82	0,20	17,57	0,36	1,14	0,97*
	0,05 - 0,10	500	1,46	2,02	2,89	0,27	13,43	0,51	0,26	0,98 ^{ns}
	0,10 - 0,15	500	1,92	2,42	2,93	0,20	8,36	0,08	-0,12	0,99 ^{ns}
	0,15 - 0,20	500	2,25	2,63	3,13	0,17	6,49	0,28	0,33	0,99 ^{ns}
	0,20 - 0,25	500	1,97	2,61	3,08	0,19	7,44	-0,27	0,78	0,98 ^{ns}
Profundidade até 2MPa (cm)	-	500	30	85	150	24	28,46	0,19	-0,07	0,98 ^{ns}
Ds (kg dm ⁻³)	0,00 - 0,05	100	0,94	1,17	1,38	0,09	7,43	-0,13	0,12	0,99 ^{ns}
	0,05 - 0,10	100	1,16	1,31	1,45	0,07	5,02	-0,05	-0,52	0,99 ^{ns}
	0,10 - 0,15	100	1,12	1,30	1,45	0,07	5,60	-0,31	-0,39	0,98 ^{ns}
	0,15 - 0,20	100	1,07	1,27	1,46	0,07	5,63	-0,33	0,38	0,98 ^{ns}
	0,20 - 0,25	100	1,04	1,24	1,46	0,07	5,86	-0,16	0,45	0,99 ^{ns}
Mac (m ³ m ⁻³)	0,00 - 0,05	100	0,07	0,14	0,25	0,05	32,97	0,25	-0,98	0,95*
	0,05 - 0,10	100	0,03	0,08	0,16	0,03	38,46	0,99	0,43	0,90*
	0,10 - 0,15	100	0,03	0,06	0,14	0,03	38,55	1,09	0,74	0,89*
	0,15 - 0,20	100	0,03	0,07	0,22	0,03	40,77	1,76	5,18	0,86*
	0,20 - 0,25	100	0,03	0,08	0,15	0,03	34,40	0,70	-0,12	0,94*
Mic (m ³ m ⁻³)	0,00 - 0,05	100	0,34	0,42	0,53	0,04	9,76	0,88	0,51	0,94*
	0,05 - 0,10	100	0,40	0,45	0,57	0,03	6,10	1,22	4,16	0,91*
	0,10 - 0,15	100	0,35	0,46	0,60	0,04	9,05	1,35	3,00	0,86*
	0,15 - 0,20	100	0,32	0,45	0,51	0,03	6,22	-1,08	4,01	0,93*
	0,20 - 0,25	100	0,39	0,46	0,51	0,02	5,05	-0,20	0,07	0,98 ^{ns}
Pt (m ³ m ⁻³)	0,00 - 0,05	100	0,45	0,56	0,65	0,04	6,48	-0,75	1,51	0,93*
	0,05 - 0,10	100	0,44	0,52	0,66	0,04	8,13	0,92	1,65	0,94*
	0,10 - 0,15	100	0,41	0,53	0,68	0,05	9,56	0,67	0,79	0,94*
	0,15 - 0,20	100	0,39	0,53	0,66	0,04	7,00	-0,35	2,65	0,95*
	0,20 - 0,25	100	0,45	0,54	0,59	0,03	5,85	-0,65	-0,16	0,95*
DMG (mm)	0,00 - 0,05	100	3,56	4,88	6,19	0,60	12,57	-0,06	-0,83	0,95*
	0,05 - 0,10	100	3,23	4,81	5,89	0,51	10,68	-0,45	0,14	0,96*
> 4,75 mm	0,00 - 0,05	100	47,2	69,0	98,6	11,5	16,63	0,78	0,47	0,92*
	0,05 - 0,10	100	41,8	67,6	95,8	10,3	15,23	0,42	0,95	0,93*
2,00 - 4,75 mm	0,00 - 0,05	100	0,2	22,6	42,3	6,7	43,36	-0,61	0,70	0,90*
	0,05 - 0,10	100	0,4	25,6	54,0	9,9	38,65	-0,22	1,42	0,90*
1,00 - 2,00 mm	0,00 - 0,05	100	0,1	7,0	35,5	9,3	132,99	0,98	-0,57	0,69*
	0,05 - 0,10	100	0,2	5,0	40,8	8,0	162,31	2,07	3,85	0,58*
0,21 - 1,00 mm	0,00 - 0,05	100	0,1	0,8	4,4	0,7	81,16	2,36	8,46	0,80*
	0,05 - 0,10	100	0,1	1,3	7,8	1,1	85,70	3,61	17,99	0,67*
< 0,21 mm	0,00 - 0,05	100	0,1	0,5	1,9	0,4	75,17	1,30	1,32	0,88*
	0,05 - 0,10	100	0,0	0,6	2,3	0,5	79,39	1,50	2,52	0,87*

⁽¹⁾ Onde: n = número de observações (pontos amostrais); DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação (%); Cs = coeficiente de assimetria; Ck = coeficiente de curtose; ⁽²⁾ RP = resistência do solo à penetração; Ds = densidade do solo; Mac = macroporosidade; Mic = microporosidade; Pt = porosidade total; DMG = diâmetro médio geométrico. ⁽³⁾ Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (*) significativo em níveis de $p < 0,05$ e (^{ns}) não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

Os dados da Ds, Mic, e Pt apresentaram baixa variabilidade em todas as profundidades analisadas, apresentando pequena amplitude dos dados, concordando com os dados observados por Aquino et al. (2014), analisando a variabilidade espacial de atributos físicos do solo em floresta nativa, enquanto Carvalho et al. (2011), estudando atributos físicos em

três classes de solo cultivados com cana-de-açúcar, somente encontrou normalidade para as variáveis Ds e Pt, citando não normalidade nos dados de Mic.

Já a RP apresentou baixa a média variabilidade, semelhante ao encontrado por Cancian et al. (2015), porém com média variabilidade também nas camadas mais profundas, diferente do observado neste trabalho. Pimentel-Gomes (1991), frisou que o número de repetições influi diretamente nos valores de CV, ocorrendo uma diminuição do CV conforme o aumento da amostra, explicando os resultados encontrados no trabalho, devido ao elevado número de repetições efetuadas (20 no total) para cada ponto amostral.

A profundidade necessária até 2MPa, Mac e DMG, também variaram entre baixa a média variabilidade, com valores de assimetria e curtose distanciados do valor de referência zero, indicando que a distribuição se apresenta com leve afastamento da normal (MARASCA et al., 2011). Os dados referentes as classes de diferentes tamanhos de agregados apresentaram de média e alta variabilidade, sendo média nas duas primeiras classes e alta nas demais, sendo natural que ocorra desta forma, visto que os menores agregados são mais sensíveis aos efeitos dos sistemas de culturas (CAMPOS et al., 1999), sofrendo maior interferência e, apresentando uma amplitude dos dados elevada. Ainda, Campos et al. (2011) sugere que estes efeitos são causados possivelmente pela distribuição descontínua de matéria orgânica na área de estudo, provocando comportamentos diferenciados devido aos sistemas de cultivo, sendo uma variável fortemente afetada pelo manejo.

Diante de um cenário sem revolvimento mecânico do solo (SPD) para reduzir o adensamento ocasionado pelo trânsito de máquinas e outras atividades agrícolas, é natural que o descuido com o solo ou utilização de sistemas de culturas inadequados proporcionem maior compactação do solo, promovendo reorganização das partículas e seus agregados, podendo limitar a adsorção, as trocas gasosas, absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, atraso na emergência de plântulas e comprometimento do desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea, resultando em decréscimos na produtividade das culturas (STONE et al., 2002; MODOLO et al., 2008). Os atributos físicos adotados como indicativo da compactação do solo tem sido a RP e a Ds (SILVA et al., 2003; MARASCA et al., 2011), analisados neste trabalho.

Os sistemas de culturas de inverno em consórcio (ApNFE, ApNF e ApE) e AZ se destacaram ao apresentar menores valores de RP nas duas camadas superficiais do solo (Tabela 4), enquanto as gramíneas (Ap, AB e AZ) e TB promoveram redução da RP nas camadas de 0,15 - 0,20 e 0,20 - 0,25 m.

Tabela 4 – Valores da resistência do solo à penetração, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, e porosidade total do solo em dez sistemas de culturas de inverno e cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014

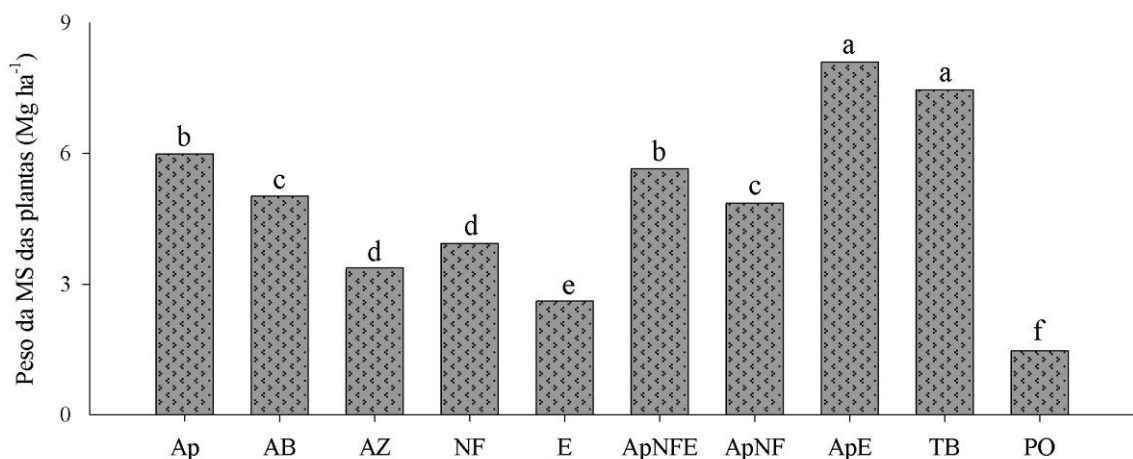
Propriedades físicas do solo												
----- 0,00 - 0,05 m -----						----- 0,05 - 0,10 m -----						
Sistema de cultura ¹	RP	Ds	Mac	Mic	Pt	Sistema de cultura	RP	Ds	Mac	Mic	Pt	
	MPa	kg dm ⁻³	-----	m ³ m ⁻³	-----		MPa	kg dm ⁻³	-----	m ³ m ⁻³	-----	
Ap	1,15	b ²	1,18	a	0,13	b	0,43	a	0,56	ns	0,56	ns
AB	1,22	a	1,12	b	0,17	a	0,40	b	0,57		0,57	
AZ	0,86	c	1,18	a	0,11	b	0,44	a	0,56		0,56	
NF	1,20	a	1,18	a	0,16	a	0,40	b	0,57		0,57	
E	1,26	a	1,14	b	0,17	a	0,41	b	0,58		0,58	
ApNFE	1,09	b	1,12	b	0,15	a	0,39	b	0,53		0,53	
ApNF	1,09	b	1,20	a	0,12	b	0,42	b	0,54		0,54	
ApE	1,09	b	1,20	a	0,12	b	0,44	a	0,57		0,57	
TB	1,13	b	1,19	a	0,14	a	0,43	a	0,57		0,57	
PO	1,38	a	1,24	a	0,13	b	0,43	a	0,56		0,56	
----- 0,10 - 0,15 m -----						----- 0,15 - 0,20 m -----						
Sistema de cultura	RP	Ds	Mac	Mic	Pt	Sistema de cultura	RP	Ds	Mac	Mic	Pt	
	MPa	kg dm ⁻³	-----	m ³ m ⁻³	-----		MPa	kg dm ⁻³	-----	m ³ m ⁻³	-----	
Ap	2,34	b	1,25	b	0,07	b	0,44	b	0,52	b	0,52	b
AB	2,36	b	1,28	b	0,05	b	0,46	b	0,51	b	0,51	b
AZ	2,24	b	1,31	a	0,07	b	0,46	b	0,53	b	0,53	b
NF	2,43	b	1,22	c	0,09	a	0,49	a	0,59	a	0,59	a
E	2,45	b	1,32	a	0,06	b	0,45	b	0,51	b	0,51	b
ApNFE	2,32	b	1,30	a	0,06	b	0,46	b	0,52	b	0,52	b
ApNF	2,38	b	1,21	c	0,05	b	0,51	a	0,56	a	0,56	a
ApE	2,40	b	1,35	a	0,06	b	0,46	b	0,51	b	0,51	b
TB	2,51	b	1,32	a	0,06	b	0,45	b	0,52	b	0,52	b
PO	2,75	a	1,37	a	0,06	b	0,46	b	0,51	b	0,51	b
----- 0,20 - 0,25 m -----												
Sistema de cultura	RP	Ds	Mac	Mic	Pt							
	MPa	kg dm ⁻³	-----	m ³ m ⁻³	-----							
Ap	2,43	b	1,21	b	0,08	ns	0,46	ns	0,54	ns	0,54	ns
AB	2,55	b	1,24	b	0,08		0,46		0,54		0,54	
AZ	2,58	b	1,22	b	0,07		0,46		0,54		0,54	
NF	2,62	a	1,26	b	0,07		0,46		0,53		0,53	
E	2,74	a	1,23	b	0,09		0,45		0,55		0,55	
ApNFE	2,68	a	1,22	b	0,08		0,46		0,54		0,54	
ApNF	2,67	a	1,24	b	0,07		0,46		0,53		0,53	
ApE	2,64	a	1,26	b	0,08		0,45		0,53		0,53	
TB	2,56	b	1,24	b	0,08		0,45		0,54		0,54	
PO	2,65	a	1,28	a	0,06		0,46		0,52		0,52	

⁽¹⁾ Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), e (^{ns}) não significativo. Sistemas

O pousio invernal (PO), sistema de menor produção de MS ($1,47 \text{ Mg ha}^{-1}$), conforme Figura 1, foi o que apresentou os maiores valores de RP em todas as profundidades analisadas. De forma semelhante, os sistemas que apresentaram menores valores de RP, os

monocultivos de gramíneas e os consórcios estão entre os que mais produzem MS, chegando a $8,10 \text{ Mg ha}^{-1}$ com o ApE, porém, com exceção do sistema AZ, que possui alta relação C/N, e por consequência disso, tem a degradação dos resíduos culturais desacelerada (CORREIA et al., 2013). Reinert et al. (2008) observaram que cultivos em rotação de culturas com plantas de cobertura de solo em anos sucessivos, alteram a RP, corroborando com o encontrado neste trabalho.

Figura 1 – Produção de matéria seca em dez sistemas de culturas de inverno no terceiro ano de cultivo. Frederico Westphalen, RS, 2014

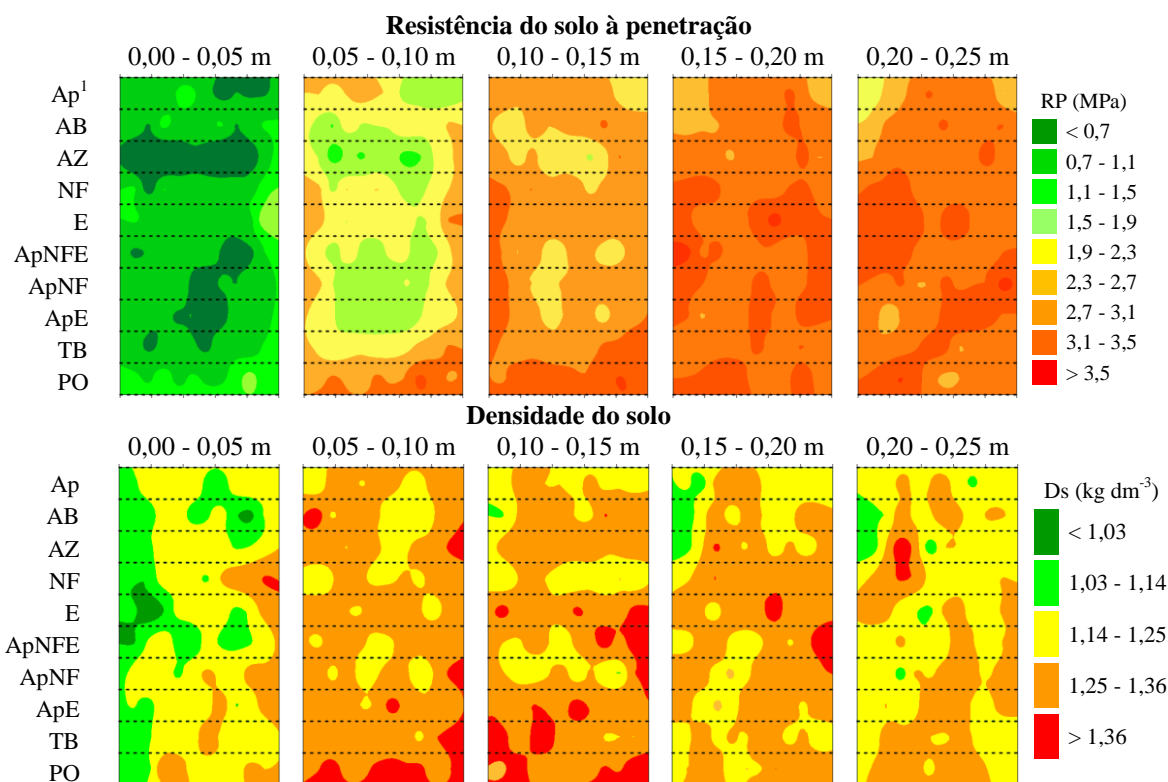


* Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal. Valores seguidos pela mesma letra minúscula não diferem significativamente pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

O atributo Ds apresentou correlação positiva moderada com a RP ($r = 0,40$) conforme Tabela 7, concordando com Marasca et al. (2011), possuindo relação direta com a compactação do solo e servindo de indicador físico desta. Porém, este atributo demonstrou maior interação do sistema de cultura com as profundidades coletadas, mostrando que os sistemas atuam de diferentes formas em cada camada do solo (Tabela 4), devido a heterogeneidade dos sistemas radiculares.

Na camada mais superficial do solo, os sistemas AB, ApNFE e E se apresentaram como os de menor adensamento do solo, além de maior Mac, juntamente com NF e TB, proporcionando maior condicionamento ao solo nesta profundidade, ao contrário do PO, tratamento de maior Ds nessa e nas demais camadas analisadas. Este comportamento foi semelhante ao observado no atributo RP, evidenciando a compactação proporcionada por este sistema, que também pode ser observado na espacialização dos efeitos dos sistemas de culturas de inverno sobre os atributos físicos do solo na Figura 2.

Figura 2 – Distribuição espacial horizontal e vertical da resistência do solo à penetração e densidade do solo em dez sistemas de culturas de inverno e cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014



⁽¹⁾ Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal.

As camadas de 0,05 - 0,10 e 0,10 - 0,15 m, são mais propensas a apresentar adensamento do solo (Tabela 5), muito em consequência do “pé-de-arado” remanescente do preparo do solo, que persiste mesmo depois de vários anos após a adoção do SPD (BERTOL et al., 2004), a iniciar pela camada de 0,05 - 0,10 m, onde houve apenas diferença entre o PO e os demais sistemas para Ds, não sendo encontradas diferenças significativas nos atributos de porosidade do solo.

Já na camada de 0,10 - 0,15 m, os sistemas NF e ApNF destacaram-se por apresentar menores valores de Ds, além de maiores Mic e Pt, com o sistema NF também apresentando maior Mac nesta camada (Tabela 4 e Figura 3), variável de correlação fraca-moderada com a Ds ($r = -0,34$), semelhante aos observados por Santos et al. (2012), havendo mais Mac quando menor a compactação do solo (Tabela 7), mostrando que o NF proporciona benefícios localizados nesta camada, reduzindo a compactação do solo e permitindo maior aeração,

justamente na camada que tende a proporcionar impedimento ao crescimento radicular das plantas.

Tabela 5 – Valores médios dos atributos físicos do solo em cinco profundidades sob dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014

Prof. (m)	Atributos físicos do solo em profundidade										
	RP	Ds	Mac	Mic	Pt	DMG	Ag 1 ²	Ag 2	Ag 3	Ag 4	Ag 5
	MPa	kg dm ⁻³	m ³ m ⁻³			mm	%				
0,00 - 0,05	1,15 d ¹	1,17 d	0,14 a	0,42 c	0,56 a	4,9 ^{ns}	69,0 ^{ns}	22,6 b	7,0 ^{ns}	0,8 b	0,5 ^{ns}
0,05 - 0,10	2,02 c	1,31 a	0,08 b	0,45 b	0,53 b	4,8	67,6	25,6 a	5,0	1,3 a	0,6
0,10 - 0,15	2,42 b	1,30 a	0,06 c	0,46 a	0,52 b	-	-	-	-	-	-
0,15 - 0,20	2,63 a	1,27 b	0,07 b	0,45 b	0,53 b	-	-	-	-	-	-
0,20 - 0,25	2,61 a	1,24 c	0,08 b	0,46 a	0,54 b	-	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$); ⁽²⁾ Agregados estáveis em água, pertencentes a cinco classes de tamanho, sendo: Ag 1 = > 4,75 mm; Ag 2 = 4,75 - 2,00 mm; Ag 3 = 2,00 - 1,00 mm; Ag 4 = 1,00 - 0,21 mm; Ag 5 = < 0,21 mm.

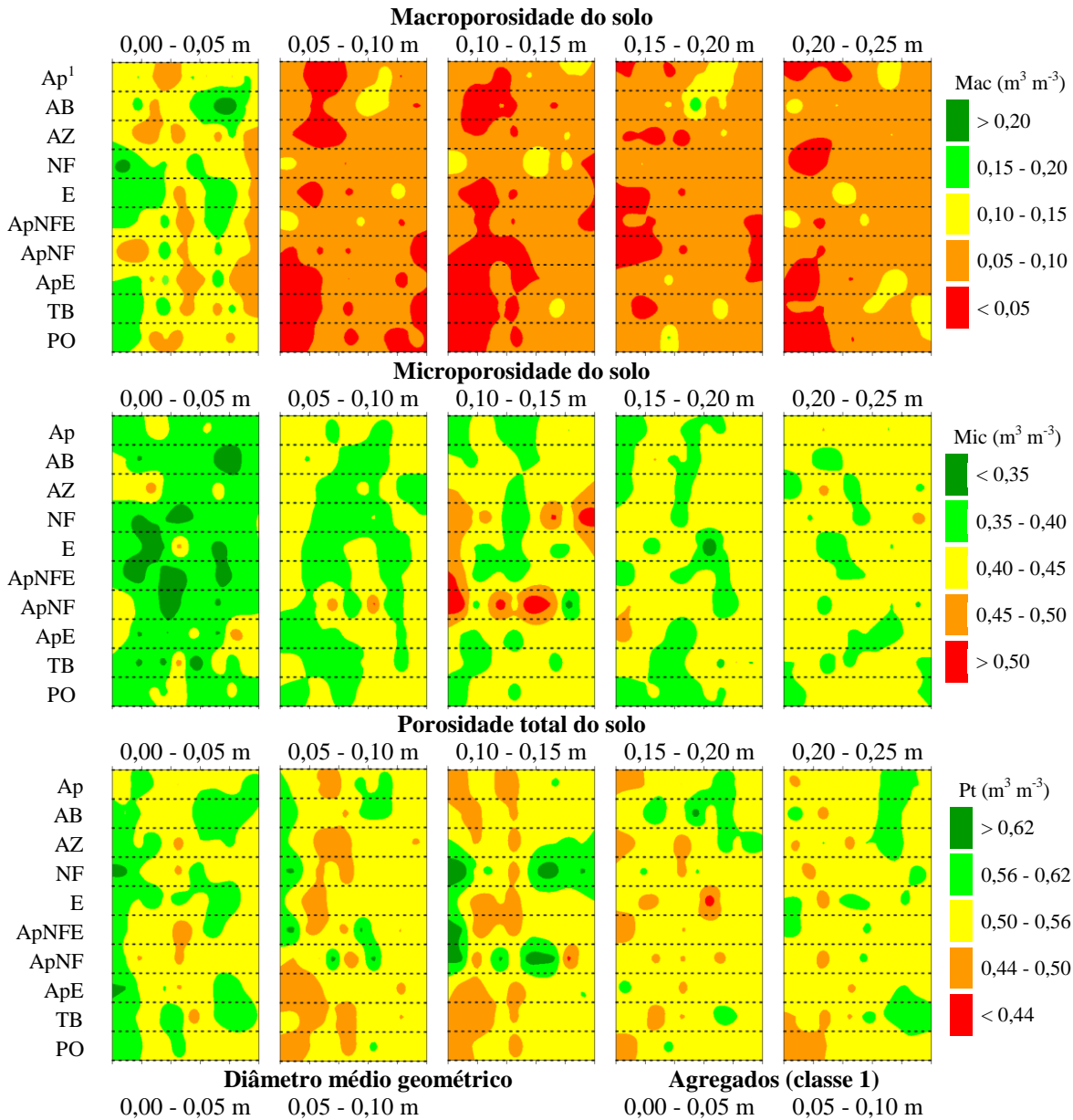
O NF é reconhecido na agricultura do sul do Brasil como excelente descompactador biológico do solo, justificável pelos inúmeros trabalhos de pesquisa que corroboram com essa afirmação (CUBILLA et al., 2002; SILVEIRA JUNIOR et al., 2012; CARDOSO et al., 2014), devido ao sistema radicular pivotante agressivo, capaz de crescer em camadas de solo compactado (ABREU et al., 2004; MAGALHÃES et al., 2009).

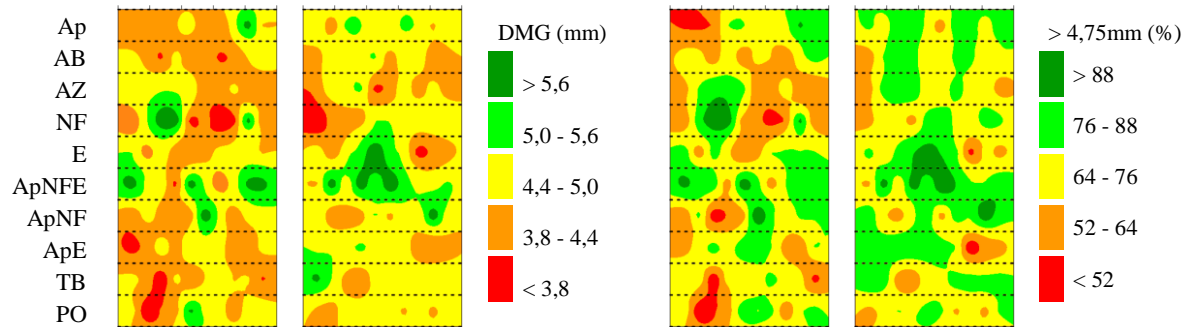
Essas diferenças auxiliam na seleção de sistemas de culturas compostos por espécies capazes de crescer em condições adversas, além de ser úteis na recuperação de solos (REINERT et al., 2008). Ainda, após a morte e decomposição das raízes dessas espécies, o solo fica com uma quantidade maior de bioporos, nos quais ocorrem as trocas gasosas, o fluxo descendente de água (ABREU et al., 2004) e o crescimento das raízes das plantas subsequentes (WILLIAMS e WEIL, 2004). A distribuição e tamanho dos poros, assim como a estrutura do solo, estão diretamente ligadas à variação e quantidade de água que este solo pode armazenar (REICHARDT e TIMM, 2008), fornecendo um excelente indicativo da qualidade do solo dos sistemas de culturas de inverno.

Na profundidade 0,15 - 0,20 m os sistemas compostos por gramíneas solteiras (Ap, AB e AZ) apresentaram menores Ds, devido provavelmente a elevada densidade (SPERA et al., 2007) e extenso sistema radicular (CUNHA et al., 2010) das plantas pertencentes a esta família, explorando camadas mais profundas do solo que as demais espécies. Não foram encontradas diferenças significativas na porosidade do solo nesta, assim como na camada mais profunda analisada, onde somente o PO diferiu para maior Ds que os

demais sistemas de culturas de inverno, efeitos visíveis na espacialização dos dados nas Figuras 2 e 3.

Figura 3 – Distribuição espacial horizontal e vertical da macroporosidade, microporosidade, porosidade total do solo, diâmetro médio geométrico, e agregados da classe 1 em dez sistemas de culturas de inverno e cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014

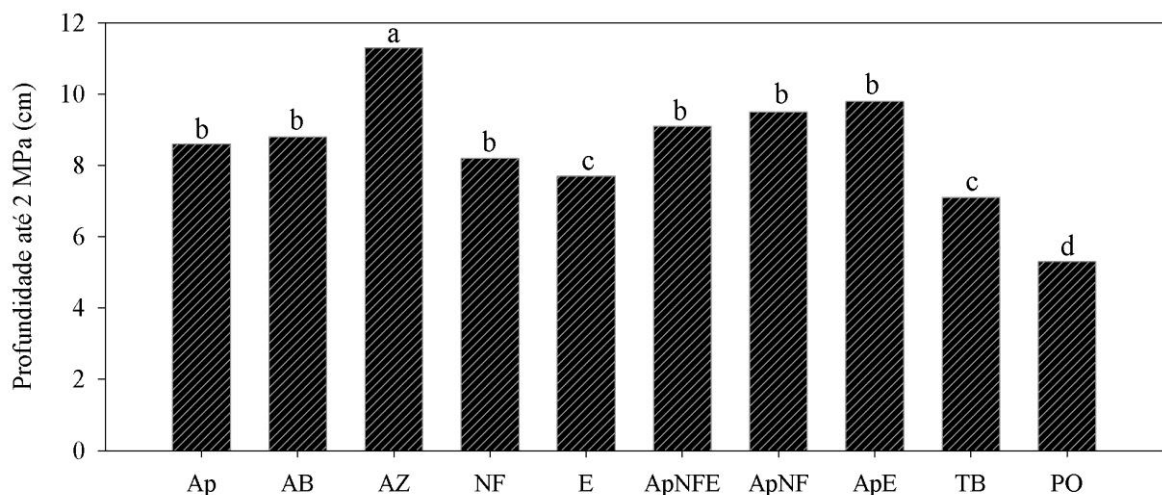




(1) Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremço branco; PO = pousio invernal.

Houveram significativas correlações negativas da profundidade necessária (cm) até atingir a limiar de crescimento radicular das plantas (2 MPa) com outros indicadores de compactação já analisados, apresentando alta correlação com RP ($r = -0,82$) e baixa-moderada para o atributo Ds ($r = 0,31$), conforme pode ser visto na Tabela 6, indicando que quanto maior o RP e Ds, menor é a profundidade necessária para se chegar ao limite crítico de crescimento das raízes (Figura 4).

Figura 4 – Profundidade necessária até 2 MPa (topo) da resistência do solo à penetração em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014



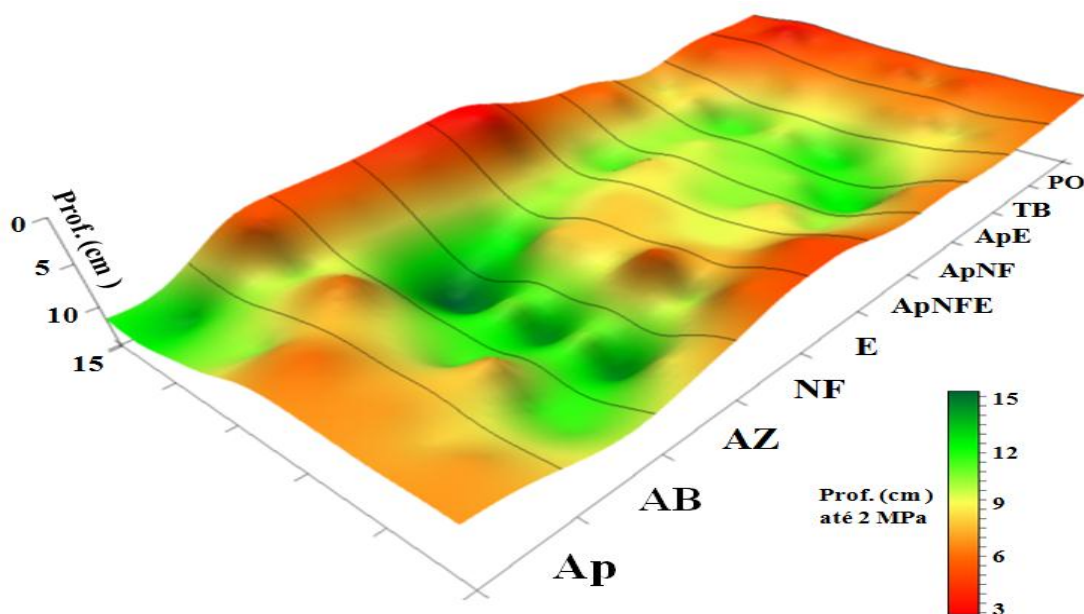
* Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremço branco; PO = pousio invernal. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Nesta variável, houve segregação dos sistemas de culturas em quatro grupos de significância, dando destaque ao sistema AZ e aos consórcios utilizados (ApNFE, ApNF e ApE), com 11,3; 9,1; 9,5 e 9,8 cm, respectivamente, repetindo a tendência dos resultados já observados e discutidos anteriormente (atributos RP e Ds), mostrando que estes são ótimos

sistemas para a manutenção das funções físicas relacionadas a compactação do solo, sendo claramente visíveis na espacialização em três dimensões dos dados amostrados na área experimental (Figura 5). Concordando com este estudo, Franchini et al. (2009) afirmam que é possível melhorar a estrutura das camadas de solo sem intervenção mecânica, beneficiando o desenvolvimento radicular e a disponibilidade hídrica para as culturas.

O uso de consórcios de plantas, por promover maior diversificação do sistema, reunindo as vantagens/benefícios de diversas plantas ao mesmo tempo, explorando diferentes camadas do perfil do solo, proporciona melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (MEDEIROS e CALEGARI, 2007), sendo uma ótima alternativa, além de possuir baixo custo, para melhoria da qualidade do solo. Também pode-se perceber que o constatado nos atributos anteriores de indicação da compactação do solo (RP e Ds) se repetiu na profundidade necessária até 2 MPa, mostrando que bastam apenas 5,3 cm para o sistema de cultura PO alcançar o limiar de crescimento radicular, prejudicando o estabelecimento das culturas de verão, tornando-as mais suscetíveis a estresses hídricos.

Figura 5 – Representação gráfica (3D) da espacialização horizontal e vertical da profundidade necessária até 2 MPa (topo) de resistência do solo à penetração em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014

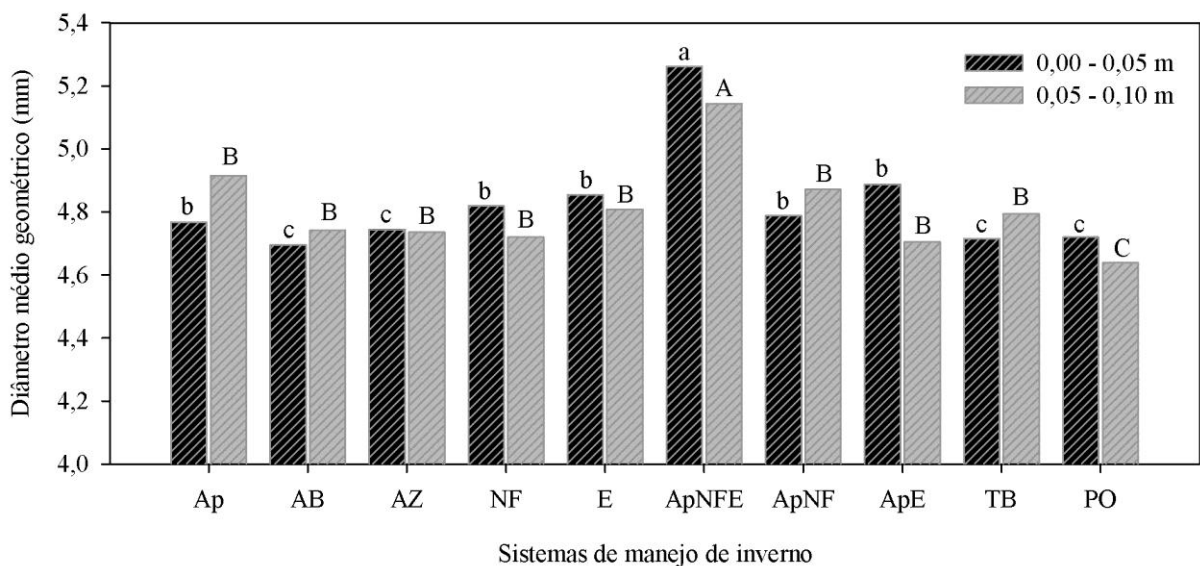


* Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal.

As classes resultantes da distribuição de tamanho dos agregados nas duas profundidades em função dos sistemas de culturas de inverno estão demonstradas na Tabela 6,

enquanto os resultados do cálculo do diâmetro médio geométrico (DMG) encontram-se na Figura 6. Pode-se observar, em ambas as profundidades amostradas, que tanto na primeira classe de agregados ($> 4,75$ mm) quanto no DMG, houve favorecimento à agregação do solo devido a utilização do consórcio composto por três plantas (ApNFE), aliando os benefícios das gramíneas, de alta densidade e periódica renovação radicular, favorecendo a estruturação do solo e estabilização de agregados (MAGALHÃES et al., 2009), das crucíferas, com NF proporcionando redução na compactação e aumento da porosidade do solo (Tabela 4), e das leguminosas, importantes fornecedores de N ao solo. A espacialização destes atributos podem ser observados na Figura 3.

Figura 6 – Diâmetro médio geométrico nas profundidades de 0,00 - 0,05 e 0,05 - 0,10 m em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014



* Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

O sistema PO, apresentou menor DMG e menor porcentagem da maior classe de agregados ($> 4,75$ mm), além de apresentar maior porcentagem da menor classe de agregados ($< 0,21$ mm) nas duas camadas analisadas, mostrando desfavorecer também a estruturação do solo. Debiasi (2008) relatou a eficiência das plantas de cobertura na melhoria das características físicas do solo, mesmo quatro anos após degradação física pelo pisoteio animal, mostrando que o não uso dessas ferramentas biológicas durante o inverno, pode significar a "não observação" de melhorias no solo, e conforme Bonini e Alves (2011), os

agregados mostram-se alta e rapidamente sensíveis ao manejo adotado, sendo muito utilizados como indicadores da qualidade física do solo.

Tabela 6 – Distribuição de agregados em cinco classes em dez sistemas de culturas de inverno e duas profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014

Classes de agregados (mm)											
----- 0,00 - 0,05 m -----						----- 0,05 - 0,10 m -----					
Sistema de cultura ¹	> 4,75	4,75-2,00	2,00-1,00	1,00-0,21	< 0,21	Sistema de cultura	> 4,75	4,75-2,00	2,00-1,00	1,00-0,21	< 0,21
	----- % -----						----- % -----				
AP	67,5 b ²	24,3 a	6,6 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,7 b	AP	69,3 b	26,2 a	2,1 ^{ns}	1,9 a	0,6 b
AB	65,2 b	26,7 a	6,4	1,1	0,6 b	AB	65,9 b	27,9 a	3,8	1,8 a	0,6 b
AZ	69,1 b	19,4 b	10,6	0,6	0,3 b	AZ	63,0 b	31,1 a	4,7	0,8 b	0,4 b
NF	70,4 b	19,6 b	8,6	1,3	0,5 b	NF	64,1 b	30,4 a	3,3	1,7 a	0,6 b
E	68,3 b	24,5 a	6,0	0,7	0,5 b	E	67,5 b	25,3 a	5,4	1,1 b	0,6 b
APNFE	78,9 a	15,9 b	3,9	0,8	0,6 b	APNFE	77,2 a	16,2 b	5,0	1,1 b	0,5 b
APNF	69,2 b	20,1 b	9,6	0,6	0,4 b	APNF	67,1 b	26,9 a	4,7	0,9 b	0,4 b
APE	67,2 b	27,4 a	4,2	0,7	0,4 b	APE	67,1 b	22,8 a	8,6	0,9 b	0,6 b
TB	65,2 b	27,6 a	5,5	1,0	0,7 b	TB	68,7 b	23,8 a	5,3	1,5 a	0,7 b
P	69,2 b	20,6 b	8,5	0,8	0,9 a	P	65,7 b	25,8 a	6,6	0,8 b	1,0 a

⁽¹⁾ Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), e (^{ns}) não significativo.

Por fim, com base nas variáveis de compactação do solo (RP, Ds e profundidade até 2 MPa), de porosidade (Mac, Mic e Pt) e agregação do solo (DMG, maior e menores classes de tamanho), semelhantemente ao constatado por Prado et al. (2002), que encontraram aumentos significativos na Ds e RP, após cinco anos de pousio, pode-se concluir que o sistema de pousio invernal deve ser evitado ou até mesmo extinto da atividade agrícola, em razão da degradação física ocasionada ao solo em apenas três anos de manejo.

Tabela 7 – Coeficientes de correlação simples de Pearson entre os atributos físicos do solo analisados em dez sistemas de culturas de inverno, Frederico Westphalen, RS, 2014

Atributos	RP	Prof. 2MPa	Ds	Mac	Mic	Pt	DMG	Ag 1 ¹	Ag 2	Ag 3	Ag 4	Ag 5
RP	1	-0,82**	0,40**	-0,09 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,20*
Prof. 2MPa		1	-0,31**	0,13 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,16 ^{ns}
Ds			1	-0,34**	0,31**	-0,06 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,22*	0,03 ^{ns}
Mac				1	-0,16 ^{ns}	0,72*	-0,12 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,27**	0,11 ^{ns}
Mic					1	0,55**	-0,07 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,21*
Pt						1	-0,11 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,06 ^{ns}
DMG							1	0,87**	-0,17 ^{ns}	-0,80**	-0,14 ^{ns}	-0,15 ^{ns}
Ag 1								1	-0,61**	-0,49**	-0,07 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Ag 2									1	-0,37**	0,14 ^{ns}	-0,03 ^{ns}
Ag 3										1	-0,20*	-0,08 ^{ns}
Ag 4											1	0,45**
Ag 5												1

Significativo *($p \leq 0,05$) e **($p \leq 0,01$); (^{ns}) não significativo; (¹) Agregados estáveis em água, pertencentes a cinco classes de tamanho, sendo: Ag 1 = > 4,75 mm; Ag 2 = 4,75 - 2,00 mm; Ag 3 = 2,00 - 1,00 mm; Ag 4 = 1,00 - 0,21 mm; Ag 5 = < 0,21 mm.

2.6 CONCLUSÕES

Os sistemas com monocultivos de gramíneas promoveram melhorias nos parâmetros de avaliação da compactação do solo, com Ap - exceto na camada superficial - e AB reduzindo a Ds, e AZ reduzindo significativamente a RP, além de apresentar camada crítica ao crescimento radicular (profundidade até 2 MPa) somente aos 11 cm.

Os sistemas NF e ApNF proporcionaram significativa redução da Ds e aumento da porosidade do solo na camada de 0,10 - 0,15 m, mostrando ser uma excelente alternativa para a redução do adensamento do solo e aumento da aeração, justamente na camada crítica ao crescimento radicular dos cultivos agrícolas.

O uso de sistemas que consorciavam plantas de cobertura promoveram melhorias nos atributos físicos do solo, aumentando a agregação, a porosidade, além de reduzirem a compactação do solo e aumentarem a profundidade da camada crítica ao crescimento de raízes, para mais de 9 cm.

O sistema de pousio invernal (PO) promoveu degradação em todos os atributos físicos do solo analisados, aumentando a compactação do solo, com presença de camada crítica às raízes aos 5 cm, reduzindo a aeração e prejudicando a estruturação do solo em apenas três anos de adoção dessa prática.

De modo geral, os efeitos (positivos ou negativos) dos sistemas de culturas de inverno utilizados perduram até a camada entre 0,15 - 0,20 m, dependendo das variáveis analisadas,

não resultando em grandes efeitos nos atributos físicos do solo em profundidades maiores após três anos de prática.

2.7 AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva e ao Laboratório de Física do Solo da UFSM, campus Frederico Westphalen, RS, pelo auxílio desde a etapa de planejamento até a execução das análises e interpretação dos dados. Aos integrantes do LAPSul pela infinita ajuda nas árduas coletas de solo, em especial ao Romano, Maurício e Alencar, pelo grande auxílio nas avaliações deste trabalho. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

2.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J., (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141. (SSSA Special publication 49).

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004.

AQUINO, R. E. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 4, p. 988-997, jul./ago. 2014.

BELTRAME, L. F. C.; GONDIM, L. A. P.; TAYLOR, F. C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 5, p. 145-149, 1981.

BERTOL, I. et al. Propriedades Físicas do Solo sob Preparo Convencional e Semeadura Direta em Rotação e Sucessão de Culturas, Comparadas às do Campo Nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-163, 2004.

BLAINSKI, E. et al. Qualidade Física de um Latossolo Sob Plantio Direto Influenciada pela Cobertura do Solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 79-87, jan./fev. 2012.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; FREDERICK, J. R. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil & Tillage Research**, v. 68, n. 1, p. 49-57, 2002.

- CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 813-819, jul./ago. 2005.
- CAMPOS, B. C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 383-391, 1999.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p. 598-609, 2011.
- CANCIAN, L. C. **Variabilidade espacial da resistência a penetração, granulometria e umidade do solo**. 2015. 60 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2015.
- CARDOSO, R. A. et al. Influência da adubação verde nas propriedades físicas e biológicas do solo e na produtividade da cultura de soja. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, Londrina, v. 35, n. 2, p. 51-60, jul./dez. 2014.
- CARVALHO, L. A. et al. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 9, p. 940-949, 2011.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22 n. 3, p. 5527-538, jul./set. 1998.
- CHEN, G.; WEIL, R. R. Penetration of cover crop roots through compacted soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 331, n. 1, p. 31-43, jun. 2010.
- COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, nov. 2006.
- CORREIA, S. L. et al. Estratégias de manejo da palha de azevém para cultivo do arroz irrigado em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 512-520, mar./abr. 2013.
- CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley & Sons, 1991. 903 p.
- CUBILLA, M. et al. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 71, p. 29-32, 2002.
- CUNHA, F. F. et al. Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 351-357, 2010.
- DANCEY C. P.; REIDY J. **Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 608 p.

DEBIASE, H. **Recuperação física de um argissolo compactado e suas implicações sobre o sistema solo-máquina-planta**. 2008. 263 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DERPSCH, R. Os processos de erosão e de infiltração de água. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 113, p. 16-23, set./out. 2009.

EDWARDS, A. P. & BREMNER, J. M. Microaggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 18, n. 1, p. 64-73, 1967.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Área de plantio direto no Brasil**. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/download/Ev_area_pd_brasil.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.

FERREIRA, D. F.; FILHO, A. C.; LÚCIO, A. D. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrições na casualização. **Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 16-19, set./dez. 2012.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 913-932, out./dez. 2010.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Qualidade física do solo em pomar de laranjeira no noroeste do paraná com manejo da cobertura permanente na entrelinha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 423-433, 2007.

FRANCHINI, J. C. et al. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina: Embrapa Soja. 2009. 42 p. (Documentos, n. 314).

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

JUNG, K. Y. et al. Soil compaction varies by crop management system over a claypan soil landscape. **Soil & Tillage Research**, v. 107, n. 1, p. 1-10, 2010.

KAY, B. D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v. 12, p. 1-52, 1990.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L., eds. **Methods of soil analysis**. Pat 1. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.499-509.

LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de Integração Lavoura-Pecuária sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, set./out. 2007.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277-294, 1985.

- MAGALHÃES, E. N. et al. Recuperação estrutural e produção do capim-Tifton 85 em um Argissolo Vermelho-Amarelo compactado. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 10, n. 1, p. 68-76, 2009.
- MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 8, p. 141-150, 2000.
- MARASCA, I. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e teor de água em sistema de plantio direto, na cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 239-246, mar./abr. 2011.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. p. 508-536.
- MCGARRY, D.; SHARP, G. A rapid, immediate, farmer-usable method of assessing soil structure condition to support conservation. In: GARCIA-TORRES, L.; BENITES, J.; MARTTINEZ-VILELA, A. (Ed.). **First world congress on conservation agriculture**. Natural Resource Sciences: Madrid, 2001. p. 209-214.
- MEDEIROS, G. B.; CALEGARI, A. Sistema Plantio Direto com qualidade: a importância do uso de plantas de cobertura num planejamento cultural estratégico. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 102, p. 10-20, nov./dez. 2007.
- MODOLO, A. J. et al. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1259-1265, 2008.
- MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, p. 83-92, 2002.
- MOLIN, J. P. et al. Test procedure for variable rate fertilizer on coffee. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 4, p. 569-575, 2010.
- MOREIRA, W. H. et al. Quantificação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho utilizando duas estratégias metodológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1772-1783, nov./dez. 2014.
- MÜLLER, M. M. L.; CECCON, G.; ROSOLEM, C. A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 531-538, 2001.
- NEIRO, E. S. et al. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Distroférrico, com rotação e sucessão de culturas, sob plantio direto. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 19-25, 2003.
- 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, n. 4, p. 1723-1734, jul./ago. 2008.
- OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 76, n. 1, p. 319-337, 1984.

PANACHUKI, E. et al. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1777-1786, out. 2011.

PEREIRA, A. H. F. et al. Least limiting water range and load bearing capacity of soil under types of tractor-trailers for mechanical harvesting of green sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, 1603-1610, 2015.

PIMENTEL-GOMES, F. **O índice de variação: um substituto vantajoso do coeficiente de variação**. Piracicaba: IPEF, 1991. 4 p. (Circular técnica, n. 178).

PRADO, R. M.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 12, p. 1795-1801, dez. 2002.

PREVEDELLO, C. L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 23-28, jul./set. 1999.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2008. 524 p.

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.

ROSOLEM, C. A. et al. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 491-497, 1994.

SANTOS, C. L. et al. Estimativa da umidade na capacidade de campo em vasos e em laboratório. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 8, n. 2, p. 151-160, abr./jun. 2013.

SANTOS, D. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Brasília, v. 16, n. 8, p. 843-848, 2012.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SILVA, D. A. A. et al. Bioindicadores de qualidade edáfica em diferentes usos do solo. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11 n. 22, p. 3728-3736, 2015.

SILVA, E. A. A. et al. Um Estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos do solo e planta. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 365-371, 2003.

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

SILVEIRA JUNIOR, S. D. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1854-1867, 2012.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J. P. A. R. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás – Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 4, p. 689-698, jul./ago. 2015.

SPERA, S. T. et al. Efeito de sistemas de manejo em atributos físicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 13, n. 1-2, p. 61-68, 2007.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-12, 2002.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 83-91, jan. 1999.

TARTARI, D. T. et al. Perda de solo e água por erosão hídrica em Argissolo sob diferentes densidades de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 3, p. 85-93, 2012.

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

TISDALL, J. M.; COCKROFT, B.; UREN, N. C. The stability of soil aggregates as affected by organic materials microbial activity and physical disruption. **Soil Research**, Victoria, v. 16, p. 9-17, 1978.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WILLIAMS, S. M.; WEIL, R. R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 68, p. 1403-1409, 2004.

ZANZARINI, F. V. et al. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 608-614, 2013.

3 ARTIGO II – EFEITO DE SISTEMAS DE CULTURAS DE INVERNO NA DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS SOLO

3.1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar a influência de sistemas de culturas de inverno após três anos de cultivo na distribuição espacial horizontal e vertical dos atributos químicos do solo em área manejada sob sistema plantio direto (SPD) com ferramentas de agricultura de precisão, no sul do Brasil. O trabalho avaliou em sistema fatorial (10 x 5), dez sistemas de culturas de inverno - pousio invernal (PO), aveia preta (Ap), aveia branca (AB), azevém (AZ), nabo forrageiro (NF), ervilhaca (E), tremoço branco (TB) e consórcios de ApNFE, ApNF e ApE - em cinco profundidades de coleta (0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 e 0,20-0,25 m), com dez repetições por sistema em cada profundidade. Os atributos químicos determinados foram: $pH_{\text{água}}$, acidez trocável (Al) e potencial (H+Al), teores de MOS, P, K, Ca e Mg, relação Ca/Mg, CTC, saturação por bases (V) e por Al (m). Os dados foram analisados através de estatística descritiva, a fim de verificar a dispersão e normalidade dos dados (teste Shapiro-Wilk), e classificados conforme o CV obtido. Foi efetuada a análise de variância, agrupando as médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), além de correlação simples de Pearson, utilizando o software ASSISTAT 7.7. O sistema NF elevou os teores de P nas três primeiras camadas de solo. Sistemas de culturas com maior produção de matéria seca (MS) proporcionaram aumento nos teores de K nas camadas superficiais. Apesar dos sistemas de monoculturas de gramíneas (Ap, AB e AZ) apresentarem os elevados teores de K e MOS, ocasionaram, em algumas camadas, diminuição nos teores de P, $pH_{\text{água}}$, Ca, Mg, CTC e V, evitando seu uso em longo prazo, devendo ser rotacionado ou consorciado com outras espécies. O sistema de cultura de pousio invernal (PO) foi o que produziu menos matéria seca (MS), resultando em menor extração/ciclagem de nutrientes, promovendo acúmulo superficial do P proveniente da adubação das culturas de verão, e, ocasionando maiores perdas de nutrientes facilmente perdidos por escoamento superficial, como o K, devido a falta de proteção superficial.

PALAVRAS-CHAVE: Indicadores químicos. Fertilidade do solo. Plantas de cobertura do solo. Planos de Manejo Inteligentes. Agricultura de Precisão.

3.2 ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the influence of winter management system after three years of cultivation in the horizontal and vertical spatial distribution of soil chemical attributes in managed area under no-tillage (SPD) with precision agriculture tools in southern Brazil. The study was conducted in factorial system 10 x 5 and analyzed ten winter management systems - fallow (PO), wild oat (Ap), white oat (AB), ryegrass (AZ), forage turnip (NF) vetch (E), white lupine (TB) and consortiums ApNFE, ApNF and ApE - in five depths collection (0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15, 0.15-0.20 and 0.20-0.25 m), with ten replicates per system in each depth. The chemical properties determined were: pH water ($\text{pH}_{\text{água}}$), exchangeable (Al) and potential acidity (H+Al), MOS, P, K, Ca and Mg contents, Ca/Mg ratio, cation exchange capacity (CTC), bases (V) and Al saturation (m). The variables were submitted to descriptive analysis, ranking according variation coefficient obtained, to normality Shapiro-Wilk test, analysis of variance, gathering the means by Scott-Knott test ($p < 0.05$), and correlation of Pearson with ASSISTAT 7.7 software. The NF system raise P levels in the first three layers of soil. Management systems with higher production of dry matter (MS) provided increase in K content in the surface layers. Although the grass monoculture systems (Ap, AB and AZ) presented high levels of K and MOS, resulted, in some layers, reduction in contents of P, $\text{pH}_{\text{água}}$, Ca, Mg, CTC and V, preventing the use of this in the long term be avoided, prioritizing the rotation or intercropped with other species. The management system PO was that produces less dry matter (MS), resulting in lower extraction/cycling of nutrients, promoting surface accumulation of P from the fertilization of summer crops, and causing greater losses of surface runoff nutrients such as K, due to the smaller surface protection.

KEYWORDS: Chemical indicators. Soil fertility. Nutrient cycling. Cover crops. Intelligent Management Plans. Precision Agriculture.

3.3 INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma tendência mundial no setor agrícola para gerar informações sobre as causas da variabilidade espacial das propriedades do solo, a fim de facilitar a tomada de decisão com as diferentes ferramentas de informação geográfica ou com agricultura de precisão (CUCUNUBA-MELO et al., 2011), além de compreender como a distribuição

espacial dos atributos de solo são importantes no estabelecimento de práticas de manejo adequadas, não só em termos de aumento da produção agrícola, mas também na diminuição de possíveis danos ambientais (LA SCALA JÚNIOR et al., 2012; RODRIGUES, 2014).

O manejo pode conduzir, gradualmente, a uma melhoria da qualidade do solo agrícola, até alcançar a excelência expressa por, entre outras propriedades, elevado potencial produtivo (AMADO et al., 2007), e em sentido oposto, o manejo adotado pode conduzir a um processo de degradação da qualidade do solo até alcançar a degradação, que se expressa por baixas produtividades (VEZZANI, 2001). Neste sentido, avaliar os possíveis impactos de diferentes sistemas de culturas, é fundamental para conduzirmos as áreas agrícolas para a primeira opção.

Atualmente, tem-se buscado sistemas manejo do solo que sejam sustentáveis, além de apresentar retorno econômico, ecológico e social (TEIXEIRA, et al., 2012). A rápida degradação do solo sob exploração agrícola no mundo, especialmente nos países tropicais em desenvolvimento, despertou, nas últimas décadas, a preocupação com a qualidade do solo e a sustentabilidade da exploração agrícola (LAL e PIRCE, 1991; SANTOS et al., 2001; MONTEIRO e PONCIANI, 2012).

Os recentes e seguidos aumentos nos preços dos insumos agrícolas, fizeram com que os agricultores voltassem sua atenção para a adoção de práticas de menor custo que mantenham altas produtividades (TEIXEIRA, et al., 2012), como a utilização das plantas de cobertura, visando melhorar o manejo da fertilidade do solo, visto que com uso destas, pode-se substituir parcialmente ou complementar a fertilização química (SCHREINER, 1988; MELO et al., 2011), isto devido a decomposição dos resíduos culturais, que favorecem os atributos químicos e físicos do solo, além de manter e incrementar os teores de matéria orgânica do solo (MOS) quando comparados aos monocultivos anuais, com isso, promovendo efeitos positivos na fertilidade do solo (BOER et al., 2007; SILVA et al., 2013).

A adoção de métodos de preparo do solo, que promovem menor revolvimento do solo, a exemplo do sistema plantio direto (SPD), e a adoção de um sistema de culturas com a inclusão de leguminosas e gramíneas, que contém maiores quantidades de N na sua biomassa, acarretam, com o tempo, em uma melhoria nas características químicas do solo, restrita inicialmente às camadas superficiais (BAYER e MIELNICZUK, 1997a; MANNIGEL et al., 2009). A maior parte dos nutrientes das plantas de cobertura, encontra-se nos resíduos vegetais exercendo função estrutural ou como substância de reserva, e parte deste estoque de nutrientes torna-se disponível para as plantas em um intervalo curto de tempo, contribuindo com a elevação da produtividade das culturas subsequentes (SOUZA e MELO, 2000).

Inúmeros estudos têm demonstrado os efeitos benéficos pelos diferentes tipos de seus resíduos deixados sobre o solo, nos seus atributos químicos e físicos (BERTOL et al., 1998; ESPÍNOLA et al., 2006; TORRES et al., 2008), além de ajudar no controle das plantas daninhas (FERNANDES et al., 1999; CAVALCANTE et al., 2012). Porém, emprego do SPD sobre a palhada implica no conhecimento e na definição das espécies, as quais devem ter boa produção de biomassa e ser suficientemente persistentes para proteção física do solo e disponibilização de nutrientes (NUNES et al., 2006), sobretudo nos períodos de escassez de água (BRESSAN et al., 2013), resultando em aumento da produtividade das culturas posteriormente cultivadas (FABIAN, 2009).

O efeito da cobertura vegetal sobre atributos químicos do solo está relacionado com a espécie de planta usada, a classe do solo, as condições climáticas e, sobremaneira, com o tipo de manejo dispensado à planta de cobertura (ANDREOLA et al., 2000; CUNHA et al., 2011). Assim, é fundamental a utilização de espécies produtoras de palhada que mobilizem os nutrientes na camada agricultável, retendo-os na sua fitomassa e os devolvendo ao solo durante a decomposição (DENARDIN e KOCHHANN, 1993), mesmo havendo necessidade de se avaliar a real contribuição dessas espécies e do seu manejo, com a finalidade de manter ou elevar a fertilidade do solo (CUNHA et al., 2011), melhorando a produtividade das culturas comerciais.

Dessa forma, há a necessidade de se avaliar as opções de sistemas de culturas de inverno, quanto as suas vantagens e desvantagens sobre as influências nos atributos químicos do solo, bem como, identificar quais são as camadas do solo mais afetadas por cada sistema a médio prazo. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar a influência de sistemas de culturas de inverno, após três anos de cultivo, na distribuição espacial horizontal e vertical dos atributos químicos do solo, em área manejada sob SPD com ferramentas de agricultura de precisão, no sul do Brasil.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

Local

O trabalho foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Santa Maria, campus do município de Frederico Westphalen, RS, localizada nas coordenadas 27°23'24.33" S e 53°25'39.58" O, com altitude de 483 m. O clima do local é subtropical de primavera úmida (STPU) com temperatura média anual de 18,1°C, e precipitação pluvial

anual média de 1.919 mm bem distribuídos ao longo do ano (MALUF, 2000). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS et al., 2013), com textura argilosa (660 g kg⁻¹) e relevo suave ondulado.

Coleta de dados

O presente trabalho avaliou diferentes sistemas de culturas de inverno em sistema fatorial (10 x 5), com dez sistemas de culturas de inverno e cinco profundidades de coleta, com dez repetições por sistema em cada profundidade. Os sistemas de culturas de inverno foram implantados, pelo terceiro ano consecutivo, na primeira quinzena do mês de maio de cada ano, sendo: aveia preta (*Avena strigosa* S. - Ap), aveia branca (*Avena sativa* L. - AB), azevém (*Lolium multiflorum* L. - AZ), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. - NF), ervilhaca (*Vicia sativa* L. - E), aveia preta + ervilhaca + nabo forrageiro (ApNFE), aveia preta + nabo forrageiro (ApNF), aveia preta + ervilhaca (ApE), tremoço branco (*Lupinus albus* L. - TB) e pousio invernal (vegetação espontânea - PO). O histórico de cultivos e as adubações na área experimental estão especificadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen, RS, 2014

Ano	Período	Cultura	Data de semeadura	Adubação (NPK)	Quantidade (kg ha ⁻¹)	Forma de aplicação
2012	Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	Calagem **	3500* **	Lanço/Incorporado **
	Verão	Feijão	2ª semana de outubro	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
			Milho safrinha	4ª semana de janeiro	09-25-15 45-00-00	350 250
		Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	**	**
2013	Verão	Feijão	2ª semana de outubro	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
	2014	Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	**	**

(*) Calcário dolomítico PRNT 85%; (**) Sem Adubação (NPK).

Na primeira semana de setembro de 2014 foi coletada uma amostra das plantas por parcela, com quadro metálico de 0,5 x 0,5 m, sendo secas em estufa (65°C) até peso constante, de modo estimar o peso da matéria seca (MS) produzida por cada sistema de cultura de inverno.

As amostragens de solo nas áreas estudadas foram realizadas em outubro de 2014, 40 dias após a dessecação das plantas de cobertura do solo, sendo retiradas amostras deformadas nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 e 0,20-0,25 m. Posteriormente, as

amostras foram encaminhadas para análises químicas ao Laboratório de Química do Solo da Universidade Federal de Santa Maria - Campus Frederico Westphalen, sendo determinados os teores de matéria orgânica do solo (MOS), $\text{pH}_{\text{água}}$ (1:1), teores extraíveis de P e K (Mehlich), Ca e Mg ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$), acidez trocável (Al) e potencial (H+Al), e calculados a relação Ca/Mg, capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m), todas conforme metodologias descritas em Tedesco et al. (1995) e recomendadas pela Comissão... (2004).

Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise exploratória (estatística descritiva), objetivando verificar a posição e dispersão dos dados, e sendo verificada a existência de tendência central (normalidade) dos dados por meio do teste Shapiro-Wilk (W) a $p < 0,05$ (SHAPIRO e WILK, 1965). Com base nos valores de coeficiente de variação (CV), a dispersão dos dados foi classificada em: baixa ($\text{CV} < 15\%$), moderada ($15\% < \text{CV} < 35\%$), e alta variabilidade ($\text{CV} > 35\%$) (WILDING e DREES, 1983). Foi efetuada a análise da variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), conforme Ferreira et al. (2012), além da correlação simples de Pearson entre os atributos analisados, classificados como: fraca ($0,1 < r < 0,3$), moderada ($0,4 < r < 0,6$), forte ($r > 0,7$), e ideal ($r = 1$), conforme Dancey e Reidy (2006). Para as análises dos dados foi utilizado o programa estatístico ASSISTAT 7.7.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise descritiva exploratória dos atributos químicos do solo possibilitou verificar que a área experimental apresenta $\text{pH}_{\text{água}}$ alto, CTC e saturação por bases alta, teores de MOS médios e baixa saturação por Al (Tabela 2) (COMISSÃO..., 2004), não restringindo o desenvolvimento normal das plantas cultivadas sob SPD (FIORIN, 2007; CHERUBIN, 2013).

Tabela 2 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo em dez sistemas de culturas de inverno em cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014

(continua)

Variável ²	Profundidade de amostragem (m)	Parâmetros Estatísticos ¹								
		n	Valores			DP	Coeficientes			Teste W ³
			Mínimo	Média	Máximo		CV	Cs	Ck	
MOS (g kg ⁻¹)	0,00 - 0,05	100	17,1	30,0	41,0	2,7	12,27	-0,33	2,22	0,96*
	0,05 - 0,10	100	18,4	25,1	32,1	1,8	9,95	0,39	1,18	0,97*
	0,10 - 0,15	100	16,1	22,2	29,4	2,3	10,56	0,22	0,42	0,99 ^{ns}
	0,15 - 0,20	100	13,6	19,5	27,6	2,6	13,52	0,39	0,54	0,98 ^{ns}
	0,20 - 0,25	100	12,7	18,0	37,6	3,2	17,90	2,39	12,87	0,84*
pH _{água}	0,00 - 0,05	100	5,57	6,76	7,57	0,44	6,52	-0,68	-0,13	0,95*
	0,05 - 0,10	100	5,23	6,75	7,65	0,52	7,72	-0,93	0,51	0,93*
	0,10 - 0,15	100	5,40	6,86	7,66	0,50	7,29	-1,03	0,56	0,91*
	0,15 - 0,20	100	5,31	6,73	7,47	0,53	7,93	-0,83	-0,02	0,93*
	0,20 - 0,25	100	5,34	6,64	7,76	0,56	8,44	-0,50	-0,40	0,96*
P (mg dm ⁻³)	0,00 - 0,05	100	2,0	16,8	40,4	7,9	47,10	1,02	0,70	0,92*
	0,05 - 0,10	100	1,1	10,5	36,6	5,8	55,61	1,85	4,81	0,85*
	0,10 - 0,15	100	1,4	5,2	17,7	3,3	65,14	1,64	2,73	0,84*
	0,15 - 0,20	100	0,8	2,6	14,6	1,8	69,25	3,59	18,94	0,68*
	0,20 - 0,25	100	0,9	2,1	17,3	1,9	91,92	6,28	46,57	0,41*
K (mg dm ⁻³)	0,00 - 0,05	100	36	284	520	82	28,82	0,12	0,41	0,99 ^{ns}
	0,05 - 0,10	100	44	162	333	62	38,62	0,48	-0,11	0,97*
	0,10 - 0,15	100	31	112	282	58	51,55	0,88	0,22	0,93*
	0,15 - 0,20	100	25	78	231	47	60,65	1,19	0,84	0,88*
	0,20 - 0,25	100	17	61	353	47	77,18	3,19	15,19	0,71*
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0,00 - 0,05	100	5,7	9,4	12,2	1,4	15,10	-0,59	-0,32	0,96*
	0,05 - 0,10	100	4,4	8,8	12,5	1,9	21,13	-0,60	-0,46	0,95*
	0,10 - 0,15	100	3,5	7,9	11,1	1,9	23,81	-0,49	-0,51	0,96*
	0,15 - 0,20	100	3,1	6,7	10,0	1,6	23,74	-0,49	-0,49	0,96*
	0,20 - 0,25	100	2,4	5,9	8,4	1,4	23,73	-0,33	-0,47	0,98 ^{ns}
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,00 - 0,05	100	3,6	5,4	7,5	0,7	12,22	0,25	1,53	0,96*
	0,05 - 0,10	100	2,9	5,1	6,9	0,9	17,42	-0,49	-0,18	0,96*
	0,10 - 0,15	100	2,5	4,7	7,4	0,8	17,60	-0,47	0,88	0,95*
	0,15 - 0,20	100	2,1	4,1	5,9	0,8	18,86	-0,32	0,16	0,98 ^{ns}
	0,20 - 0,25	100	1,7	3,6	6,1	0,8	21,05	0,02	0,71	0,98 ^{ns}
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,00 - 0,05	100	0,00	0,01	0,13	0,02	230,98	4,38	26,67	0,48*
	0,05 - 0,10	100	0,00	0,01	0,16	0,03	227,87	3,11	10,71	0,51*
	0,10 - 0,15	100	0,00	0,01	0,12	0,03	212,60	2,42	5,29	0,54*
	0,15 - 0,20	100	0,00	0,02	0,27	0,06	212,88	3,08	9,61	0,52*
	0,20 - 0,25	100	0,00	0,04	0,41	0,08	204,73	2,57	6,21	0,55*
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	0,00 - 0,05	100	1,2	1,8	4,1	0,6	31,29	1,62	2,39	0,81*
	0,05 - 0,10	100	1,1	1,9	4,4	0,8	40,15	1,45	1,16	0,78*
	0,10 - 0,15	100	1,2	1,9	3,9	0,7	35,86	1,36	0,89	0,82*
	0,15 - 0,20	100	1,2	2,0	3,9	0,6	31,96	1,23	0,64	0,87*
	0,20 - 0,25	100	1,4	2,1	3,8	0,6	29,48	1,09	-0,07	0,84*
CTC (cmol _c dm ⁻³)	0,00 - 0,05	100	12,8	17,3	21,0	1,7	9,87	-0,41	-0,11	0,98 ^{ns}
	0,05 - 0,10	100	10,9	16,1	19,4	2,1	13,14	-0,50	-0,77	0,95*
	0,10 - 0,15	100	9,3	14,7	19,4	2,2	15,24	-0,28	-0,54	0,98 ^{ns}
	0,15 - 0,20	100	8,1	12,9	17,8	2,1	16,52	-0,35	-0,32	0,97*
	0,20 - 0,25	100	7,4	11,8	19,4	2,2	19,10	0,26	0,41	0,98 ^{ns}
V (%)	0,00 - 0,05	100	74	89	94	4	5,02	-1,57	1,82	0,80*
	0,05 - 0,10	100	65	88	94	7	8,08	-1,51	1,33	0,76*
	0,10 - 0,15	100	65	87	93	7	8,61	-1,43	0,97	0,79*
	0,15 - 0,20	100	54	84	93	9	10,51	-1,50	1,46	0,80*
	0,20 - 0,25	100	53	82	92	10	12,02	-1,26	0,46	0,82*
m (%)	0,00 - 0,05	100	0,0	0,0	0,8	0,1	218,95	3,39	15,20	0,53*
	0,05 - 0,10	100	0,0	0,1	1,9	0,3	253,24	3,55	14,03	0,46*
	0,10 - 0,15	100	0,0	0,2	1,6	0,4	230,86	2,72	6,95	0,50*
	0,15 - 0,20	100	0,0	0,4	5,9	1,0	253,61	3,60	13,45	0,45*
	0,20 - 0,25	100	0,0	0,7	7,9	1,6	231,67	2,85	7,88	0,49*

Tabela 2 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo em dez sistemas de culturas de inverno em cinco profundidades. Frederico Westphalen, RS, 2014

(conclusão)										
Variável ²	Profundidade de amostragem (m)	Parâmetros Estatísticos ¹								
		n	Valores			DP	Coeficientes			Teste W ³
			Mínimo	Média	Máximo		CV	Cs	Ck	
Relação Ca/Mg	0,00 - 0,05	100	1,09	1,76	2,24	0,20	11,42	-0,72	1,20	0,96*
	0,05 - 0,10	100	0,92	1,74	2,63	0,24	14,10	0,03	2,88	0,94*
	0,10 - 0,15	100	0,70	1,68	2,53	0,31	18,53	-0,64	2,13	0,93*
	0,15 - 0,20	100	0,90	1,65	2,28	0,27	16,14	-0,04	0,34	0,99 ^{ns}
	0,20 - 0,25	100	0,54	1,60	3,13	0,37	23,26	0,50	3,23	0,94*

⁽¹⁾ Onde: n= número de observações (pontos amostrais); DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação (%); Cs= coeficiente de assimetria; Ck= coeficiente de curtose; ⁽²⁾ MOS= matéria orgânica do solo; CTC= capacidade de troca de cátions; V= saturação por bases; m= saturação por alumínio. ⁽³⁾ Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (*) significativo em níveis de $p < 0,05$ e (^{ns}) não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

Os nutrientes P, K, Ca e Mg apresentaram, em média, teores classificados como altos ou muito altos (COMISSÃO..., 2004) até a profundidade de pelo menos 0,10 m, sendo constatada redução dos teores com aumento da profundidade amostrada (Tabelas 2 e 3) semelhante ao trabalho de Corassa et al. (2015), além do aumento da variabilidade dos dados (CV). Este resultado é comum em áreas manejadas sob SPD, onde a aplicação de calcário (Ca e Mg) e as adubações sequenciais em superfície (NPK) resultam na formação de um gradiente vertical de fertilidade (SCHLINDWEIN e ANGHINONI, 2002). No caso do P, o gradiente formado também é condicionado pela baixa mobilidade e concentração natural do nutriente em Latossolos (SCHLINDWEIN, 2003; CORASSA et al., 2015). Segundo Dalla Nora e Amado (2014), esse gradiente de redução da qualidade química em SPD possui grande importância no RS por ser um dos Estados brasileiros que registra maiores perdas de produção agrícola em decorrência de recorrentes estresses hídricos de variada intensidade.

Tabela 3 – Valores médios dos atributos químicos do solo em cinco profundidades sob dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014

Atributos químicos do solo em profundidade												
Prof. (m)	MOS	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	m	Relação
	g kg ⁻¹	H ₂ O	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	%	%	Ca/Mg
0,00 - 0,05	30,0 a ¹	6,76 b	16,7 a	284 a	9,4 a	5,4 a	0,01 c	1,8 c	17,3 a	89 a	0,0 c	1,76 a
0,05 - 0,10	25,1 b	6,75 b	10,5 b	162 b	8,8 b	5,1 b	0,01 c	1,9 c	16,1 b	88 b	0,1 c	1,74 a
0,10 - 0,15	22,2 c	6,86 a	5,2 c	112 c	7,9 c	4,7 c	0,01 c	1,9 c	14,7 c	87 c	0,2 c	1,68 b
0,15 - 0,20	19,4 d	6,73 b	2,7 d	78 d	6,7 d	4,1 d	0,02 b	2,0 b	12,9 d	84 d	0,4 b	1,65 b
0,20 - 0,25	18,0 e	6,64 b	2,1 d	61 e	5,9 e	3,6 e	0,04 a	2,1 a	11,8 e	82 e	0,7 a	1,60 b

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Em relação a dispersão dos dados (Tabela 2), com base nos valores de CV, verificou-se que a MOS, $\text{pH}_{\text{água}}$ e saturação por bases, apresentaram baixa dispersão ($\text{CV} < 15\%$), concordando com estudos anteriores (AMADO et al., 2009; CHERUBIN, 2013). No entanto, apesar dos dados de $\text{pH}_{\text{água}}$ e saturação por bases apresentarem baixa dispersão, indicaram falta de normalidade nos dados, com assimetrias negativas ($C_s < 0$) e distribuições platicúrticas ($C_k < 0$) ou leptocúrticas ($C_k > 0$), também observados por Dalchiavon et al. (2012) e Cherubin (2013). Os teores de P e K apresentaram alta dispersão dos dados ($\text{CV} > 35\%$), o mesmo que o constatado por Amado et al. (2009), com fortes assimetrias positivas para os valores de P, e para K nas camadas subsuperficiais, seguindo tendência de distribuições leptocúrticas.

Já para Ca e Mg, a dispersão dos dados foi moderada em todas as camadas, assim como observado por Bottega et al. (2013), apresentando normalidade apenas nas camadas inferiores, ocorrendo de forma semelhante na relação Ca/Mg e a CTC, porém com dispersões de fraca a moderada, com assimetrias predominantemente negativas fracas e distribuição platicúrtica para Ca e CTC, e assimetrias negativas/positivas fracas e distribuição leptocúrticas para Mg e relação Ca/Mg. Os teores de Al trocável e a saturação pelo mesmo (m) apresentaram altíssima variabilidade nos dados, com CV superiores a 200%, devido ao fato de haver presença ou ausência (muitos valores zero) do elemento em algumas camadas e sistemas, dessa forma apresentando o desvio padrão (DP) maior que a média dos dados, sendo mais elevadas nas camadas inferiores, devido a menor saturação por bases em profundidade (Tabelas 2 e 3). De forma diferente, a acidez potencial (H+Al) apresentou dispersão moderada dos dados, não havendo normalidade destes.

Os sistemas de culturas de inverno contribuíram de forma diferente no teor de MOS na camada superficial do solo (0,00 - 0,05 m), destacando os maiores valores nos sistemas com Ap, AZ e o consórcio de Ap+E (Tabela 4), corroborando com os resultados encontrados de vários pesquisadores (BAYER e MIELNICZUK, 1997b; SANTOS e TOMM, 2003; FABIAN, 2009), com os sistemas TB e PO apresentando os menores valores observados. Isto evidencia que a manutenção dos resíduos vegetais, principalmente de gramíneas com alta relação C/N, tende a aumentar a MOS, enquanto que resíduos culturais de menor relação C/N (leguminosas ou crucíferas) tendem a manter os teores ao longo do tempo, em níveis próximos aos do pousio invernal (PO). Além disso, a MOS apresentou forte correlação com os atributos P, K, CTC, assim como moderada para Ca e moderada-forte para Mg (Tabela 5), evidenciando sua importância como reserva de nutrientes no solo (ZANDONADI et al., 2014).

Tabela 4 – Valores dos atributos químicos analisados em dez sistemas de culturas de inverno em cinco profundidades, Frederico Westphalen, RS, 2014

(continua)

Atributos químicos do solo												
----- 0,00 - 0,05 m -----												
Sistema de cultura ¹	MOS	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	m	Relação
	g kg ⁻¹	H ₂ O	mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³			%		Ca/Mg
Ap	30,9 a ²	6,41 b	10,7 b	299 a	7,8 c	5,1 b	0,0 ns	2,6 a	16,3 c	84 c	0,0 ns	1,6 b
AB	30,4 b	6,13 b	13,6 b	312 a	7,1 c	4,7 b	0,0	2,8 a	15,4 c	82 c	0,0	1,5 b
AZ	30,7 a	6,64 a	14,7 b	233 c	8,7 b	5,2 b	0,0	2,1 b	16,6 b	87 b	0,0	1,7 b
NF	29,6 b	6,89 a	20,6 a	270 b	9,6 a	5,0 b	0,0	1,7 c	17,0 b	90 a	0,0	1,9 a
E	30,4 b	6,94 a	18,1 a	297 b	9,7 a	5,4 a	0,0	1,6 c	17,4 a	91 a	0,0	1,8 a
ApNFE	30,1 b	6,72 a	14,1 b	317 a	10,1 a	5,4 a	0,0	1,6 c	17,9 a	91 a	0,0	1,9 a
ApNF	29,6 b	6,91 a	17,5 a	278 b	10,2 a	5,7 a	0,0	1,5 c	18,1 a	92 a	0,0	1,8 a
ApE	31,7 a	7,03 a	20,4 a	349 a	10,5 a	5,6 a	0,0	1,4 c	18,4 a	92 a	0,0	1,8 a
TB	28,2 b	7,01 a	19,1 a	249 b	9,8 a	5,7 a	0,0	1,4 c	17,5 a	92 a	0,0	1,7 b
PO	28,1 b	6,95 a	18,2 a	242 c	10,5 a	5,8 a	0,0	1,4 c	18,3 a	92 a	0,0	1,8 a
----- 0,05 - 0,10 m -----												
Ap	23,8 ns	6,07 c	7,8 b	152 b	6,1 d	4,2 b	0,1 a	3,3 a	14,0 d	76 c	0,6 ns	1,5 b
AB	25,0	6,05 c	9,3 b	168 b	6,2 d	4,0 b	0,1 a	3,0 a	13,6 d	78 c	0,5	1,6 b
AZ	25,0	6,63 b	11,7 b	155 b	7,8 c	4,4 b	0,0 b	2,2 b	14,8 c	85 b	0,1	1,7 b
NF	25,0	6,75 b	12,7 a	140 b	8,7 b	5,2 a	0,0 b	1,7 c	16,0 b	89 a	0,0	1,7 b
E	25,3	6,93 b	9,9 b	183 b	9,1 b	5,4 a	0,0 b	1,6 c	16,6 b	90 a	0,0	1,7 b
ApNFE	24,7	6,82 b	9,8 b	160 b	10,1 a	5,4 a	0,0 b	1,6 c	17,5 b	91 a	0,0	1,9 a
ApNF	26,1	7,10 a	9,7 b	154 b	9,7 a	5,7 a	0,0 b	1,5 c	17,3 b	91 a	0,0	1,7 b
ApE	25,0	7,16 a	12,5 b	197 a	10,2 a	5,3 a	0,0 b	1,5 c	17,5 b	91 a	0,0	1,9 a
TB	24,8	6,90 b	11,3 b	142 b	9,8 a	5,4 a	0,0 b	1,5 c	17,1 b	91 a	0,0	1,8 a
PO	26,2	7,08 a	10,0 b	162 b	10,4 a	5,8 a	0,0 b	1,5 c	18,1 b	92 a	0,0	1,8 a
----- 0,10 - 0,15 m -----												
Ap	21,1 ns	6,04 b	2,9 b	96 ns	5,4 c	3,8 b	0,1 a	3,1 a	12,5 c	75 c	0,7 a	1,5 b
AB	20,7	6,20 b	4,0 b	109	5,3 c	3,9 b	0,1 a	2,9 a	12,4 c	77 c	0,7 a	1,4 b
AZ	22,7	6,77 a	5,6 b	111	7,0 b	4,5 a	0,0 b	2,1 b	13,9 b	85 b	0,0 b	1,6 b
NF	22,4	7,08 a	8,0 a	108	8,4 a	5,1 a	0,0 b	1,6 c	15,4 a	90 a	0,0 b	1,6 b
E	22,2	7,10 a	6,2 b	138	8,3 a	5,1 a	0,0 b	1,6 c	15,4 a	90 a	0,0 b	1,6 b
ApNFE	22,1	6,95 a	4,3 b	115	9,1 a	4,9 a	0,0 b	1,6 c	15,9 a	90 a	0,0 b	1,9 a
ApNF	22,3	7,13 a	4,8 b	102	8,5 a	5,0 a	0,0 b	1,5 c	15,3 a	90 a	0,0 b	1,7 a
ApE	22,6	7,13 a	5,5 b	133	8,9 a	5,1 a	0,0 b	1,4 c	15,7 a	91 a	0,0 b	1,8 a
TB	22,3	7,11 a	4,8 b	95	9,3 a	4,9 a	0,0 b	1,5 c	15,9 a	91 a	0,0 b	1,9 a
PO	23,1	7,10 a	5,5 b	114	9,1 a	5,0 a	0,0 b	1,5 c	15,9 a	91 a	0,0 b	1,8 a
----- 0,15 - 0,20 m -----												
Ap	18,2 ns	6,04 b	2,0 ns	63 ns	4,6 c	2,9 b	0,1 a	3,0 a	10,7 c	72 c	1,5 a	1,6 ns
AB	18,7	5,93 b	1,4	58	5,0 c	3,1 b	0,1 a	3,1 a	11,3 c	73 c	2,1 a	1,6
AZ	18,5	6,82 a	2,2	72	6,3 b	4,1 a	0,0 b	2,1 b	12,7 b	83 b	0,2 b	1,6
NF	19,9	6,99 a	3,8	90	7,2 b	4,4 a	0,0 b	1,6 b	13,4 a	88 a	0,1 b	1,6
E	19,1	6,92 a	2,6	105	6,9 b	4,4 a	0,0 b	1,7 b	13,3 a	87 a	0,1 b	1,6
ApNFE	20,2	6,91 a	3,3	68	6,9 b	4,4 a	0,0 b	1,6 b	13,1 a	88 a	0,1 b	1,6
ApNF	19,4	6,99 a	2,3	70	7,2 b	4,3 a	0,0 b	1,6 b	13,3 a	88 a	0,1 b	1,6
ApE	20,1	6,92 a	3,5	104	8,2 a	4,4 a	0,0 b	1,6 b	14,5 a	89 a	0,1 b	1,8
TB	19,5	6,88 a	2,9	67	6,9 b	4,2 a	0,0 b	1,8 b	13,1 a	86 a	0,1 b	1,6
PO	20,4	6,91 a	2,5	80	8,0 a	4,6 a	0,0 b	1,8 b	14,6 a	88 a	0,1 b	1,8

⁽¹⁾ Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), e (ns) não significativo ($p \leq 0,05$).

Tabela 4 – Valores dos atributos químicos analisados em dez sistemas de culturas de inverno em cinco profundidades, Frederico Westphalen, RS, 2014

(conclusão)

Sistema de cultura	Profundidade (m)												Relação Ca/Mg
	----- 0,20 - 0,25 m -----												
	MOS g kg ⁻¹	pH H ₂ O	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V %	m		
Ap	16,5 b ¹	6,04 b	1,6 ^{ns}	42 ^{ns}	4,6 b	3,1 b	0,2 a	3,1 a	10,9 b	72 c	2,6 ^{ns}	1,6 ^{ns}	
AB	16,1 b	5,83 b	1,5	48	4,6 b	3,0 b	0,2 a	3,0 a	10,7 b	72 c	2,8	1,8	
AZ	16,0 b	6,57 a	1,5	47	5,3 b	3,6 a	0,1 b	2,3 b	11,3 b	80 b	0,8	1,6	
NF	20,1 a	6,82 a	3,6	93	5,9 a	4,1 a	0,0 c	1,9 c	12,1 a	84 a	0,1	1,6	
E	17,2 b	6,91 a	1,7	77	6,2 a	3,8 a	0,0 c	1,8 c	12,0 a	85 a	0,1	1,6	
ApNFE	17,5 b	6,92 a	2,2	49	5,9 a	3,8 a	0,0 c	1,8 c	11,6 a	85 a	0,1	1,6	
ApNF	17,8 b	6,95 a	1,9	57	6,5 a	3,9 a	0,0 c	1,8 c	12,3 a	85 a	0,1	1,7	
ApE	18,8 a	6,81 a	3,1	79	6,7 a	3,8 a	0,0 c	1,9 c	12,6 a	85 a	0,1	1,8	
TB	18,8 a	6,70 a	2,2	47	5,9 a	3,8 a	0,0 c	2,0 c	11,8 a	83 a	0,1	1,6	
PO	20,9 a	6,86 a	1,4	66	7,0 a	4,5 a	0,0 c	2,0 c	13,7 a	85 a	0,1	1,6	

⁽¹⁾ Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremçoço branco; PO = pousio invernal. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), e (^{ns}) não significativo ($p \leq 0,05$).

Para os teores extraíveis de P no solo, notou-se um aumento nos valores na camada superficial quando utilizados sistemas como NF, E e ApE, sendo possível observar, que o primeiro sistema, promoveu aumento nas três primeiras camadas superficiais. Isto se deve provavelmente a ciclagem e a capacidade de absorção de P pelo NF, além da rapidez no processo de liberação no solo, devido a menor relação C/N e C/P, semelhante a E (CASALI et al., 2011), acelerando a mineralização dos resíduos da parte aérea e radicular do NF, e aumentando a biodisponibilidade de P no solo, sendo um fator primordial para a justificativa de uso desta planta de cobertura em sistemas de cultivos para aumentar a disponibilidade de P, associado a ciclagem de N.

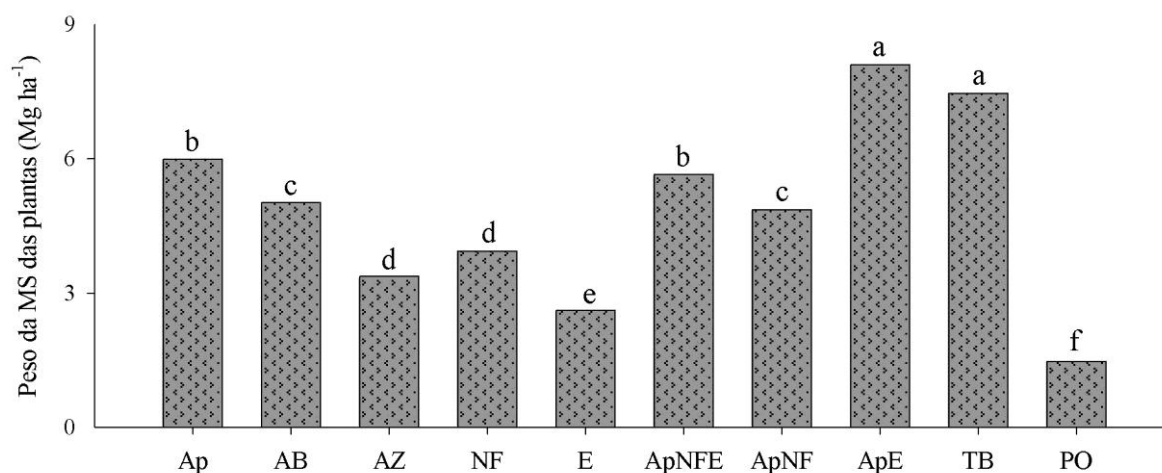
Ainda, pode-se observar que as gramíneas apresentaram menores valores de P, seguindo a tendência até mesmo em consórcio com NF e E (ApNFE) na camada superficial, além dos demais consórcios nas camadas de 0,05 - 0,10 e 0,10 - 0,15 m, devido a alguns fatores, como os menores teores de P na fitomassa e no solo cultivado com Ap, em relação ao NF solteiro ou consorciado com Ap ou centeio (MARTINS, 2013), e a imobilização de P proporcionada pelos resíduos com menor relação C/N e C/P (GIACOMINI et al., 2003a; CASALI et al., 2011), não possibilitando o aumento da disponibilidade no solo.

Já os teores extraíveis de K no solo diferiram entre os sistemas de culturas de inverno apenas nas duas primeiras camadas superficiais do solo, destacando-se os maiores valores na camada de 0,00 - 0,05 m nos sistemas com gramíneas Ap e AB, e nos consórcios ApNFE e

ApE. Não por acaso, esses sistemas de culturas de inverno são alguns dos que apresentam maiores produções de MS (Figura 1), produzindo no mínimo 5,02 Mg ha⁻¹ (AB), chegando até 8,10 Mg ha⁻¹ com o consórcio ApE, que por sua vez também apresentou os maiores valores de K extraível, também na camada de 0,05 - 0,10 m.

Giacomini et al. (2003b) relataram que o acúmulo de K por gramíneas, enquanto alguns trabalhos de pesquisa (SANTI et al., 2003; BORKERT et al., 2003; MELO et al., 2011) destacam a importância da ciclagem de K fornecida por sistemas que contenham gramíneas, principalmente Ap, devido a maior produção de MS, sendo esta uma importante estratégia para reduzir as perdas por escoamento superficial na entressafra de culturas comerciais, devido ao sistema radicular profundo.

Figura 1 – Produção de matéria seca em dez sistemas de culturas de inverno no terceiro ano de cultivo. Frederico Westphalen, RS, 2014



* Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremço branco; PO = pousio invernal. Valores seguidos pela mesma letra minúscula não diferem significativamente pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Da mesma forma, nota-se que os sistemas AZ e PO apresentaram menores teores de K em superfície no solo, provavelmente devido a baixa produção de MS, sendo que, os valores de MS variaram de 3,37 Mg ha⁻¹ para AZ, a apenas 1,47 Mg ha⁻¹ no PO (Figura 1), mostrando que o K possui uma dinâmica diferenciada dos demais nutrientes, se tornando prontamente disponível no solo a partir da degradação dos resíduos culturais. Melo et al. (2011) também encontrou desfavorecimento do PO nos teores de K observados no solo, devido a pouca produção de MS, e o baixo conteúdo deste nutriente na parte aérea da vegetação espontânea, além da pouca palhada favorecer as perdas de K por escoamento superficial.

Quanto aos teores das bases Ca e Mg no solo, relação Ca/Mg, e conseqüentemente a CTC, V, e até mesmo o pH_{água}, provavelmente devido a correlação existente entre estes atributos (Tabela 5), houve um comportamento muito semelhante, que persistiu desde as camadas mais superficiais até as maiores profundidades analisadas, sendo observado teores menores em sistemas compostos por gramíneas solteiras, como Ap, AB, e por vezes, AZ.

Tabela 5 – Coeficientes de correlação simples de Pearson entre os atributos químicos do solo analisados em dez sistemas de culturas de inverno, Frederico Westphalen, RS, 2014

Atributos	MOS	pH _{água}	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	m	Ca/Mg
MOS	1	0,12*	0,75**	0,76**	0,60**	0,67**	-0,30**	-0,17*	0,75**	0,42**	-0,30**	0,11*
pH _{água}		1	0,11*	0,08 ^{ns}	0,55**	0,44**	-0,57**	-0,80**	0,50**	0,76**	-0,51**	0,31**
P			1	0,71**	0,56**	0,55**	-0,21*	-0,25**	0,65**	0,39**	-0,20*	0,18*
K				1	0,50**	0,51**	-0,23**	-0,17*	0,61**	0,35**	-0,23**	0,15*
Ca					1	0,79**	-0,50**	-0,72**	0,92**	0,82**	-0,46**	0,58**
Mg						1	-0,45**	-0,58**	0,88**	0,71**	-0,42**	-0,02 ^{ns}
Al							1	0,67**	-0,52**	-0,78**	0,98**	-0,21*
H+Al								1	-0,64**	-0,93**	0,60**	-0,39**
CTC									1	0,82**	-0,50**	0,33**
V										1	-0,74**	0,38**
m											1	-0,18*
Ca/Mg												1

Significativo *(p ≤ 0,05) e **(p ≤ 0,01); ^(ns) não significativo.

Correia e Durigan (2008), após apenas dois anos sob SPD, comparando diversas espécies de gramíneas usadas como cobertura do solo e a vegetação espontânea (PO), observaram que esta última proporcionou maiores valores de pH_{água}, Ca, Mg, V e CTC que as gramíneas, enquanto estas apresentaram maiores valores de P e MOS que o pousio, resultados condizentes com os encontrados neste trabalho, com exceção dos valores de P, que foram maiores no sistema PO do que os valores encontrados nos sistemas de culturas compostos por gramíneas em monocultivo.

Outro fato relevante, que faz com que o sistema PO apresente valores elevados destes e outros atributos químicos (como o P), é justamente a menor produção de MS (Figura 1), acumulando principalmente em superfície todo o insumo mineral destinado as culturas de verão, resultante de uma menor extração de nutrientes existente nesse sistema de cultura (CAMARGO e PIZA, 2007; MELO et al., 2011). Pode-se acrescentar, que devido a menor qualidade física (NASCENTE et al., 2015), química e biológica proporcionada pelo PO, torna-se ilusória a "qualidade química" por vezes existente neste local, por ser somente superficial, prejudicando em poucos anos a formação de um perfil fértil em profundidade.

Já os sistemas de culturas de inverno com consórcios de plantas (ApNFE, ApNF e ApE), acabam por possuir um sistema radicular diferenciado, explorando diferentes camadas do perfil do solo, e ciclando diferencialmente os nutrientes, os depositando na camada agricultável e resultando em efeitos diversos no solo devido a produção de diferentes tipos de ácidos orgânicos, tendendo a promover melhorias nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (MEDEIROS e CALEGARI, 2007). O desempenho de plantas de cobertura de outono/inverno, quando consorciadas, é um aspecto ainda pouco estudado no sul do Brasil (MEDRADO et al., 2011), restringindo-se em maior parte entre aveia e ervilhaca (BASSO, 1999; HEINRICHS et al., 2001), sendo necessário ampliar o número de opções, selecionando-se aquelas espécies que melhor se adaptem ao cultivo consorciado, visando maximizar a produção de matéria seca, a adição de carbono ao solo e o acúmulo de nutrientes (GIACOMINI et al., 2003).

Além disso, a rotação de culturas e o provimento de resíduos vegetais sobre o solo no SPD, promovem aumento da atividade biológica (DE-POLLI e CHADA, 1989), aumentam a CTC, bem como, melhoram a disponibilidade de nutrientes (ELTZ et al., 1989), alterando os valores de $\text{pH}_{\text{água}}$ e diminuindo a saturação por Al (SIDIRAS e PAVAN, 1985; FABIAN, 2009). Assim como encontrado neste trabalho, Amaral et al. (2000) também observaram acréscimo de $\text{pH}_{\text{água}}$ proporcionado pela cultura da ervilhaca, bem como o decréscimo de $\text{pH}_{\text{água}}$ quando utilizada a aveia preta, ao contrário do que foi relatado por Caires et al. (2006), que não encontraram efeitos da aveia preta no pH do solo.

Por consequência dos valores de $\text{pH}_{\text{água}}$, CTC e V encontrados neste presente trabalho (Tabela 4), os valores de Al, m, e H+Al apresentaram-se baixos ou até mesmo inexistentes, sendo desconsideráveis para serem interpretados, seguindo a tendência de apresentar um gradiente inverso aos demais elementos observados, aumentando sensivelmente conforme a profundidade de solo analisada (Tabela 3).

3.6 CONCLUSÕES

O sistema NF elevou os teores de P no solo nas três camadas mais superficiais avaliadas (0,00 - 0,05; 0,05 - 0,10 e 0,10 - 0,15 m) quando utilizado de forma solteira, enquanto que as gramíneas (Ap, AB e AZ), proporcionaram redução nos teores de P no solo, imobilizando/reduzindo o P ciclado pelo NF quando consorciadas com esta.

Sistemas de culturas com maior produção de MS, proporcionaram aumento nos teores de K nas camadas superficiais do solo, estimulando a utilização de sistemas consorciados, em razão da maior produção de resíduos culturais apresentada nestes sistemas.

O uso de sistemas de monoculturas de gramíneas (Ap, AB e AZ), apesar de apresentar teores de K e MOS elevados, ocasionaram, em algumas camadas, o decréscimo dos teores de P, pH_{água}, Ca, Mg, CTC e da saturação por bases, caracterizando, desta maneira, sistemas que devem ser evitados em longo prazo, devendo ser rotacionados ou consorciados com outras espécies.

O sistema de cultura de pousio invernal (PO) é o que produz menos resíduos culturais (MS), resultando em menor extração/ciclagem de nutrientes, promovendo acúmulo superficial do P proveniente da adubação das culturas de verão, e, ocasionando maiores perdas de nutrientes facilmente perdidos pelo escoamento superficial, como o K, pela falta de proteção superficial.

3.7 AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Clóvis Orlando da Ros, ao laboratorista Lucindo Somavilla e ao Laboratório de Química do Solo da UFSM, campus Frederico Westphalen, RS, pelo auxílio desde a elaboração do projeto até as análises químicas deste trabalho. Ao Prof. Dr. Antônio Luis Santi pela dedicação e empenho quanto a realização deste experimento. Aos integrantes do LAPSul ajuda na amostragem de solo. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

3.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADO, T. J. C. et al. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1101-1110, ago. 2007.

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**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 831-843, 2009.

AMARAL, A. S. et al. Resíduos vegetais na superfície do solo afetam a acidez do solo e a eficiência do herbicida Flumetsulam. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 789-794, set./out. 2000.

ANDREOLA, F. et al. Propriedades químicas de uma Terra Roxa Estruturada influenciadas pela cobertura vegetal de inverno e pela adubação orgânica e mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 609-620, 2000.

BASSO, C. J. **Épocas de aplicação de nitrogênio para o milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de solo, no sistema plantio direto**. 1999. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

BASTOS, R. B. et al. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 21-31, jan./fev. 2005.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 235-239, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 105-112, 1997.

BERTOL, I. et al. Persistência de resíduos culturais de aveia e milho sobre a superfície do solo em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 705-712, 1998.

BOER, C. A. et al. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 9, p. 1269-1276, 2007.

BRESSAN, S. B. et al. Plantas de cobertura e qualidade química de Latossolo Amarelo sob plantio direto no cerrado maranhense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 371-378, 2013.

BORKERT, C. M. et al. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 143-153, jan. 2003.

BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

CAIRES, S. F. et al. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 87-98, 2006.

CAMARGO, R.; PIZA, R. J. Produção de biomassa de plantas de cobertura e efeitos na cultura do milho sob sistema plantio direto no município de Passos, MG. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 76-80, jul./set. 2007.

- CASALI, C. A. et al. **Mineralização das formas de fósforo do tecido de plantas de cobertura**. Piracicaba: Informações Agronômicas - IPNI. set. 2011. p. 21-24. (Documentos, n. 135)
- CAVALCANTE, V. S. et al. Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 521-528, 2012.
- CORREIA, N. M.; DURIGAN, J. C. Culturas de cobertura e sua influência na fertilidade do solo sob sistema de plantio direto (SPD). **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 4, p. 20-31, 2008.
- CHERUBIN, M. R. **Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização de atributos químicos em Latossolos manejados com Agricultura de Precisão**. 2013. 101 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2013.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.
- CORASSA, G. M. **Manejo por ambiente: atributos de solo e desempenho de cultivares de soja**. 2015. 124 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2015.
- CUCUNUBÁ-MELO, J. L.; ÁLVAREZ-HERRERA, J. G.; CAMACHO-TAMAYO, J. H. Identification of agronomic management units based on physical attributes of soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 11, n. 1, p. 87-99, 2011.
- CUNHA, E. Q. et al. Atributos químicos de solo sob produção orgânica influenciados pelo preparo e por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1021-1029, 2011.
- DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Estratégias de manejo para o incremento da eficiência do uso da água no Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 142/143, p. 19-29, jul./out. 2014.
- DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, p. 453-461, 2012.
- DANCEY C. P.; REIDY J. **Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 608 p.
- DE-POLLI, H.; CHADA, S. S. Adubação verde incorporada ou em cobertura na produção de milho em solo de baixo potencial de produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 287-293, 1989.

ELTZ, F. L. P.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeito de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno Álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 259-267, 1989.

ESPINDOLA, J. A. A. et al. Composição e liberação de nutrientes acumulados em leguminosas herbáceas perenes consorciadas com bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 321-328, 2006.

FABIAN, A. J. **Plantas de cobertura: efeito nos atributos do solo e na produtividade de milho e soja em rotação**. 2009. 83 p. Tese (Doutorado em Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

FERNANDES, M. F.; BARRETO, A. C.; EMÍDIO FILHO, J. Fitomassa de adubos verdes e controle de plantas daninhas em diferentes densidades populacionais de leguminosas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 1593-1600, 1999.

FERREIRA, D. F.; FILHO, A. C.; LÚCIO, A. D. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrições na casualização. **Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 16-19, set./dez. 2012.

FIORIN, J. E. **Manejo e Fertilidade do Solo no Sistema Plantio Direto**. Passo Fundo: Berthier, 2007. 184 p.

GIACOMINI, S. J. et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 9, p. 1097-1104, 2003a.

GIACOMINI, S. J. et al. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 325-334, 2003b.

HEINRICH, R. et al. Cultivo consorciado de aveia e ervilhaca: relação C/N da fitomassa e produtividade do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 331-340, 2001.

LAL, R.; PIRCE, F. J. The vanishing resource. In: LAL, R. & PIRCE, F. J. (Ed.). **Soil management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p. 1-5.

LA SCALA JÚNIOR, N.; FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 72, n. 3, p. 775-785, 2012.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, p. 141-150, 2000.

MANNIGEL, A. R. et al. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho de cerrado cultivado com algodão sob diferentes preparos e adubações. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, Maringá, v. 2, n. 1, p. 41-54, jan./abr. 2009.

MARTINS, R. P. **Decomposição e mineralização de nutrientes de resíduos de plantas de cobertura em solo cultivado com cebola (*Allium cepa* L.)**. 2013. 69 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MEDEIROS, G. B.; CALEGARI, A. Sistema Plantio Direto com qualidade: a importância do uso de plantas de cobertura num planejamento cultural estratégico. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 102, p. 10-20, nov./dez. 2007.

MEDRADO, R. D. Decomposição de resíduos culturais e liberação de nitrogênio para a cultura do milho. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 12, n. 2, p. 97-107, mar./abr. 2011.

MELO, A. V. et al. Extração de nutrientes e produção de biomassa de aveia-preta cultivada em solo submetido a dezoito anos de adubação orgânica e mineral. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 2, p. 411-420, abr./jun. 2011.

MONTEIRO, A. C. G.; PONCIANO, N. J. Índice da qualidade do solo com cana-de-açúcar colhida crua e queimada. **Revista Científica Internacional**, v. 20, n. 1, p. 58-70, jan./mar. 2012.

NASCENTE, A. S.; LI, Y.; CRUSCIOL, C. A. C. Soil Aggregation, Organic Carbon Concentration, and Soil Bulk Density as Affected by Cover Crop Species in a No-Tillage System. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, maio/jun. 2015.

NUNES, U. R. et al. Covering crops straw production and common bean productivity in no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 943-948, 2006.

RODRIGUES, K. M. **Variabilidade espacial de atributos físicos, químicos e biológicos do solo e a produtividade da cana-de-açúcar**. 2014.199 p. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, 2014.

SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1075-1083, 2003.

SANTOS, A. C. et al. Gramíneas e leguminosas na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características químicas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 1063-1071, 2001.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, H. P.; TOMM, G. O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 477-486, 2003.

SCHLINDWEIN, J. A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto**. 2003. 169 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Tamanho da subamostra e representatividade da fertilidade do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 963-968, 2002.

SCHREINER, H. G. Associação de leguminosas com plantios florestais para cobertura e melhoramento do solo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, v. 1, n. 17, p. 1-12, 1988.

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

SILVA, R. F. et al. Fauna edáfica influenciada pelo uso de culturas e consórcios de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, p. 130-137, abr./jun. 2013.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

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

TEIXEIRA, M. B. et al. Decomposição e ciclagem de nutrientes dos resíduos de quatro plantas de cobertura do solo. **IDESIA**, Arica, v. 30, n. 1, jan./abr. 2012.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de resíduo vegetal por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 421-428, 2008.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 143p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (Eds). **Pedogenesis and Soil Taxonomy - I. Concepts and Interactions**. Amsterdam: Elsevier, p. 83-116, 1983.

ZANDONADI, D. B. et al. Ação da matéria orgânica e suas frações sobre a fisiologia de hortaliças. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 1, p. 14-20, jan./mar. 2014.

4 ARTIGO III – DETERMINAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE BIOINDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE CULTURAS DE INVERNO NO SUL DO BRASIL

4.1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi caracterizar espacialmente a ocorrência da fauna edáfica com ferramentas utilizadas pela agricultura de precisão (AP), correlacionando com fatores de solo e planta, visando identificar bioindicadores de qualidade ou estresse edáfico em diferentes sistemas de culturas de inverno sob sistema plantio direto (SPD), no sul do Brasil. No presente trabalho foram avaliados dez sistemas de culturas de inverno com cinco repetições por sistema, sendo: pousio invernal (PO), aveia preta (Ap), aveia branca (AB), azevém (AZ), nabo forrageiro (NF), ervilhaca (E), tremoço branco (TB) e consórcios de ApNFE, ApNF e ApE. Foram coletadas amostras para estimar a produção de matéria seca (MS) pelos sistemas, sendo a macrofauna coletada através do método TSBF adaptado (até 0,10 m), e avaliada através do peso da biomassa da fauna (BF), abundância e riqueza de ordens taxonômicas, além dos índices de Simpson (Is), Shannon (H) e Pielou (J). Ainda foram determinados teores da matéria orgânica do solo (MOS), P e K, e $\text{pH}_{\text{água}}$. Os dados foram submetidos a análise descritiva classificando conforme coeficiente de variação obtido, ao teste de normalidade Shapiro-Wilk, a análise de variância conforme delineamento inteiramente casualizado, sendo as médias agrupadas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) através do software ASSISTAT 7.7, além de correlação simples de Pearson. Para espacialização dos resultados, foi utilizado o software SURFER 11®. Os sistemas de culturas Ap, AZ e ApNF apresentaram melhor desempenho nos índices (Is, H e J) resultando em maior qualidade do solo, enquanto o PO promoveu a degradação do solo. A ordem Oligochaeta apresentou correlação com a riqueza, os índices e a produção de MS, podendo ser utilizado como bioindicador de qualidade do solo. A ordem Hymenoptera apresentou dominância associada a sistemas de pouca produção de resíduos vegetais e baixa riqueza de grupos, sendo considerado bioindicador de degradação do solo. A fauna edáfica foi pouco influenciada pelos atributos químicos do solo. As ferramentas de AP permitiram um melhor entendimento das variáveis que afetam a qualidade do solo, proporcionando maior conhecimento da ecologia e comportamento dos organismos.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade edáfica. Fauna do solo. Plantas de cobertura do solo. Planos de Manejo Inteligentes. Agricultura de Precisão.

4.2 ABSTRACT

This study aimed characterize spatially, the occurrence of soil fauna with tools used for precision agriculture (PA), correlated with soil and plant factors, to identify bioindicators of quality or stress of the soil in different winter management systems under no-tillage (SPD), in southern Brazil. In the present study we evaluated ten winter management systems with five repetitions per system, as follows: fallow (PO), wild oat (Ap), white oat (AB), ryegrass (AZ), forage turnip (NF) vetch (E), white lupine (TB) and consortiums ApNFE, ApNF and ApE. Samples were collected to estimate the production of dry matter (MS) by the systems, and the macrofauna collected through TSBF adapted method (until 0.10 m), and evaluated by the fauna biomass weight (BF), abundance and richness of taxonomic orders, besides index: Simpson (Is), Shannon (H) and Pielou (J). Still, were determined levels of soil organic matter (MOS), P, K, and pH water ($\text{pH}_{\text{água}}$). The variables were submitted to descriptive analysis, ranking according variation coefficient obtained, to normality Shapiro-Wilk test, analysis of variance according completely randomized design and the means grouped by the Scott-Knott test ($p < 0.05$), and correlation of Pearson with ASSISTAT 7.7 software. For spatialization of the results, we used the SURFER 11® software. Management systems Ap, AZ and ApNF performed better in the indices (Is, H and J) resulting in improved soil quality, while the PO promoted the degradation of soil. The Oligochaeta order correlated the orders richness, indexes, and the production of MS, and can be used as soil quality bioindicator. The Hymenoptera order presents dominance associated with systems of low MS yield and low groups richness, being considered bioindicator of soil degradation. The soil fauna was not affected by soil chemical attributes. AP tools have allowed a better understanding of the variables that affect soil quality, providing better understanding of the ecology and behavior of soil organisms.

KEYWORDS: Bioindicators. Soil quality. Cover crops. Intelligent Management Plans. Precision Agriculture.

4.3 INTRODUÇÃO

O solo é um ambiente ainda "pouco" conhecido, que abriga grande diversidade de organismos capazes de modificar suas características químicas, físicas e biológicas (GILLER et al., 1997; BARETTA et al., 2006). As características de um solo, bem como suas

qualidades são determinadas por vários fatores, destacando-se entre eles, especialmente, os organismos presentes (OLIVEIRA et al., 2009).

O manejo agrícola acarreta inúmeras modificações na composição e diversidade dos organismos do solo, em diferentes graus de intensidade, em função de mudanças de habitat, fornecimento de alimento, criação de microclimas e competição intra e interespecífica (ASSAD, 1997), apresentando ligações com a ciclagem de nutrientes, decomposição da matéria orgânica, melhoria da agregação do solo, porosidade, infiltração de água, e com o funcionamento biológico do solo (SANGINGA et al., 1992; ALBUQUERQUE et al., 2009). Sendo assim, a fauna edáfica é parte ativa e sensível às interferências no ambiente agrícola, ocasionadas pelo manejo do solo e das culturas (BARETTA et al., 2003).

O solo está intimamente relacionado com outro compartimento, a serrapilheira, e nos sistemas onde os solos apresentam baixa fertilidade natural, a matéria orgânica do solo (MOS) vinda deste resíduo natural, apresenta-se como principal fonte para o crescimento vegetal (CORREIA e OLIVEIRA, 2000), e os organismos que habitam o solo mostram sensibilidade às práticas de manejo desse substrato (NUNES et al., 2009; VICENTE et al., 2010). Estudos relatam que a macrofauna é fortemente afetada pela utilização do plantio convencional, devido a desestruturação física do solo e eliminação da serrapilheira em superfície, chegando a extinguir alguns grupos do sistema (WARDLE, 1995). A contraposto, o sistema plantio direto (SPD) favorece altas densidades de organismos fundamentais para a ciclagem de nutrientes e no controle biológico de pragas (ROBERTSON et al., 1994).

A fauna do solo pode ser beneficiada pelo aumento na qualidade e na quantidade de resíduos vegetais, que servem de alimento e abrigo para estes organismos, entretanto, sistemas de monoculturas, fornecem um único substrato orgânico, podendo provocar perdas na diversidade biológica do solo (BARETTA et al., 2003). Contudo, pouco se sabe ainda sobre o efeito de sistemas de culturas de inverno, ou consórcio de plantas de cobertura sobre a comunidade da fauna do solo (SILVA et al., 2013).

A comunidade de invertebrados do solo pode ser conservada quando o sistema de cultura tem uma estrutura ambiental similar ao sistema de origem (NUNES et al., 2012), de modo que, estes organismos, podem ser considerados como bioindicadores da qualidade do solo e do ambiente em questão (BARETTA et al., 2011). Assim, uma das maneiras de se avaliar o impacto de sistemas de culturas de inverno no funcionamento dos ecossistemas é por meio do monitoramento da abundância e diversidade de organismos do solo (SILVA et al., 2015).

A agricultura de precisão (AP) vem se destacando como uma forma de gerenciamento localizado da lavoura, realizada através da disponibilização de ferramentas que permitem a identificação da variabilidade dos atributos da lavoura e sua intervenção de forma localizada (MOLIN, 1998; MENEGATTI et al., 2005). Dentre as principais ferramentas utilizadas pela AP na identificação dos fatores que afetam o desenvolvimento das culturas, está a utilização de mapas temáticos de produtividade (SANA et al., 2014) e de atributos de solo.

No entanto, a AP tem estado focada basicamente na avaliação de atributos químicos e físicos do solo (CORASSA et al., 2012). Entretanto, quando tais fatores já apresentam valores dentro de limites preconizados pelas recomendações e comissões de pesquisa e as relações desses parâmetros com a produtividade das plantas não são encontradas, novos fatores devem ser identificados (VIANA, 2005). Neste sentido, surge a possibilidade de avaliação dos organismos edáficos, considerados bioindicadores de qualidade do solo (DORAN e ZEISS, 2000), ainda pouco pesquisados nas áreas com AP (CORASSA, 2012).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar espacialmente a ocorrência da fauna edáfica com ferramentas utilizadas pela AP, correlacionando-a com os fatores de solo e planta, visando identificar bioindicadores de qualidade ou estresse edáfico em diferentes sistemas de culturas de inverno sob SPD, no sul do Brasil.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

Local

O trabalho foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Santa Maria, campus do município de Frederico Westphalen, RS, localizada nas coordenadas 27°23'24.33" S e 53°25'39.58" O, com altitude de 483 m. O clima do local é subtropical de primavera úmida (STPU) com temperatura média anual de 18,1°C, e precipitação pluvial anual média de 1.919mm bem distribuídos ao longo do ano (MALUF, 2000). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS et al., 2013), com textura argilosa (660 g kg⁻¹) e relevo suave ondulado.

Coleta de dados

O presente trabalho avaliou dez sistemas de culturas de inverno, implantados pelo terceiro ano consecutivo, na primeira quinzena do mês de maio de cada ano, sendo: aveia

preta (*Avena strigosa* S. - Ap), aveia branca (*Avena sativa* L. - AB), azevém (*Lolium multiflorum* L. - AZ), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. - NF), ervilhaca (*Vicia sativa* L. - E), aveia preta + ervilhaca + nabo forrageiro (ApNFE), aveia preta + nabo forrageiro (ApNF), aveia preta + ervilhaca (ApE), tremoço branco (*Lupinus albus* L. - TB) e pousio invernal (vegetação espontânea - PO). O histórico de cultivos e as adubações na área experimental estão especificadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen, RS, 2014

Ano	Período	Cultura	Data de sementeira	Adubação (NPK)	Quantidade (kg ha ⁻¹)	Forma de aplicação
2012	Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	Calagem **	3500* **	Lanço/Incorporado **
	Verão	Feijão	2ª semana de outubro	09-25-15	300	Linha
				45-00-00	250	Lanço
		Milho safrinha	4ª semana de janeiro	09-25-15	350	Linha
				45-00-00	250	Lanço
2013	Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	**	**	**
	Verão	Feijão	2ª semana de outubro	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
2014	Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	**	**	**

(*) Calcário dolomítico PRNT 85%; (**) Sem Adubação (NPK).

Na primeira semana de setembro de 2014 foi coletada uma amostra das plantas por parcela, com quadro metálico de 0,5 x 0,5 m, sendo secas em estufa (65°C) até peso constante, de modo estimar o peso da matéria seca (MS) produzida por cada sistema de cultura de inverno.

A macrofauna do solo foi coletada na segunda semana de novembro, através do método proposto pela *Tropical Soil Biology and Fertility* (TSBF) (ANDERSON e INGRAM, 1993), de forma adaptada (0,25 x 0,25 x 0,10 m) (PIMENTEL et al., 2006; MENEZES et al., 2009; PINHEIRO et al., 2014), devido aos 10 cm serem representativos da biodiversidade do solo pela concentração da matéria orgânica (SCHIAVON et al., 2009). Foram amostrados cinco blocos de solo (TSBF) por sistema de cultura de inverno, ao centro dos 5 m de largura, distanciados igualmente em 4 m entre eles no comprimento da faixa, de modo que as coletas pudessem ser georreferenciadas através de coordenadas métricas. Juntamente com os blocos de solo, foi coletada a serrapilheira que havia sobre estes.

Todo o material foi acondicionado em sacos plásticos e encaminhado ao Laboratório para triagem manual, pesagem biomassa da fauna do solo (BF, g m⁻²), contagem, e identificação dos organismos ao nível de ordem segundo Gallo et al. (1988). A fauna do solo coletada dos blocos de solo, foram transformados para indivíduos m⁻² para facilitar a

interpretação dos dados. A partir disso, foram calculados os seguintes índices: índice de dominância de Simpson (Is), índice de diversidade de Shannon (H), e índice de uniformidade de Pielou (J), usando o software DivEs 3.0.

Concomitantemente a coleta de solo para a determinação da fauna, foram coletadas duas amostras de solo (0,00 - 0,10 m) em cada ponto de coleta do TSBF para determinação da matéria orgânica do solo (MOS), do pH_{água} (1:1) e dos teores extraíveis de P e K (Mehlich), conforme metodologias descritas em Tedesco et al. (1995) e recomendadas pela Comissão... (2004).

Tabela 2 – Valores dos atributos matéria orgânica do solo, pH_{água} e teores extraíveis de P e K no solo em dez sistemas de culturas de inverno na profundidade de 0,00 - 0,10 m. Frederico Westphalen, RS, 2014

Variáveis	Sistema de cultura de inverno ¹										Média
	Ap	AB	AZ	NF	E	ApNFE	ApNF	ApE	TB	PO	
MOS (g kg ⁻¹)	27,4	27,7	27,9	27,3	27,8	27,5	27,9	28,4	26,5	27,2	27,6
pH _{água}	6,2	6,1	6,6	6,8	6,9	6,8	7,0	7,1	6,9	7,0	6,6
P (mg dm ⁻³)	9,3	11,4	13,2	16,6	14,0	12,3	13,6	16,4	15,2	14,1	13,6
K (mg dm ⁻³)	225	240	194	204	241	239	216	273	196	202	223

⁽¹⁾ Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal.

Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise exploratória (estatística descritiva), objetivando verificar a posição e dispersão dos dados, e sendo verificada a existência de tendência central (normalidade) dos dados por meio do Teste Shapiro-Wilk (W) a $p < 0,05$ (SHAPIRO e WILK, 1965). Com base nos valores de coeficiente de variação (CV), a dispersão dos dados foi classificada em: baixa ($CV < 15\%$), moderada ($15\% < CV < 35\%$), e alta variabilidade ($CV > 35\%$) (WILDING e DREES, 1983).

A análise dos dados foi feita de acordo com o modelo experimental de delineamento inteiramente casualizado, submetidos a análise da variância e as médias comparadas pelo teste t de Scott-Knott ($p < 0,05$), conforme recomendação de Ferreira et al. (2012). Os atributos analisados foram ainda submetidos à correlação simples de Pearson e classificados como: fraca ($0,1 < r < 0,3$), moderada ($0,4 < r < 0,6$), forte ($r > 0,7$), e ideal ($r = 1$), conforme Dancy e Reidy (2006). Para as análises dos dados foi utilizado o programa estatístico ASSISTAT 7.7. Para a espacialização dos resultados, foram gerados mapas temáticos das variáveis analisadas utilizando-se o software SURFER 11®.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise descritiva exploratória dos atributos biológicos e químicos do solo, bem como da produção de matéria seca (MS) dos sistemas de culturas de inverno são apresentados na Tabela 3. Os resultados demonstraram que apenas a produção de MS dos sistemas de culturas, a MOS e os teores de K apresentaram normalidade nos dados (teste Shapiro-Wilk), além de alta, baixa e média variabilidade dos dados, respectivamente.

Tabela 3 – Estatística descritiva e dos atributos biológicos e químicos do solo, e produção de matéria seca da área experimental. Frederico Westphalen, RS, 2014

Variável ⁽²⁾	Parâmetros Estatísticos ⁽¹⁾							Teste W ⁽³⁾
	Valores			DP	Coeficientes			
	Mínimo	Média	Máximo		CV	Cs	Ck	
Hymenoptera	32	478,4	5696	923,8	193,10	4,42	22,19	0,46*
Oligochaeta	0	53,8	176	49,6	92,32	0,72	-0,50	0,90*
Diplopoda	0	47,0	416	66,7	141,90	3,76	18,86	0,62*
Coleoptera	0	25,0	128	27,8	111,53	1,42	2,53	0,83*
Chilopoda	0	18,6	80	19,8	106,45	1,31	1,47	0,81*
Araneae	0	9,0	48	13,4	149,45	1,43	1,31	0,70*
Isoptera	0	8,0	336	47,5	594,19	6,98	49,10	0,16*
Orthoptera	0	3,2	112	16,2	505,08	6,51	44,20	0,20*
Dermaptera	0	1,9	32	6,2	321,21	3,45	12,38	0,35*
Hemiptera	0	0,6	16	3,2	494,87	4,84	22,33	0,20*
Isopoda	0	1,0	32	5,0	522,72	5,60	32,44	0,19*
Abundância	80	647,4	5744	903,3	139,53	4,37	22,09	0,50*
Riqueza	2	4,6	8	1,5	33,79	0,27	-0,30	0,95*
BF (g m ⁻²)	3,8	34,4	128,3	27,7	80,60	1,35	1,60	0,83*
Índ. Simpson (Is)	0,06	0,45	0,97	0,27	59,24	0,83	-0,75	0,85*
Índ. Shannon (H)	0,04	1,03	1,89	0,51	49,05	-0,70	-0,72	0,90*
Unif. Pielou (J)	0,08	0,67	0,99	0,27	40,65	-0,91	-0,39	0,87*
MS (Mg ha ⁻¹)	0,73	4,85	8,76	2,06	42,50	0,05	-0,57	0,98 ^{ns}
MOS (g kg ⁻¹)	23,7	27,6	31,5	1,7	6,15	-0,11	0,20	0,98 ^{ns}
pH _{água}	5,84	6,76	7,26	0,36	5,36	-0,79	-0,10	0,92*
P (mg dm ⁻³)	6,2	13,6	27,3	4,8	34,97	0,96	1,02	0,94*
K (mg dm ⁻³)	117	223	347	54	24,36	0,20	-0,32	0,99 ^{ns}

⁽¹⁾ Onde: DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação (%); Cs= coeficiente de assimetria; Ck= coeficiente de curtose. ⁽²⁾ MOS= matéria orgânica do solo; BF= peso da biomassa da fauna edáfica; MS= peso da matéria seca produzida pelos sistemas de culturas de inverno. ⁽³⁾ Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (*) significativo em níveis de $p < 0,05$ e (^{ns}) não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

Com base na amplitude dos dados, a abundância de indivíduos m⁻² apresentou valor mínimo de 80 e máximo de 5.744. Dentre as principais ordens taxonômicas, a Hymenoptera

variou entre 32 e 5.696 indivíduos m^{-2} , sendo a única com ocorrência em todos os blocos de solo coletados. Já a ordem Oligochaeta apresentou variação de 0 a 416 indivíduos m^{-2} , a Diplopoda de 0 a 416 indivíduos m^{-2} , a Coleoptera de 0 a 128 indivíduos m^{-2} e a Chilopoda de 0 a 80 indivíduos m^{-2} , sendo as ordens citadas, as de maior representatividade na área experimental, correspondendo a 96,34 % dos indivíduos coletados (Tabela 4).

Tabela 4 – Frequência relativa de ocorrência total e por ordem da fauna do solo em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014

Ordem taxonômica	Sistema de cultura de inverno										Frequência por ordem
	Ap	AB	AZ	NF	E	ApNFE	ApNF	ApE	TB	PO	
Hymenoptera	3,61	3,46	2,08	4,70	6,13	3,46	5,04	2,42	4,65	38,16	73,70
Oligochaeta	1,48	0,35	0,89	0,84	0,35	1,29	0,84	1,14	0,89	0,35	8,40
Diplopoda	0,64	0,30	0,94	2,08	0,15	1,04	0,79	0,94	0,35	0,05	7,27
Coleoptera	0,94	0,40	0,64	0,05	0,20	0,40	0,15	0,35	0,54	0,30	3,95
Chilopoda	0,30	0,10	0,25	0,54	0,20	0,40	0,40	0,49	0,20	0,15	3,02
Araneae	0,49	0,10	0,20	0,10	0,10	0,05	0,20	0,05	0,05	0,05	1,38
Isoptera	0	1,09	0,05	0	0	0,05	0	0	0,05	0	1,24
Orthoptera	0	0,05	0,05	0,05	0	0	0,35	0	0	0	0,49
Dermaptera	0,05	0	0,15	0	0	0	0	0	0,10	0	0,30
Isopoda	0	0	0	0,10	0	0	0,05	0	0	0	0,15
Hemiptera	0,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10

⁽¹⁾ Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal.

De modo geral, os organismos coletados apresentaram alta variabilidade de ocorrência, com CV > que 92 % em todas as ordens, com a presença de espécies em um determinado sistema de cultura e não em outro, havendo inclusive a não ocorrência de indivíduos (valores = 0) em muitos dos blocos coletados. Foi identificada a não normalidade dos dados e a tendência de médias menores que a moda e a mediana (assimetria negativa), sendo a ocorrência de dados fortemente associados a moda (platicúrticas).

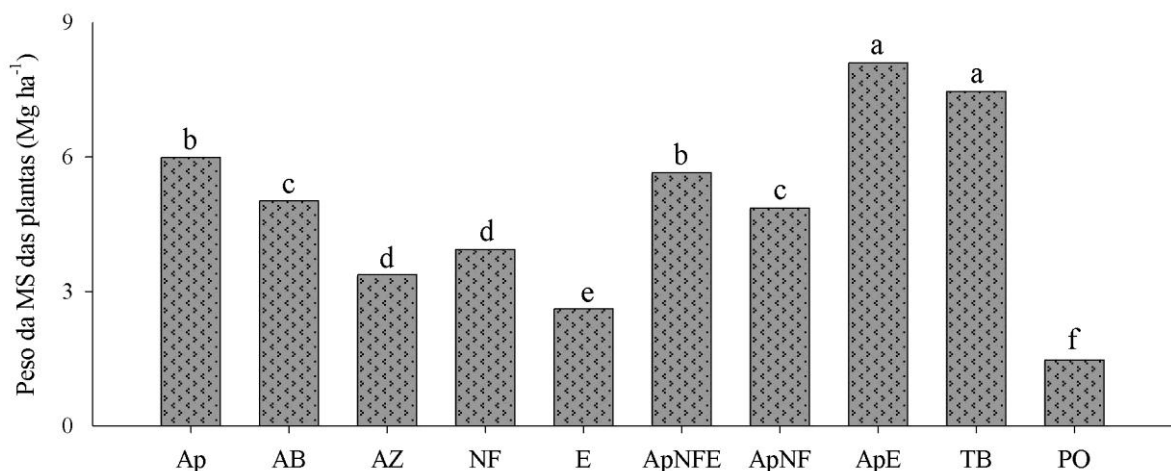
A riqueza de organismos apresentou média variabilidade e variação entre 2 e 8 ordens distintas por bloco de solo coletado, enquanto que o peso da BF apresentou alta dispersão dos dados (alto CV), devido a forte correlação desta variável com a ocorrência da ordem Oligochaeta ($r = 0,85$) (Tabela 5), mesmo tendo esta representado apenas 8,4 % dos organismos coletados, e apresentado alta variabilidade. A BF apresentou variação de 3,8 a 128,3 g m^{-2} . Os dados apresentados pela BF devem ser destacados já que indicam que a fauna

do solo, na camada superficial do solo (0 - 10 m), com uso correto de sistemas de culturas de inverno, pode alcançar valores de até 1,28 Mg ha⁻¹ de organismos.

Os índices de dominância de Simpson (Is) e de diversidade de Shannon (H) apresentaram variação entre 0,06 a 0,97 e 0,04 e 1,89, respectivamente, enquanto que, o índice de uniformidade de Pielou (J) variou de 0,08 a 0,99, apresentando no mínimo CV = 40%, sendo, portanto, de alta variabilidade na área, assim como o observado por Corassa et al. (2012).

Os valores da produção de MS das plantas cultivadas nos tratamentos analisados variaram de 0,73 a 8,76 Mg ha⁻¹, observados justamente nos sistemas de menor e maior produção (PO e ApE, com 1,47 e 8,10 Mg ha⁻¹, respectivamente), o que pode ser observado nas Figuras 1 e 2. Chavaut et al. (2003) e Corassa (2012), salientam que a abundância das ordens de organismos edáficos pode ser influenciada pela quantidade e qualidade do material vegetal presente, corroborando com o presente trabalho, visto que 73,70 % dos organismos coletados foram da ordem Hymenoptera, sendo mais da metade destes encontrados no PO, sistema de menor produção de resíduos, fazendo com que houvesse correlação negativa moderada entre a produção de MS e ocorrência desta ordem ($r = -0,36$), indicando que a falta de palhada proporciona maior abundância destes organismos.

Figura 1 – Produção de matéria seca em dez sistemas de culturas de inverno no terceiro ano de cultivo. Frederico Westphalen, RS, 2014



* Sistemas de culturas de inverno, sendo: Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremço branco; PO = pousio invernal. Valores seguidos pela mesma letra minúscula não diferem significativamente pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Além disso, a presença destes organismos indicou menor diversidade de organismos, visto que houve correlações moderadas a fortes desta com os índices avaliados (Is, H e J),

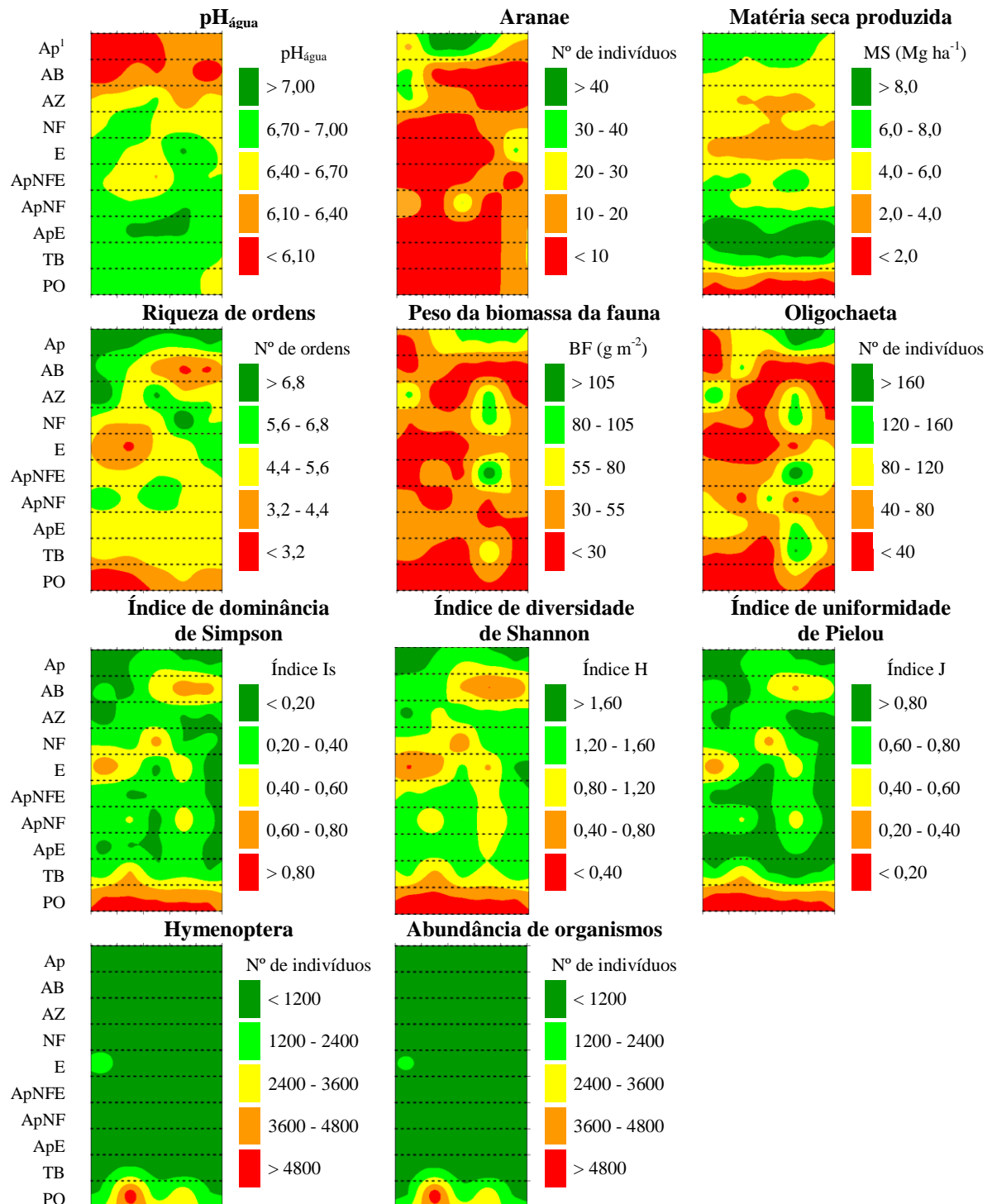
obtendo ainda valores de $r = 0,99$ e $r = -0,33$ para a abundância e riqueza, respectivamente, fato que é visível nas Figuras 2 e 3. Rocha et al. (2015) afirmam que a ocorrência desta ordem pode indicar degradação ambiental das áreas e, segundo Santos et al. (2006), pode servir como bioindicador de estresse do solo, podendo se associar a presença destes organismos a áreas com menor produção de MS, além de menor qualidade do solo.

Alguns trabalhos destacam a importância do uso de bioindicadores como parâmetros na tomada de decisão para políticas agrícolas e ambientais que busquem através do monitoramento de práticas sustentáveis, um melhor funcionamento dos agroecossistemas, determinando quais mecanismos são necessários para manter sua composição, estrutura e funcionalidade (BROUWER e CRABTREE, 1999; BARBIERI, 2009), garantindo assim a sustentabilidade dos sistemas de culturas utilizados.

Os atributos químicos do solo apresentaram entre baixa e média variabilidade (Tabela 3), sendo baixa para MOS e $\text{pH}_{\text{água}}$, e média nos teores de P e K extraíveis no solo. Pode-se notar que a área experimental apresenta de $\text{pH}_{\text{água}}$ alto (6,76 de média), teores médios de MOS ($27,6 \text{ g kg}^{-1}$), e teores muito altos de P e K no solo ($13,6$ e 223 mg dm^{-3} , respectivamente), não restringindo o desenvolvimento normal das plantas cultivadas sob SPD (FIORIN, 2007). A única ordem que apresentou interferência dos fatores químicos do solo foi a Aranae, com moderada correlação negativa com o $\text{pH}_{\text{água}}$ ($r = -0,40$), sendo observada em maior número nos sistemas de gramíneas solteiras, que por sua vez possuem menores valores de $\text{pH}_{\text{água}}$, mostrando que em áreas que já apresentam os atributos de fertilidade química dentro dos padrões, a variação biológica continua ocorrendo (VIANA et al., 2005), necessitando-se identificar novos fatores (CORASSA, 2012).

Assim como a ordem Hymenoptera, a Oligochaeta apresentou interferência da produção de MS dos sistemas, com fraca-moderada correlação positiva ($r = 0,38$) com esta (Tabela 5), possuindo maior abundância nos sistemas Ap, TB, ApNFE e ApE, e menor no sistema PO, tratamentos de maior e menor produção de MS, com 5,99; 7,46; 5,65; 8,10 e 1,47 Mg ha^{-1} , respectivamente. Rovedder et al. (2004) salienta ainda, que em SPD esta variação pode estar indicando um material orgânico em decomposição mais heterogêneo e diversificado, atendendo as exigências nutricionais de um espectro mais amplo de organismos, explicando o maior índice de uniformidade (J) obtido nos consórcios, além de Ap e TB (Figura 3).

Figura 2 – Distribuição espacial dos atributos químicos e biológicos do solo, e produção de matéria seca das plantas em sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014



(1) Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal.

Destaca-se ainda que a ordem Oligochaeta explicou fortemente a BF na área experimental ($r = 0,85$) (Tabela 5), visto que nos três sistemas de menor peso da fauna do

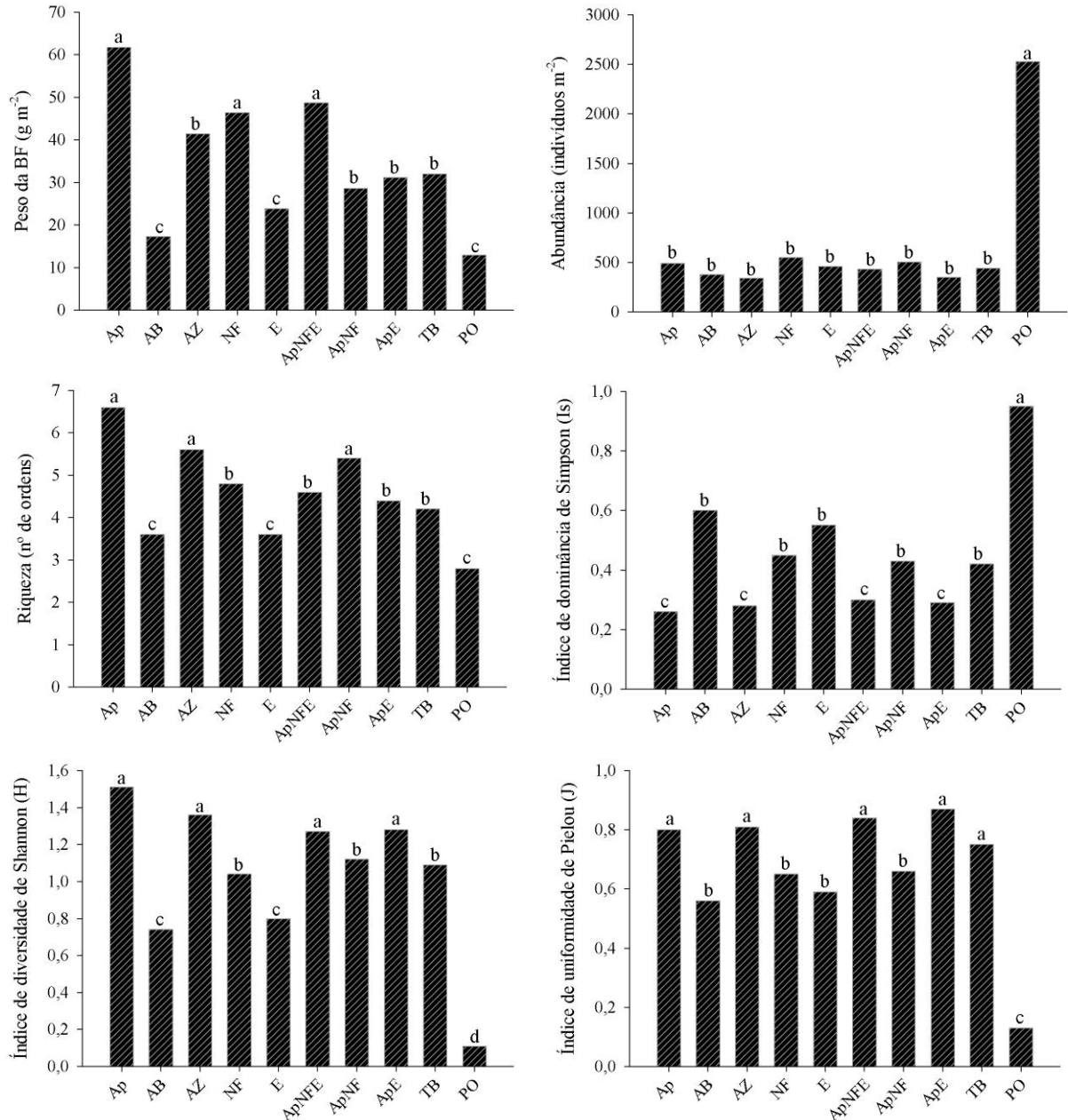
solo, composto por AB, E e PO, com 17,3; 23,8 e 12,9 g m⁻² (Figura 3), foram justamente os de menores observações deste grupo (Tabela 4), evidenciando a importância desta ordem. Sendo assim, este grupo pode ser considerado como um bioindicador de qualidade e quantidade de resíduos orgânicos em superfície (0,00 - 0,10 m), podendo chegar a mais de uma tonelada de biomassa por hectare (Figura 2), se atendidas as exigências deste grupo, que normalmente compreendem de 40 a 90% a biomassa da macrofauna edáfica (FRAGOSO et al., 1999; ANDRÉA, 2010).

A ordem Oligochaeta ainda apresentou correlações moderadas com a riqueza e os índices de diversidade e uniformidade avaliados (Is, H e J), com sua presença indicando ambiente de maior diversidade de organismos e, portanto, maior qualidade do solo. Segundo vários autores, as minhocas estão entre os organismos edáficos de maior importância por participarem de processos críticos para a manutenção da fertilidade e qualidade dos solos, agindo na decomposição da MOS e resíduos vegetais, na dinâmica de mineralização de nutrientes, e formando estruturas biogênicas (coprólitos) constituídas de agregados altamente estáveis, garantindo boa porosidade conferindo ao solo maior resiliência e, assim, resistindo mais a degradação (LAVELLE et al., 2001; BLANCHART et al., 2004; BROWN e DOMÍNGUEZ, 2010).

A riqueza de ordens se apresentou moderadamente correlacionada com as ordens Oligochaeta e Aranae ($r = 0,54$ e $0,67$, respectivamente), além da correlação negativa com Hymenoptera, como destacado acima, explicando os resultados encontrados em Ap, AZ e ApNF, visto que as duas primeiras ordens ocorreram em grande número nestes sistemas, enquanto apresentou baixo número de Hymenoptera. Com base nos índices avaliados, pode-se afirmar que os sistemas de maior diversidade e qualidade edáfica, foram as gramíneas Ap e AZ, e os consórcios ApNF e ApE, enquanto os de maior dominância e menor equitabilidade, foram PO, seguido de AB e E.

Segundo Correia (2002) e Nunes et al. (2009), a sensibilidade dos organismos do solo aos diferentes sistemas de culturas refletem claramente o quanto uma prática pode ser considerada conservativa do ponto de vista da estrutura e fertilidade do solo, indicando o sucesso na construção da qualidade do solo nos sistemas Ap, AZ e ApNF, e degradação do sistema solo, principalmente no sistema pousio invernal (PO), indicando que além da baixa produção de resíduos culturais, este sistema não é sustentável ao longo do tempo.

Figura 3 – Peso da biomassa da fauna do solo, abundância de indivíduos, riqueza de ordens, e índices de dominância de Simpson, diversidade de Shannon e de uniformidade de Pielou em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014



(1) Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremço branco; PO = pousio invernal. Valores seguidos pela mesma letra minúscula não diferem significativamente pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Apesar da complexidade dos resultados apresentados na Tabela 5, pode-se destacar três fatores que isoladamente conseguiriam explicar os dados obtidos: a ocorrência das ordens Oligochaeta, indicadora de qualidade do solo; ocorrência da ordem Hymenoptera, indicadora de estresse edáfico e falta de qualidade do solo; e, produção de MS pelos sistemas de culturas

de inverno observados, tendo em vista as correlações obtidas entre estas variáveis, além dos índices Is, H e J, e da abundância e riqueza de organismos.

Além disso, pode-se observar que as ferramentas de agricultura de precisão, seja no manejo da área, coleta georreferenciada e na espacialização dos dados através de mapas temáticos, propicia melhor conhecimento da ecologia e comportamento da fauna edáfica, fornecendo um instrumento valioso na interpretação dos resultados, permitindo, por muitas vezes, se observar correlações entre as ocorrências de organismos e o que é visualizado na área experimental, através da confecção dos mapas temáticos.

Tabela 5 – Matriz de correlação simples de Pearson entre os atributos químicos do solo analisados em dez sistemas de culturas de inverno, Frederico Westphalen, RS, 2014

Atributos ¹	MS	MOS	pH _{água}	P	K	BF	Abun.	Riq.	Is	H	J	HYM	OLI	ARA
MS	1	-0,04 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,21 ^{ns}	-0,33**	0,22 ^{ns}	-0,49**	0,48**	0,55**	-0,40**	0,38**	0,06 ^{ns}
MOS		1	0,04 ^{ns}	0,37**	0,42**	-0,12 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,08 ^{ns}
pH _{água}			1	0,31*	-0,02 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,24 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,40**
P				1	0,25 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,17 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,28*
K					1	-0,05 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,19 ^{ns}
BF						1	-0,33*	0,50**	-0,37**	0,42**	0,36**	-0,16 ^{ns}	0,85**	0,39**
Abun.							1	-0,23 ^{ns}	0,55**	-0,52**	-0,62**	0,99**	-0,05 ^{ns}	-0,09 ^{ns}
Riq.								1	-0,63**	0,75**	0,48**	-0,33*	0,54**	0,67**
Is									1	-0,98**	-0,81**	0,61**	-0,46**	-0,35*
H										1	0,92**	-0,59**	0,50**	0,45**
J											1	-0,67**	0,44**	0,22 ^{ns}
HYM												1	-0,13 ^{ns}	-0,16 ^{ns}
OLI													1	0,37**
ARA														1

Significativo *($p \leq 0,05$) e **($p \leq 0,01$); ^(ns) não significativo. ⁽¹⁾ MS= peso da matéria seca produzida pelos sistemas de culturas de inverno; MOS= matéria orgânica do solo; BF= peso biomassa da fauna edáfica; Abun.= abundância de organismos; Riq.= riqueza de ordens; HYM= Hymenoptera; OLI= Oligochaeta; ARA= Aranea.

Da mesma forma, em estudo pioneiro sobre a espacialização dos dados biológicos do solo, Corassa (2012) afirma que a elaboração de mapas temáticos a partir da coleta georreferenciada é uma importante ferramenta para o entendimento da variabilidade espacial da fauna edáfica em SPD, além de permitir o cruzamento dos dados com outras variáveis. Sendo assim, o conhecimento da ecologia e do comportamento dos organismos do solo cria novas perspectivas de que é possível superar o gargalo encontrado pela AP, visto que a fertilidade do solo ou as variáveis físicas, por si só, não conseguem explicar as baixas produtividades encontradas em algumas áreas agrícolas, tornando-se uma ferramenta

essencial na compreensão da complexidade do sistema solo, com importante contribuição para os estudos de manejo sítio específico das culturas e do solo.

4.6 CONCLUSÕES

Os sistemas de culturas de inverno Ap, AZ, e ApNF apresentaram os maiores índices de diversidade (H) e uniformidade (J), além de menor índice de dominância (Is), sendo sistemas de melhor qualidade do solo, enquanto o sistema PO, apresentou maior abundância, menor riqueza e pior desempenho nos índices, indicando ser um sistema em que há degradação da qualidade do solo.

A ordem Hymenoptera evidenciou correlações negativas com a diversidade dos sistemas de culturas do solo, além de apresentar forte dominância na área experimental associada a locais com pouca produção de matéria seca e baixa riqueza de ordens, sendo considerada, neste trabalho, como bioindicador da degradação do solo.

A ordem Oligochaeta apresentou interferência dos resíduos vegetais produzidos pelos sistemas, com as maiores populações encontradas nos sistemas com maior produção de MS, além de correlações com a riqueza e índices de diversidade, apresentando mais de 80% da biomassa total da fauna coletada, podendo este ser utilizada como bioindicador de qualidade do solo.

Os atributos químicos do solo (MOS, $\text{pH}_{\text{água}}$, P e K) apresentaram pouca influência direta nos atributos biológicos, sendo a espacialização da fauna do solo independentemente dos resultados destes atributos.

As ferramentas de agricultura de precisão (coleta georreferenciada e elaboração dos mapas temáticos) fornecem um instrumento de grande importância no melhor entendimento das variáveis que afetam e são afetadas pela qualidade do solo, além de propiciar melhor conhecimento da ecologia e comportamento dos organismos do solo.

4.7 AGRADECIMENTOS

Aos colegas de mestrado Patrícia, André, Douglas e Marlo pelo auxílio no planejamento, coletas e triagem manual das amostras de solo. A disciplina de mestrado AGR814 - Manejo Georreferenciado do Ambiente Solo e das Culturas, e seu docente e também meu orientador Prof. Dr. Antônio Luis Santi, pelo incentivo e fornecimento das

ferramentas básicas para execução do trabalho. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

4.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, M. P. et al. Fauna edáfica em sistema de plantio homogêneo, sistema agroflorestal e em mata nativa em dois municípios do Rio Grande do Sul, Brasil. **BIOCIÊNCIAS**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 59-66, dez. 2009.

ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. Soil fauna. In: **Tropical soil biological and fertility: A Handbook of methods**. 2. ed. Wallingford: C. A. B. International, p. 44-46, 1993.

ANDRÉA, M. M. O uso de minhocas como bioindicadores de contaminação de solos. **Acta Zoológica Mexicana**, v. 2, p. 95-107, 2010.

ASSAD, M. L. L. Fauna do solo. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M., (Ed.). **Biologia dos solos dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1997. p. 363-443.

BARBIERI, R. F. **Monitoramento da qualidade ambiental de áreas citrícolas utilizando formigas (Hymenoptera: Formicidae) como bioindicadores**. 2009. 119 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2009.

BARETTA, D. et al. Fauna edáfica avaliada por armadilhas de catação manual afetada pelo manejo do solo na região oeste catarinense. **Revista de Ciência Agroveterinárias**, Lages, v. 2, n. 2, p. 97-106, 2003.

BARETTA, D. et al. Efeito do cultivo do solo sobre a diversidade da fauna edáfica no planalto sul catarinense. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, n. 2, p. 108-117, 2006.

BARETTA, D. et al. Fauna edáfica e qualidade do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7, 403 p. 119-170.

BLANCHART, E. et al. 2004. Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion: a review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, p. 303-315, 2004.

BROUWER, F.; CRABTREE, B. **Environmental indicators and agricultural policy**. Wallingford: CABI Publishing, 1991. 305 p.

BROWN, G. G.; DOMÍNGUEZ, J. Uso das minhocas como bioindicadoras ambientais: princípios e práticas – o 3º encontro latino americano de ecologia e taxonomia de oligoquetas (elaetao3). **Zoológica Mexicana**, v. 2, p. 1-18, 2010.

CHAUVAT, M.; ZAITSEV, A. S.; WOLTERS, V. Successional changes of Collembola and soil microbiota during forest rotation. **Oecologia**, v. 137, n. 2, p. 269-276, 2003.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

CORASSA, G. M. **Técnicas de Agricultura de Precisão aplicadas à avaliação da distribuição espacial da fauna edáfica em Sistema Plantio Direto**. 2012. 45 p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria. Frederico Westphalen, 2012.

CORREIA, M. E. F.; OLIVEIRA, L. C. M. **Fauna de solo: aspectos gerais e metodológicos**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia. 2000. 46 p. (Documentos, n. 112)

CORREIA, M. E. F. **Potencial de utilização dos atributos das comunidades da fauna do solo e de grupos chaves de invertebrados como bioindicadores do manejo de ecossistemas**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia. 2002. 23 p. (Documentos, n. 157).

DANCEY C. P.; REIDY J. **Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 608 p.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, n. 15, p. 3-11, 2000.

FERREIRA, D. F.; FILHO, A. C.; LÚCIO, A. D. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrições na casualização. **Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 16-19, set./dez. 2012.

FIORIN, J. E. **Manejo e Fertilidade do Solo no Sistema Plantio Direto**. Passo Fundo: Berthier, 2007. 184 p.

FRAGOSO, C. P. et al. Earthworm communities of tropical agroecosystems: origin, structure and influence of management practices. In: LAVELLE, P.; BRUSSAARD, L.; HENDRIX, P. F. (Eds.). **Earthworm management in tropical agroecosystems**. Wallingford: CABI Publishing, 1991. p. 27-55.

GALLO, D. et al. **Manual de entomologia agrícola**. 1. ed. São Paulo: Ceres, 1988. 649p.

GILLER, K. E. et al. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. **Applied Soil Ecology**, v. 6, n. 1, p. 3-16, 1997.

LAVELLE, P. et al. SOM management in the tropics: why feeding the soil macrofauna? **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, p. 53-61, 2001.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, p. 141-150, 2000.

MENEGATTI, L. A. A. et al. Estudo de caso sobre investimento agrícola: oportunidades com agricultura de precisão. **ALCOOLbrás**, São Paulo, v. 95, p. 78-85. ago. 2005.

MENEZES, C. E. G. et al. Macrofauna edáfica em estádios sucessionais de floresta estacional semidecidual e pastagem mista em Pinheiral (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, nov./dez. 2009.

MOLIN, J. P. Utilização de GPS em agricultura de precisão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 3, p. 121-132, mar. 1998.

NUNES, L. A. P. L. et al. Diversidade da fauna edáfica em solos submetidos a diferentes sistemas de manejo no semi-árido nordestino. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, p. 43-49, 2009.

NUNES, L. A. P. L.; ARAÚJO FILHO, J. A.; MENEZES, R. Í. Q. Diversidade da fauna edáfica em solos submetidos a diferentes sistemas de manejo no semi-árido nordestino. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, n. 1, p. 43-49, 2009.

NUNES, L. A. P. L. et al. Caracterização da fauna edáfica em sistemas de manejo para produção de forragens no Estado do Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 1, p. 30-37, 2012.

OLIVEIRA, E. M.; SANTOS, M. J.; SOUTO, J. S. Fauna do solo em três ambientes no município de Lagoa Seca-PB. **Agropecuária Técnica**, João Pessoa, v. 30, n. 1, p. 33-36, 2009.

PIMENTEL, M. S. et al. Atributos biológicos do solo sob manejo orgânico de cafeeiro, pastagem e floresta em região do Médio Paraíba fluminense-RJ. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 85-93, jul./dez. 2006.

PINHEIRO, F. J. et al. Caracterização da macrofauna edáfica na interface solo-serapilheira em uma área de Caatinga do Nordeste brasileiro. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 19, p. 2964-2974, 2014.

ROBERTSON, L. N.; KETTLE, B. A.; SIMPSON, G. B. The influence of tillage practices on soil macrofauna in a semi-arid agroecosystem in northeastern Australia. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 48, p. 149-156, 1994.

ROCHA, W. E. et al. Formigas (Hymenoptera: Formicidae) Bioindicadoras de Degradação Ambiental em Poxoréu, Mato Grosso, Brasil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 22, n. 1, p. 88-98, jan./mar. 2015.

ROVEDDER, A. P. et al. Fauna edáfica em solo suscetível à arenização na região sudoeste do rio grande do sul. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 3, n. 2, p. 87-96, 2004.

SANA, R. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 10, p. 994-1002, 2014.

SANGINGA, N.; MULONGOY, K.; SWIFT, M. J. Contribution of soil organisms to the sustainability and productivity cropping systems in the tropics. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 41, p. 135-152, 1992.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, M. S. et al. Riqueza de formigas (Hymenoptera, Formicidae) da serrapilheira em fragmentos de floresta semidecídua da Mata Atlântica na região do Alto do Rio Grande, MG, Brasil. **Iheringia, Série Zoologia**, Porto Alegre, v. 96, n. 1, p. 95-101, mar. 2006.

SCHIAVON, G. A. et al. **Biodiversidade de minhocas do solo na Estação Experimental Cascata, Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. 15 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 112).

SILVA, D. A. A. et al. Bioindicadores de qualidade edáfica em diferentes usos do solo. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11 n. 22, p. 3728-3736, 2015.

SILVA, R. F. et al. Fauna edáfica influenciada pelo uso de culturas e consórcios de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, p. 130-137, abr./jun. 2013.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

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

VIANA, J. H. M. **Distribuição espacial de atributos físico-químicos, mineralógicos e micromorfológicos de Latossolos visando o mapeamento de áreas produtivas**. 2005. 194 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

VICENTE, N. M. F. et al. Fauna Edáfica Auxiliando a Recuperação de Áreas Degradadas do Córrego Brejaúba, MG. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 104-110, jul./dez. 2010.

WARDLE, D. A. Impacts of disturbance on detritus food webs in agro-ecosystems of contrasting tillage and weed management practices. **Advances in Ecological Research**, London, v. 26, p. 105-182, 1995.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (Eds.). **Pedogenesis and Soil Taxonomy** - I. Concepts and Interactions. Amsterdam: Elsevier, p. 83-116, 1983.

5 ARTIGO IV – USO DE ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO NA DEFINIÇÃO DE PLANOS DE MANEJO INTELIGENTES EM ÁREA MANEJADA COM AGRICULTURA DE PRECISÃO

5.1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade do solo em sistemas de manejo de inverno por meio de um modelo matemático que expressa o Índice de Qualidade do Solo (IQS), considerando atributos físicos, químicos e biológicos do solo, em área manejada sob sistema plantio direto (SPD) com ferramentas de agricultura de precisão, no sul do Brasil. O trabalho avaliou dez sistemas de culturas de inverno - pousio invernal (PO), aveia preta (Ap), aveia branca (AB), azevém (AZ), nabo forrageiro (NF), ervilhaca (E), tremoço branco (TB) e consórcios de ApNFE, ApNF e ApE - com amostras coletadas nos pontos de cruzamento de uma malha de 5 x 2,5 m, totalizando 100 pontos de amostragem, de modo que houvesse dez pontos amostrais por sistema de cultura de inverno. Para a determinação do IQS, utilizou-se o método proposto por Andrews et al. (2002a), com amostras de solo coletados de 0,00 - 0,10 m para avaliações de indicadores químicos, físicos e biológicos do solo, reunidas em quatro funções principais no solo: receber, armazenar e suprir água (RASA); promover o crescimento radicular (CRAD); suprimento de nutrientes (SN); e, promover a conservação do solo e a atividade biológica (CSBIO), com pesos iguais de modo a compor o IQS. Os resultados demonstraram que embora os indicadores químicos, físicos e biológicos sejam capazes de discriminar os sistemas de culturas de inverno, dificultam a escolha de um sistema em função do amplo espectro de variáveis existentes que apresentam diferentes comportamentos. Por sua vez, a análise conjunta dos indicadores formando um IQS se mostrou eficiente para avaliar a qualidade do solo sob diferentes sistemas de culturas de inverno, possuindo maiores valores em ApNFE, ApE e NF, proporcionando as melhores condições de CRAD e SN. Apesar do sistema PO ter apresentado ótimo SN, foi o de menor IQS observado, possuindo os piores valores de RASA, SN e CSBIO, degradando principalmente os atributos físicos e biológicos do solo. Os indicadores químicos da qualidade do solo mostraram-se mais sensíveis aos diferentes sistemas de culturas de inverno utilizados, seguido pelos biológicos e, por último, os físicos.

PALAVRAS-CHAVE: Indicadores de qualidade do solo. Sistemas de culturas de inverno. Plantas de cobertura do solo. Manejo do solo. Manejo sítio-específico.

5.2 ABSTRACT

This study aimed to evaluate the soil quality in winter management systems by means of a mathematical model that expresses the Soil Quality Index (IQS), considering physical, chemical and biological attributes, in managed area under no-tillage (SPD) with precision agriculture tools in southern Brazil. The study evaluated ten winter management systems: fallow (PO), wild oat (Ap), white oat (AB), ryegrass (AZ), forage turnip (NF) vetch (E), white lupine (TB) and consortiums ApNFE, ApNF and ApE - with samples collected at crossing points of a mesh of 5 x 2.5 m, totaling 100 sampling points, so that there were ten sampling points for winter management system. To determine the IQS was used the method proposed by Andrews et al. (2002a), with soil samples collected from 0.00 to 0.10 m for evaluations of chemical, physical and biological soil indicators, grouped into four main functions of the soil: receive, store and supply water (RASA); promote root growth (CRAD); nutrient supply (SN); and promote soil conservation and biological activity (CSBIO) with equal weights in order to compose the IQS. The results showed that although the chemical, physical and biological indicators be able to discriminate the winter management systems, make difficult the choice of a system due to the wide spectrum of existing variables that behave differently. In turn, the joint analysis of indicators forming a IQS was efficient to evaluate soil quality under different winter management systems, having higher values in ApNFE, ApE and NF, providing the best conditions for CRAD and SN. Although the PO system have shown great SN, it was the lowest observed IQS, possessing the worst values of RASA, SN and CSBIO, degrading mainly physical and biological attributes. Chemical indicators of soil quality were more sensitive to different winter management systems used, followed by biological and, finally, the physical.

KEYWORDS: Soil quality indicators. Sustainability. Winter management systems. Cover crops. Soil management. Site-specific management.

5.3 INTRODUÇÃO

A adoção do Sistema de Plantio Direto (SPD) no sul do Brasil tem proporcionado a conservação do solo, ao mesmo tempo em que suporta o aumento da produtividade das culturas (DALLA NORA et al., 2014), não havendo dúvidas em relação à revolução tecnológica, proporcionada por este sistema. Porém, com a expansão e modernização da

agricultura, tornou necessária a adoção de novas ferramentas e tecnologias, associadas ao manejo do solo e das culturas (BALSAN et al., 2006), como é o caso da agricultura de precisão, capazes de minimizar os efeitos resultantes da maior intensidade do uso das terras, visando altas produtividades (SANTI et al., 2015).

Para isso, se necessita um entendimento mais amplo em relação a multifuncionalidade dos sistemas envolvendo a cobertura do solo (SANTI et al., 2014), além da compreensão de que ferramentas inovadoras, por si só, não resolverão os problemas de manejo, necessitando a associação com outras técnicas de manejo visando uma menor variabilidade dos solos, que segundo Silva et al. (2008) é o principal componente relacionado à produção agropecuária. É nesse contexto, que um Plano de Manejo Inteligente (PMI) pode ser executado, planejando intervenções especializadas e localizadas, considerando as particularidades e gargalos existentes em cada talhão, priorizando estratégias multi-plantas e o uso racional da rotação de culturas.

No sul do Brasil, são comumente usadas coberturas de aveia preta ou nabo forrageiro, e embora seus benefícios sejam inegáveis, é necessário avaliar os efeitos sobre a qualidade do solo como um todo, sendo a integração das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, que o habilitam a exercer suas funções na plenitude (VEZZANI e MIELNICZUK, 2009). Alguns autores citam benefícios de plantas de cobertura de solo sobre a física (SILVEIRA JÚNIOR et al., 2012; NASCENTE et al., 2015), a química (BRESSAN et al., 2013; RAPHAEL et al., 2016) e a biologia do solo (NUNES et al., 2009; SILVA et al., 2013), todavia, escolher um sistema de cultura com base em benefícios isolados, pode ser um erro, visto a complexidade e a variabilidade destes sistemas (CONCEIÇÃO et al., 2005; FREITAS et al., 2012), não dando certeza sobre a sustentabilidade resultante destas práticas.

O desafio dos estudos sobre a sustentabilidade está relacionado ao desenvolvimento de métodos para avaliação da qualidade do solo e do ambiente agrícola sob interferência do homem (MELLONI et al., 2008) e, para isto, torna-se necessário caracterizar os processos e as propriedades do solo que afetam a sua capacidade produtiva (DORAN e PARKIN, 1994). Atualmente há um esforço conjunto e multidisciplinar tentando reunir e quantificar atributos que se relacionem com a qualidade do solo agrícola, permitindo avaliar os efeitos integrados dos fatores, expressando o mesmo por meio de índices (MELO FILHO et al., 2009; FREITAS et al., 2012; MAIA, 2013).

Pesquisas relacionadas à qualidade do solo são necessárias para fornecer informações de manejo e definição da melhor capacidade do uso do solo (OLIVEIRA et al., 2001), tendo interpretação de resultados facilitada mediante integração dos indicadores de qualidade dos

solos através de Índices de Qualidade do Solo (IQS), obtidos por meio de uma expressão ou modelo matemático que inclua todos os atributos do solo considerados (SANTOS et al., 2009).

No sul do Brasil, as intervenções extra produção de grãos costumam se limitar ao manejo durante o período de inverno, havendo a necessidade da avaliação de sistemas de culturas que funcionem na prática, visando obter maior qualidade dos solos agrícolas. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade do solo em sistemas de culturas de inverno, por meio de um modelo matemático que expressa o Índice de Qualidade do Solo (IQS), considerando atributos físicos, químicos e biológicos do solo, em área manejada sob SPD com ferramentas de agricultura de precisão, no sul do Brasil.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

Local

O estudo foi realizado em área experimental da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, campus do município de Frederico Westphalen, RS, localizada nas coordenadas 27°23'24.33" S e 53°25'39.58" O, com altitude de 483 m. O clima do local é subtropical de primavera úmida (STPU) com temperatura média anual de 18,1°C, e precipitação pluvial anual média de 1.919mm bem distribuídos ao longo do ano (MALUF, 2000). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS et al., 2013), com textura argilosa (660 g kg⁻¹) e relevo suave ondulado.

Amostragens e indicadores de qualidade do solo avaliados

O presente trabalho avaliou dez sistemas de culturas de inverno, implantados pelo terceiro ano consecutivo, na primeira quinzena do mês de maio de cada ano, sendo: aveia preta (*Avena strigosa* S. - Ap), aveia branca (*Avena sativa* L. - AB), azevém (*Lolium multiflorum* L. - AZ), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. - NF), ervilhaca (*Vicia sativa* L. - E), aveia preta + ervilhaca + nabo forrageiro (ApNFE), aveia preta + nabo forrageiro (ApNF), aveia preta + ervilhaca (ApE), tremoço branco (*Lupinus albus* L. - TB) e pousio invernal (vegetação espontânea - PO). O histórico de cultivos e as adubações na área experimental estão especificadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Histórico dos cultivos, práticas de adubação e correção realizadas na área experimental. Frederico Westphalen, RS, 2014

Ano	Período	Cultura	Data de semeadura	Adubação (NPK)	Quantidade (kg ha ⁻¹)	Forma de aplicação
2012	Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	Calagem **	3500* **	Lanço/Incorporado **
	Verão	Feijão	2ª semana de outubro	09-25-15	300	Linha
				45-00-00	250	Lanço
		Milho safrinha	4ª semana de janeiro	09-25-15	350	Linha
			45-00-00	250	Lanço	
2013	Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	**	**	**
	Verão	Feijão	2ª semana de outubro	09-25-15 45-00-00	300 250	Linha Lanço
2014	Inverno	Plantas de cobertura	1ª semana de maio	**	**	**

(*) Calcário dolomítico PRNT 85%; (**) Sem Adubação (NPK).

As amostras foram coletadas nos pontos de cruzamento de uma malha de 5 x 2,5 m, resultando em 100 pontos de amostragem para uma área total de 1.250 m², de modo que houvesse dez pontos amostrais por cada sistema de cultura de inverno avaliado (125 m² cada). Em cada ponto foram coletadas amostras indeformadas e deformadas nas profundidades de 0,00 - 0,05m e 0,05 - 0,10 m, para determinar indicadores químicos e físicos da qualidade do solo. A cada dois pontos amostrais por sistema, foi coletado um bloco de solo pelo método TSBF (*Tropical Soil Biology and Fertility*) (ANDERSON e INGRAM, 1993) de forma adaptada (0,25 x 0,25 x 0,10 m) (PIMENTEL et al., 2006; MENEZES et al., 2009; PINHEIRO et al., 2014), visando avaliar a macrofauna do solo (bioindicador da qualidade do solo), sendo segundo Schiavon et al. (2009) a camada representativa da biodiversidade do solo, visto a concentração da matéria orgânica em superfície, sendo coletada ainda a serrapilheira que havia sobre os blocos de solo coletados.

Os indicadores físicos do solo determinados foram: densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), e a porosidade total (Pt) do solo, através de anéis volumétricos (98 cm³). A estabilidade de agregados em água foi determinada pelo método proposto por Kemper e Chepil (1965), sendo calculados o diâmetro médio geométrico (DMG) e a porcentagem de agregados estáveis em cada classe (8,00 - 4,76; 4,76 - 2,00; 2,00 - 1,00; 1,00 - 0,21 e menor que 0,21 mm), calculados segundo as proposições da metodologia de Tisdall et al. (1978).

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada através de um penetrômetro digital marca Falker modelo penetroLOG PLG1020®, haste de 0,40 m, cone com diâmetro de 0,00794 m e ângulo de cone de 30°, em quatro diferentes épocas entre os meses de setembro e novembro de 2014 (época 1: 21/09/2014; época 2: 03/10/2014; época 3: 05/11/2014; e, época 4: 09/11/2014), com cinco repetições por ponto amostral em cada época, resultando em 20

leituras, sendo analisadas em conjunto de modo a obter maior consistência dos dados e precisão nos resultados. As análises foram efetuadas até 48 h após plena saturação do solo (em cada época), a fim de proceder as leituras próximas à capacidade de campo (PREVEDELLO, 1999; SANTOS et al., 2013), reduzindo significativamente e isolando os efeitos da coesão entre partículas de solo (BELTRAME et al., 1981; ARSHAD et al., 1996; NEIRO et al., 2003). Foi coletada uma amostra a cada 5 pontos amostrais a fim de determinar a umidade gravimétrica do solo, as quais ficaram entre 0,24 e 0,26 kg kg⁻¹ nas quatro avaliações, não apresentando diferenças entre sistemas de culturas.

Os indicadores químicos do solo determinados foram: teores de matéria orgânica do solo (MOS), pH_{água} (1:1), teores extraíveis de P e K (Mehlich⁻¹), Ca e Mg (KCl 1 mol L⁻¹), acidez trocável (Al) e potencial (H+Al), e calculados a relação Ca/Mg, capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m), todas conforme metodologias descritas em Tedesco et al. (1995) e recomendadas pela Comissão... (2004).

Os blocos de solo (TSBF) foram triados manualmente em Laboratório, sendo efetuadas a pesagem da fauna do solo (BF, g m⁻²), a contagem e a identificação dos organismos ao nível de ordem segundo Gallo et al. (1988), sendo a fauna estimada por m⁻², visando facilitar a interpretação dos dados. A partir disso, foram calculados os seguintes índices: índice de dominância de Simpson (Is), índice de diversidade de Shannon (H), e índice de uniformidade de Pielou (J), usando o software DivEs 3.0.

Índice de qualidade do solo (IQS)

O índice de qualidade do solo (IQS) foi determinado segundo o método aditivo ponderado (ANDREWS et al., 2002a; MUKHERJEE e LAL, 2014), reunindo os indicadores de qualidade do solo em suas funções principais no solo, sendo atribuídos pesos e integrados conforme o modelo proposto.

Para o cálculo do IQS foram definidas quatro funções principais do solo de pesos numéricos iguais (Tabela 2), com o somatório do peso das quatro funções igual a um, sendo o valor de máxima qualidade do solo e zero, o valor de um solo com limitações severas, e sem qualidade. Os indicadores de qualidade do solo foram selecionados com base em informações da literatura e IQS já propostos pela comunidade científica (CHAER, 2001; MELO FILHO et al., 2007; CARVALHO, 2008; MELO FILHO et al., 2009; FERNANDES et al., 2011; FREITAS et al., 2012; NAKAJIMA et al., 2015). Estes indicadores incluídos no conjunto de dados receberam um subpeso numérico, atribuídos de maneira a compor o somatório de peso igual a um em cada função principal do solo.

Tabela 2 – Funções principais e indicadores físicos, químicos e biológicos utilizados na avaliação da qualidade do solo em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014

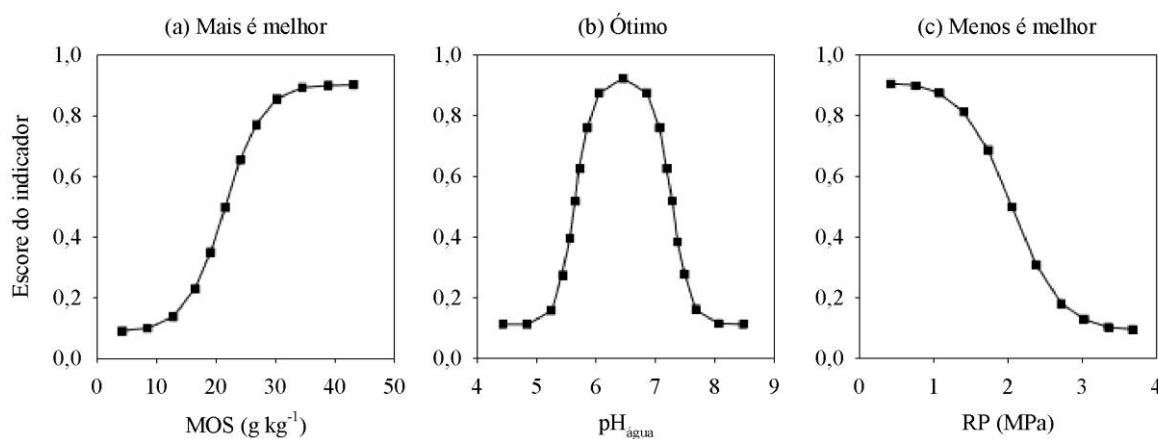
Função principal	Ponderador da função	Indicador de qualidade*	Ponderador do indicador	Função principal	Ponderador da função	Indicador de qualidade	Ponderador do indicador
Receber, armazenar e suprir água (RASA)	0,25	Pt ($m^3 m^{-3}$)	0,20	Promover o crescimento radicular (CRAD)	0,25	RP (MPa)	0,30
		Mac ($m^3 m^{-3}$)	0,15			Ds ($m^3 m^{-3}$)	0,20
		Ds ($m^3 m^{-3}$)	0,15			Mac ($m^3 m^{-3}$)	0,20
		RP (MPa)	0,10			m (%)	0,15
		DMG (mm)	0,10			MOS ($g kg^{-1}$)	0,15
		MOS ($g kg^{-1}$)	0,20			DMG (mm)	0,20
		Minhocas m^{-2}	0,10			Mac ($m^3 m^{-3}$)	0,10
Suprimento de nutrientes (SN)	0,25	pH _{água}	0,20	Promover a conservação do solo e a atividade biológica (CSBIO)	0,25	Ds ($m^3 m^{-3}$)	0,10
		MOS ($g kg^{-1}$)	0,20			MOS ($g kg^{-1}$)	0,20
		CTC _{pH7} ($cmol_c dm^{-3}$)	0,20			pH _{água}	0,10
		V (%)	0,10			CTC ($cmol_c dm^{-3}$)	0,10
		P ($mg dm^{-3}$)	0,20			Minhocas m^{-2}	0,10
		m (%)	0,10			Índice de Pielou (J)	0,10

Pt = porosidade total do solo; Mac = macroporosidade do solo; Ds = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; DMG = diâmetro médio geométrico; MOS = matéria orgânica do solo; m = saturação por alumínio; CTC_{pH7} = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases.

Posteriormente, os indicadores de qualidade do solo foram divididos em três grupos para obtenção de uma pontuação em escala padronizada (KARLEN e STOTT, 1994; ANDREWS et al., 2002b; MELO FILHO et al., 2007): (a) "mais é melhor", (b) "ótimo" e (c) "menos é melhor" (Figura 1). Nos indicadores classificados como "mais é melhor" (Pt, Mac, DMG, MOS, Minhocas, CTC_{pH7}, V, P e J), o menor conjunto de dados foi dividido pelos valores observados, assim, o maior valor obteve peso um; para "menos é melhor" (Ds, RP e m), o menor valor do conjunto de dados foi dividido pelos valores observados, assim, o menor valor obteve peso um; para "ótimo"(pH_{água}), os valores foram divididos em duas classes "mais é melhor" e "menos é melhor", sendo que os valores foram divididos segundo a classe.

Ao final, os valores obtidos de cada indicador foram multiplicados pelos respectivos subpesos (ponderador do indicador) e pesos (ponderador da função), compondo o IQS de cada sistema de cultura que variaram de 0 a 1, sendo que, os menores valores ou menores IQS, representam solos de menor qualidade, enquanto que tratamentos com valores de IQS mais próximos de 1, representam solos de melhor qualidade.

Figura 1 – Escala de pontuação padronizada: (a) "mais é melhor", (b) "ótimo" e (c) "menos é melhor". Fonte: Karlen e Stott (1994)



Análise dos dados

Os dados dos indicadores de qualidade, das funções principais no solo e dos IQS foram avaliados pela análise da variância, e as médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), conforme Ferreira et al. (2012). Na análise dos dados foi utilizado o programa estatístico ASSISTAT 7.7. Por fim, realizou-se análise de componentes principais (ACP) entre os indicadores de qualidade do solo, a fim de identificar quais os indicadores mais sensíveis aos diferentes sistemas de culturas de inverno utilizados.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os nutrientes P, K, Ca e Mg apresentaram teores classificados como altos ou muito altos (COMISSÃO..., 2004), não sendo constatada diferença significativa nos teores de MOS, corroborando com observado por Moreti et al. (2007) e Cunha et al. (2011), não encontrando alterações na MOS em solos cultivados com diferentes plantas de cobertura (Tabela 3).

Notou-se um aumento nos teores extraíveis de P no sistema NF, seguido pelos sistemas ApE e TB. Isto se deve provavelmente a ciclagem e a capacidade de absorção de P pelo NF, além da rapidez destes três sistemas no processo de liberação no solo, devido a menor relação C/N e C/P (CASALI et al., 2011) das crucíferas e leguminosas, acelerando a mineralização dos resíduos culturais, aumentando a biodisponibilidade de P no solo. Em contraposto, se observou menores valores de P no solo em sistemas monocultivados por gramíneas (Ap e AB), explicado pelos baixos teores de P na fitomassa (MARTINS, 2013) e a

imobilização de P proporcionada pelos resíduos de menor relação C/N e C/P (GIACOMINI et al., 2003a; CASALI et al., 2011). Já para os teores extraíveis de K no solo foram maiores em sistemas com presença de Ap solteira ou consorciada, além de AB e E. Giacomini et al. (2003b) relataram o acúmulo de K por gramíneas, sendo destacado por Melo et al. (2011) como fornecedora de K ao solo devido a maior produção de matéria seca das gramíneas.

Tabela 3 – Valores dos indicadores químicos de qualidade do solo na camada 0,00 - 0,10 m em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014

Sistema de cultura ¹	Indicadores químicos da qualidade do solo											
	MOS	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	m	Relação
	g kg ⁻¹	H ₂ O	---- mg dm ⁻³ ----	-----	-----	-----	cmol _c dm ⁻³ -----	-----	-----	-----	---- % ----	Ca/Mg
Ap	27,4 ^{ns}	6,24 ^{c²}	9,3 ^c	225 ^a	7,0 ^c	4,6 ^b	0,1 ^a	2,9 ^a	15,1 ^b	80 ^c	0,4 ^a	1,5 ^b
AB	27,7	6,09 ^c	11,5 ^c	240 ^a	6,6 ^c	4,3 ^b	0,1 ^a	2,9 ^a	14,5 ^b	80 ^c	0,3 ^a	1,5 ^b
AZ	27,9	6,64 ^b	13,2 ^b	194 ^b	8,2 ^b	4,8 ^b	0,0 ^b	2,2 ^b	15,7 ^b	86 ^b	0,1 ^b	1,7 ^a
NF	27,3	6,82 ^b	16,6 ^a	205 ^b	9,2 ^a	5,1 ^a	0,0 ^b	1,7 ^c	16,5 ^b	91 ^a	0,0 ^b	1,8 ^a
E	27,8	6,94 ^a	14,0 ^b	240 ^a	9,4 ^a	5,4 ^a	0,0 ^b	1,6 ^c	17,0 ^a	91 ^a	0,0 ^b	1,7 ^a
ApNFE	27,5	6,77 ^b	12,3 ^b	239 ^a	10,1 ^a	5,4 ^a	0,0 ^b	1,6 ^c	17,7 ^a	92 ^a	0,0 ^b	1,9 ^a
ApNF	27,5	7,01 ^a	12,6 ^b	208 ^a	9,9 ^a	5,7 ^a	0,0 ^b	1,4 ^c	17,7 ^a	92 ^a	0,0 ^b	1,7 ^a
ApE	28,4	7,10 ^a	16,5 ^a	273 ^a	10,4 ^a	5,5 ^a	0,0 ^b	1,4 ^c	18,0 ^a	92 ^a	0,0 ^b	1,9 ^a
TB	26,5	6,96 ^a	15,2 ^a	196 ^b	9,8 ^a	5,5 ^a	0,0 ^b	1,4 ^c	17,3 ^a	91 ^a	0,0 ^b	1,8 ^a
P	27,2	7,01 ^a	14,1 ^b	202 ^b	10,5 ^a	5,8 ^a	0,0 ^b	1,4 ^c	18,2 ^a	92 ^a	0,0 ^b	1,8 ^a

MOS = matéria orgânica do solo; CTC_{pH7} = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio. ⁽¹⁾ Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremçoço branco; PO = pousio invernal. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott (p ≤ 0,05), e (^{ns}) não significativo (p ≤ 0,05).

Os teores de Ca e Mg no solo, além da relação entre os nutrientes e, conseqüentemente a CTC, V e os demais parâmetros de acidez do solo (pH_{água}, Al, H+Al e m), apresentaram comportamento semelhante, destacando os menores valores aos sistemas compostos de monocultivos de gramíneas (Ap, AB e AZ). Amaral et al. (2000) também chamam atenção para o acréscimo de pH_{água} proporcionado por sistemas de culturas que contenham gramíneas, principalmente a Ap, destacando ainda, aumentos de pH_{água} em sistemas que contenham E.

Ainda, Eltz et al. (1989) citam aumentos na CTC e V por plantas de cobertura do solo, e segundo Fabian (2009), alterando valores de pH_{água} e diminuindo a acidez trocável e potencial, concordando com o encontrado neste trabalho. Devido aos valores encontrados nos indicadores pH_{água}, CTC e V, os valores de H+Al, Al e a saturação por este (m) apresentaram-se baixos ou inexistentes (Tabela 3), sendo desconsideráveis para serem interpretados.

Os indicadores físicos RP e Ds tem sido utilizado como indicativos da compactação do solo pela comunidade científica (SILVA et al., 2003; MARASCA et al., 2011), sendo encontradas diferenças significativas para ambas as variáveis neste trabalho (Tabela 4). No

indicador RP, o sistema AZ foi o que proporcionou os menores valores observados (1,30 MPa), com o sistema de pousio invernal (PO) apresentando os maiores valores (1,95 MPa), muito próximos de 2 MPa, valor considerado crítico e limitativo ao crescimento radicular (JUNG et al., 2010). Além disso, este sistema sem cobertura vegetal cultivada apresentou os maiores valores de Ds (1,31 kg dm⁻³), valores mais baixos de Mac (0,10 m³ m⁻³) e de DMG (4,68 mm), evidenciando que este sistema, além de provocar compactação do solo, promove degradação da estrutura do solo, concordando com Prado et al. (2002), que constataram aumentos significativos na RP e Ds após cinco anos de pousio.

Tabela 4 – Valores dos indicadores físicos de qualidade do solo na camada 0,00 - 0,10 m em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014

Sistema de cultura ¹	Indicadores físicos da qualidade do solo					
	RP MPa	Ds kg dm ⁻³	Mac ----- m ³ m ⁻³ -----	Mic ----- m ³ m ⁻³ -----	Pt	DMG mm
Ap	1,59 b ²	1,24 b	0,10 b	0,44 ns	0,55 ns	4,84 b
AB	1,60 b	1,20 b	0,13 a	0,43	0,56	4,72 c
AZ	1,30 c	1,24 b	0,09 b	0,44	0,54	4,74 b
NF	1,62 b	1,23 b	0,12 a	0,43	0,55	4,77 b
E	1,66 b	1,22 b	0,12 a	0,43	0,55	4,83 b
ApNFE	1,50 b	1,21 b	0,12 a	0,42	0,54	5,20 a
ApNF	1,56 b	1,25 b	0,10 b	0,44	0,53	4,83 b
ApE	1,59 b	1,26 b	0,10 b	0,44	0,53	4,85 b
TB	1,65 b	1,26 b	0,11 b	0,43	0,54	4,71 c
PO	1,95 a	1,31 a	0,10 b	0,44	0,54	4,68 c

RP = resistência do solo à penetração; Ds = densidade do solo; Mac = macroporosidade; Mic = microporosidade; Pt = porosidade do solo; DMG = diâmetro médio geométrico. ⁽¹⁾ Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), e (^{ns}) não significativo ($p \leq 0,05$).

O sistema ApNFE apresentou maior DMG (5,20 mm) entre os tratamentos e, juntamente com NF, E e AB, apresentaram maior Mac, todas acima de 0,10 m³ m⁻³, considerada crítica ao crescimento das plantas (VOMOCIL e FLOKER, 1961). Assim como encontrado neste trabalho, Franchini et al. (2009) afirmam ser possível melhorar a estrutura do solo sem intervenção mecânica, beneficiando o desenvolvimento radicular e a disponibilidade para as culturas. Ainda, Reinert et al. (2008) citam que são essas diferenças que auxiliam na seleção de sistemas de culturas compostos por espécies capazes de crescer em condições adversas, além de serem úteis na recuperação de solos. As variáveis Mic e Pt não apresentaram diferenças significativas (Tabela 4).

Os dados relacionados aos indicadores biológicos são apresentados na Tabela 5. Os índices de diversidade (Is, H e J) apresentaram comportamentos semelhantes entre eles, com os melhores valores nos sistemas ApE, ApNFE, AZ e Ap, explicados pela maior riqueza de ordens taxonômicas e menor dominância nestes ambientes, além da ocorrência da ordem Oligochaeta (minhocas), considerado um dos grupos de maior importância da fauna edáfica, visto que compreendem entre 40 - 90 % da biomassa da macrofauna do solo (ANDRÉA, 2010), chegando neste trabalho, a picos de mais de uma tonelada por hectare na camada superficial do solo.

Tabela 5 – Valores dos indicadores biológicos de qualidade do solo na camada 0,00 - 0,10 m em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014

Sistema de cultura ¹	Indicadores biológicos de qualidade do solo					
	Minhocas	Abundância	Riqueza	Índices		
	----- Indivíduos m ² -----		Nº de ordens	Is	H	J
Ap	96 a ²	492 b	6,6 a	0,26 c	1,51 a	0,80 a
AB	22 c	378 b	3,6 c	0,60 b	0,74 c	0,56 b
AZ	58 b	339 b	5,6 a	0,28 c	1,36 a	0,81 a
NF	54 b	547 b	4,8 b	0,45 b	1,04 b	0,65 b
E	22 c	461 b	3,6 c	0,55 b	0,80 c	0,59 b
ApNFE	83 a	432 b	4,6 b	0,30 c	1,27 a	0,84 a
ApNF	54 b	506 b	5,4 a	0,43 b	1,12 b	0,66 b
ApE	74 b	349 b	4,4 b	0,29 c	1,28 a	0,87 a
TB	58 b	442 b	4,2 b	0,42 b	1,09 b	0,75 a
PO	22 c	2528 a	2,8 c	0,95 a	0,11 d	0,13 c

Is = índice de dominância de Simpson; H = índice de diversidade de Shannon; J = índice de uniformidade de Pielou. ⁽¹⁾ Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), e (^{ns}) não significativo ($p \leq 0,05$).

Estes organismos compreendem processos críticos para a manutenção da fertilidade e qualidade dos solos, agindo na decomposição da MOS e resíduos vegetais, na dinâmica de mineralização de nutrientes, e formando estruturas biogênicas (coprólitos) constituídas de agregados altamente estáveis, garantindo boa porosidade conferindo ao solo maior resiliência e, assim, resistindo mais a degradação (LAVELLE et al., 2001; BLANCHART et al., 2004; BROWN e DOMÍNGUEZ, 2010), sendo considerados ótimos bioindicadores de qualidade do solo.

Os resultados do índice de qualidade do solo (IQS) mostram que os sistemas consorciados ApNFE, ApE, além de NF (Tabela 6), apresentaram-se como sistemas de maior qualidade do solo, com ApNFE possuindo os maiores valores nas quatro funções principais do solo, destacando que este sistema apresentou os melhores DMG observados (5,20 mm),

maior macroporosidade do solo ($0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), abundância de minhocas elevada (83 indivíduos m^{-2}), $\text{pH}_{\text{água}}$ próximo ao ideal (6,77), além dos maiores teores de bases trocáveis (K, Ca e Mg) e, conseqüentemente, maiores teores de CTC e V.

Tabela 6 – Valores das funções principais e dos índices de qualidade do solo (IQS) em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014

Sistema de cultura ¹	Contribuição das funções				Índice de qualidade do solo (IQS)
	RASA	CRAD	SN	CSBIO	
Ap	0,187 b ²	0,179 c	0,172 c	0,192 a	0,730 c
AB	0,184 b	0,190 b	0,176 c	0,178 c	0,728 c
AZ	0,183 b	0,199 a	0,190 b	0,187 b	0,759 b
NF	0,185 b	0,195 a	0,197 a	0,187 b	0,764 a
E	0,180 c	0,194 a	0,196 a	0,183 b	0,753 b
ApNFE	0,191 a	0,198 a	0,194 a	0,201 a	0,784 a
ApNF	0,179 c	0,190 b	0,196 a	0,186 b	0,751 b
ApE	0,183 b	0,193 a	0,202 a	0,195 a	0,773 a
TB	0,178 c	0,187 b	0,199 a	0,187 b	0,751 b
P	0,169 d	0,176 c	0,197 a	0,165 d	0,707 d

RASA = receber, armazenar e suprir água; SN = suprimento de nutrientes; CRAD = promover crescimento radicular; CSBIO = promover a conservação do solo e atividade biológica. ⁽¹⁾ Ap = aveia preta; AB = aveia branca; AZ = azevém; NF = nabo forrageiro; E = ervilhaca; ApNFE = aveia preta + nabo forrageiro + ervilhaca; ApNF = aveia preta + nabo forrageiro; ApE = aveia preta + ervilhaca; TB = tremoço branco; PO = pousio invernal. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), e (^{ns}) não significativo ($p \leq 0,05$).

O sistema ApE, apresentou os maiores valores nas funções CRAD e CSBIO, com destaque aos valores observados em SN, proporcionando maior fertilidade do solo, porém com o mesmo não ocorrendo na função RASA, em função de menores valores de Mac e DMG, evidenciando menor porosidade e qualidade estrutural do solo em relação ao ApNFE,

O sistema NF, se destacou por apresentar maior valor na função crescimento radicular (CRAD), principalmente em função da maior Mac proporcionada por este, sendo considerado pela literatura como um excelente condicionador do solo, devido ao sistema radicular pivotante agressivo, capaz de crescer em camadas compactadas do solo (CUBILLA et al., 2002; ABREU et al., 2004; MAGALHÃES et al., 2009; SILVEIRA JUNIOR et al., 2012). Ainda, o sistema NF apresentou valores elevados na função SN, devido principalmente ao fornecimento de P no solo, além de maiores teores de Ca, Mg e V. Entretanto, este sistema apresentou menores valores que ApNFE nas funções de fornecimento de água (RASA) e de promover maior conservação do solo e atividade biológica, muito em função de possuir menor DMG, CTC, abundância de minhocas m^{-2} e menor índice de uniformidade (J).

Desta forma, como observado neste trabalho, obtém-se um sistema capaz de proporcionar melhores condições de armazenamento de água, crescimento radicular, fornecimento de nutrientes, além de maior conservação do solo e atividade biológica, não havendo dúvidas da importância do consorciamento de plantas, aliando elevada produção de matéria seca e a alta densidade radicular das gramíneas (MAGALHÃES et al., 2009), a redução da compactação e aumento da porosidade proporcionada pelas crucíferas (CARDOSO et al., 2014), além do fornecimento de N ao solo pelas leguminosas (LOVATO et al., 2004), conciliando proteção e adubação eficientes ao solo (OLIVEIRA et al., 2002).

O sistema de pousio invernal (PO) obteve o pior IQS calculado, devido aos piores resultados em três das quatro funções principais no solo, principalmente os relacionados aos indicadores físicos e biológicos, com os piores resultados nos indicativos de compactação do solo (RP e Ds), também encontrado por, menor estruturação do solo (DMG), porosidade (Mac), além de menor abundância de minhocas, menor diversidade de organismos (Riqueza, H e J), e maior dominância de um grupo sobre os demais (Is), evidenciando a degradação física e biológica proporcionada por este sistema, demonstrando que embora os parâmetros químicos estejam excelentes (SN), possa não haver extração de nutrientes de forma satisfatória pelas plantas (CAMARGO e PIZA, 2007; MELO et al., 2011) em função do menor crescimento radicular e menor fornecimento de água neste sistema (Tabela 6).

Sistemas que utilizam gramíneas solteiras, em especial Ap e AB, apresentaram os piores resultados de IQS, principalmente devido a degradação dos indicadores químicos de qualidade do solo (SN), obtendo menores valores nos teores de P, Ca e Mg, além de menor CTC e V, devido as gramíneas funcionares como imobilizadoras de nutrientes no solo (ARGENTA e SILVA, 1999), devido ao menor teor de N e P no tecido destas. Os sistemas AZ, E, ApNF e TB, obtiveram índices considerados intermediários, não promovendo maior qualidade e nem comprometendo o sistema solo (Tabela 6).

A análise de componentes principais (ACP) realizada a partir dos atributos químicos, físicos e biológicos avaliados nos sistemas de culturas de inverno, encontra-se na Tabela 7. Foram necessários seis componentes principais para explicarem mais de 80% da variância encontrada entre os sistemas de culturas, sendo que o primeiro explicou 33,17% da variância total, sendo composto por $pH_{\text{água}}$, Ca, Mg, CTC, saturação por bases (V) e pela relação Ca/Mg, além de apresentar forte relação negativa para os indicadores acidez trocável (Al) e potencial (H+Al), limitando-se aos indicadores químicos somente, sendo visivelmente importantes para diferenciar os efeitos dos sistemas de culturas de inverno, principalmente Ap, AB e AZ dos demais, como também pode ser observado na Tabela 3.

No segundo componente, que explicou mais 17,21% da variância total entre os sistemas, destacam-se as relações positivas para os atributos biológicos abundância de organismos e o índice de dominância de Simpson (Is), sendo sensíveis o suficiente para diferenciar o sistema PO dos demais sistemas de culturas de inverno (Tabela 5 e 7). Os indicadores biológicos H e J apresentaram relação negativa destacável (Tabela 7), sendo suficiente para segregar os sistemas Ap, AZ, além dos consórcios ApNFE e ApE dos demais sistemas testados (Tabela 5). Os organismos da fauna do solo possuem grande importância nas funções do solo, devido a estes serem capazes de modificar as características físicas, químicas e biológicas do solo, constituindo-se em componentes importantes para a avaliação da organização e funcionamento do mesmo (STEFFEN et al., 2007; SILVA et al., 2013).

Tabela 7 – Análise de componentes principais dos indicadores de qualidade química, física e biológica do solo em dez sistemas de culturas de inverno. Frederico Westphalen, RS, 2014

Componente da variância	Componente principal					
	1	2	3	4	5	6
Autovalores	9,29	4,82	3,51	2,78	1,34	1,20
% da variância explicada	33,17	17,21	12,52	9,93	4,78	4,29
% da variância explicada acumulada	33,17	50,38	62,90	72,83	77,61	81,91
Indicador de qualidade/função do solo	----- Matriz de correlação -----					
pH _{água}	0,855*	0,076	0,169	0,058	0,135	-0,052
Matéria orgânica do solo (MOS)	-0,219	0,181	0,483	-0,241	-0,142	0,569
Fósforo (P)	-0,165	0,409	0,752	-0,180	-0,079	0,268
Potássio (K)	-0,451	0,162	0,484	-0,206	0,020	0,183
Cálcio (Ca)	0,923	0,147	0,212	0,029	0,029	-0,068
Magnésio (Mg)	0,864	0,131	0,116	0,097	-0,032	-0,048
Al (acidez trocável)	-0,865	-0,036	-0,136	-0,029	-0,154	-0,041
H+Al (acidez potencial)	-0,904	-0,161	-0,177	-0,100	-0,107	0,184
Capacidade de troca catiônica (CTC)	0,822	0,309	0,356	-0,009	0,013	-0,078
Saturação por bases (V)	0,926	0,176	0,202	0,083	0,094	-0,137
Saturação por Al (m)	0,854	-0,067	-0,175	0,040	-0,015	0,015
Relação Ca/Mg	0,792	-0,093	0,049	0,047	-0,012	-0,024
Resistência do solo à penetração (RP)	-0,184	0,698	-0,175	-0,351	0,165	0,020
Densidade do solo (Ds)	-0,310	0,518	0,110	-0,561	0,109	-0,068
Macroporosidade do solo (Mac)	-0,325	-0,130	0,229	0,830	0,132	0,009
Microporosidade do solo (Mic)	0,150	-0,026	-0,333	-0,426	0,711	0,315
Porosidade total do solo (Pt)	-0,272	-0,139	-0,001	0,555	0,701	0,253
Diâmetro médio geométrico (DMG)	0,505	-0,301	-0,131	0,013	-0,153	0,044
Minhocas	-0,551	-0,021	0,521	-0,354	0,169	-0,404
Abundância de organismos	-0,273	0,733	0,067	-0,035	0,217	-0,368
Riqueza de ordens	-0,351	-0,413	0,248	-0,468	0,202	-0,369
Índice de dominância de Simpson (Is)	-0,330	0,871	-0,025	0,298	-0,027	-0,369
Índice de diversidade de Shannon (H)	0,334	-0,866	0,037	-0,316	0,035	0,008
Índice de uniformidade de Pielou (J)	0,332	-0,870	0,033	-0,270	0,035	0,101

* Valores destacados em negrito apresentam carga fatorial > 0,700 para o respectivo componente principal.

Por sua vez, os indicadores físicos de qualidade do solo só apareceram como quarto e quinto componentes principais, que explicaram 9,93 e 4,78% da variância total da área experimental, respectivamente, destacando os atributos indicadores da aeração do solo Mac e Pt, ambas com relações positivas maior que 0,700 (Tabela 7), evidenciando que os sistemas de culturas do solo afetam facilmente estas propriedades da qualidade do solo.

5.6 CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que embora os indicadores químicos, físicos e biológicos sejam capazes de discriminar os sistemas de culturas de inverno, dificultam a escolha de um sistema em função do amplo espectro de variáveis existentes que apresentam diferentes comportamentos.

Os sistemas de culturas de inverno ApNFE, ApE e NF apresentaram os maiores índices de qualidade do solo (IQS) entre os sistemas avaliados, destacando principalmente as melhores condições de crescimento radicular em profundidade e o melhor suprimento de nutrientes propiciado por estes sistemas.

Embora o pousio invernal (PO) tenha se apresentado excelente no suprimento de nutrientes as plantas, este foi o sistema de menor IQS observado, possuindo as piores condições de recebimento, armazenamento e suprimento de água, inibindo o crescimento radicular das plantas, além de promover menor conservação do solo e menor atividade biológica entre os sistemas avaliados.

A análise conjunta dos dados de diferentes indicadores de qualidade do solo através da formulação de um índice de qualidade do solo (IQS) se mostrou eficiente para avaliar o solo sob diferentes sistemas de culturas de inverno.

Os indicadores químicos ($\text{pH}_{\text{água}}$, Ca, Mg, CTC, V, Al, H+Al e relação Ca/Mg) foram os mais sensíveis aos sistemas de culturas de inverno utilizados, seguido pelos biológicos (abundância, Is, H e J) e, por último, os físicos (Mac e Pt).

5.7 AGRADECIMENTOS

A disciplina de mestrado AGR816 - Qualidade do Solo na Produção Vegetal e seus docentes pela introdução ao assunto e incentivo a ideia deste presente trabalho, e ao colega de disciplina e mestrado Douglas pelo auxílio nas análises estatísticas deste artigo. A

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

5.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004.

AMARAL, A. S. et al. Resíduos vegetais na superfície do solo afetam a acidez do solo e a eficiência do herbicida Flumetsulam. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 789-794, set./out. 2000.

ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. Soil fauna. In: **Tropical soil biological and fertility: A Handbook of methods**. 2. ed. Wallingford: C. A. B. International, p. 44-46, 1993.

ANDRÉA, M. M. O uso de minhocas como bioindicadores de contaminação de solos. **Acta Zoológica Mexicana**, v. 2, p. 95-107, 2010.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 90, p. 25-45, 2002a.

ANDREWS, S. S. et al. On-Farm Assessment of Soil Quality in California's Central Valley. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 12-23, 2002b.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. Adubação nitrogenada em milho implantado em semeadura direta após aveia preta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 4, p. 745-754, out./dez. 1999.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141 (SSSA Special publication 49).

BALSAN, R. Impactos decorrentes da modernização da agricultura brasileira. **Campo-território: revista de geografia agrária**, Uberlândia, v. 1, n. 2, p. 123-151, ago. 2006.

BELTRAME, L. F. C.; GONDIM, L. A. P.; TAYLOR, F. C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 5, p. 145-149, 1981.

BLANCHART, E. et al. 2004. Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion: a review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, p. 303-315, 2004.

BRESSAN, S. B. et al. Plantas de cobertura e qualidade química de Latossolo Amarelo sob plantio direto no cerrado maranhense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 371-378, 2013.

BROWN, G. G.; DOMÍNGUEZ, J. Uso das minhocas como bioindicadoras ambientais: princípios e práticas – o 3º encontro latino americano de ecologia e taxonomia de oligoquetas (elaetao3). **Zoológica Mexicana**, v. 2, p. 1-18, 2010.

CAMARGO, R.; PIZA, R. J. Produção de biomassa de plantas de cobertura e efeitos na cultura do milho sob sistema plantio direto no município de Passos, MG. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 76-80, jul./set. 2007.

CARDOSO, R. A. et al. Influência da adubação verde nas propriedades físicas e biológicas do solo e na produtividade da cultura de soja. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, Londrina, v. 35, n. 2, p. 51-60, jul./dez. 2014.

CARVALHO, L. L. Diagnóstico da qualidade do solo em dois sistemas tradicionais de uso e manejo: citros e mandioca. 2008. 67 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2008.

CASALI, C. A. et al. **Mineralização das formas de fósforo do tecido de plantas de cobertura**. Piracicaba: Informações Agrônomicas - IPNI. set. 2011. p. 21-24 (Documentos, n. 135).

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 777-788, 2005.

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

CUNHA, E. Q. et al. Atributos químicos de solo sob produção orgânica influenciados pelo preparo e por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1021-1029, 2011.

DALLA NORA, D. et al. Melhoria da qualidade química do perfil do solo sob plantio direto pela adição de gesso e de enxofre elementar isolada ou combinada com calcário e a produtividade das culturas. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 137-138, p. 51-64, 2013.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21.

ELTZ, F. L. P.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeito de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno Álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 259-267, 1989.

FABIAN, A. J. **Plantas de cobertura: efeito nos atributos do solo e na produtividade de milho e soja em rotação**. 2009. 83 p. Tese (Doutorado em Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

FERNANDES, J. C.; GAMERO, C. A.; RODRIGUES, J. G. L.; MIRÁS-AVALOS, J. M. Determination of the quality index of a Paleudult under subflower culture and different management systems. **Soil & Tillage Research**, v. 112, p. 167-174, 2011.

FERREIRA, D. F.; FILHO, A. C.; LÚCIO, A. D. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrições na casualização. **Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 16-19, set./dez. 2012.

FRANCHINI, J. C. et al. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina: Embrapa Soja. 2009. 42 p (Documentos, n. 314).

FREITAS, D. A. C. et al. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 417-428, jul./set. 2012.

GIACOMINI, S. J. et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 9, p. 1097-1104, 2003a.

GIACOMINI, S. J. et al. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 325-334, 2003b.

JUNG, K. Y. et al. Soil compaction varies by crop management system over a claypan soil landscape. **Soil & Tillage Research**, v. 107, n. 1, p. 1-10, 2010.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 53-72. (Special Publication, 35).

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L. (Eds.). **Methods of soil analysis**. Pat 1. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-509.

LAVELLE, P. et al. SOM management in the tropics: why feeding the soil macrofauna? **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, p. 53-61, 2001.

LOVATTO, T. et al. Adição de Carbono e Nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 175-187, jan./fev. 2004.

MAIA, C. E. Qualidade ambiental em solo com diferentes ciclos de cultivo do meloeiro irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 4, p. 603-609, abr. 2013.

MAGALHÃES, E. N. et al. Recuperação estrutural e produção do capim-Tifton 85 em um Argissolo Vermelho-Amarelo compactado. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 10, n. 1, p. 68-76, 2009.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, p. 141-150, 2000.

MARASCA, I. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e teor de água em sistema de plantio direto, na cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 239-246, mar./abr. 2011.

MARTINS, R. P. **Decomposição e mineralização de nutrientes de resíduos de plantas de cobertura em solo cultivado com cebola (*Allium cepa* L.)**. 2013. 69 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MELLONI, R. et al. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2461-2470, 2008.

MELO, A. V. et al. Extração de nutrientes e produção de biomassa de aveia-preta cultivada em solo submetido a dezoito anos de adubação orgânica e mineral. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 2, p. 411-420, abr./jun. 2011.

MELO FILHO, J. F.; SOUZA, A. L. V.; SOUZA, L. S. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um latossolo amarelo coeso dos tabuleiros costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1599-1608, 2007.

MELO FILHO, J. F. de. et al. Índice de qualidade em um latossolo amarelo coeso cultivado com citros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 04, p. 1168-1177, 2009.

MENEZES, C. E. G. et al. Macrofauna edáfica em estádios sucessionais de floresta estacional semidecidual e pastagem mista em Pinheiral (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, nov./dez. 2009.

MORETI, D. et al. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo, adubações e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n. 1, p. 167-175, jan./fev. 2007.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods. **Plos One**, Columbus, v. 9, n. 8, p. 1-15, ago. 2014.

NAKAJIMA, T.; LAL, R.; JIANG, S. Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio. **Soil & Tillage Research**, v. 146, p. 323-328, 2015.

NASCENTE, A. S.; LI, Y.; CRUSCIOL, C. A. C. Soil Aggregation, Organic Carbon Concentration, and Soil Bulk Density as Affected by Cover Crop Species in a No-Tillage System. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, maio/jun. 2015.

NEIRO, E. S. et al. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Distroférrico, com rotação e sucessão de culturas, sob plantio direto. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 19-25, 2003.

NUNES, L. A. P. L. et al. Diversidade da fauna edáfica em solos submetidos a diferentes sistemas de manejo no semi-árido nordestino. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, p. 43-49, 2009.

OLIVEIRA, J. R. A.; MENDES, I. C.; VIVALDI, L. Carbono da biomassa microbiana em solos de cerrado sob vegetação nativa e sob cultivo: avaliação dos métodos fumigação-incubação e fumigação-extração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 863-871, 2001.

OLIVEIRA, T. K.; CARVALHO, G. J.; MORAES, R. N. S. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1079-1087, ago. 2002.

PIMENTEL, M. S. et al. Atributos biológicos do solo sob manejo orgânico de cafeeiro, pastagem e floresta em região do Médio Paraíba fluminense-RJ. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 85-93, jul./dez. 2006.

PINHEIRO, F. J. et al. Caracterização da macrofauna edáfica na interface solo-serapilheira em uma área de Caatinga do Nordeste brasileiro. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 19, p. 2964-2974, 2014.

PRADO, R. M.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 12, p. 1795-1801, dez. 2002.

PREVEDELLO, C. L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 23-28, jul.-set. 1999.

RAPHAEL, J. P. A. et al. Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil & Tillage Research**, v. 155, n. 1, p. 45-53, 2016.

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.

SANTI, A. L. et al. Multifuncionalidade de biomassas de cobertura do solo e agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 137-138, p. 16-23, 2014.

SANTI, A. L. et al. Cobertura permanente, estrutura do solo e a garantia de altos rendimentos. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 142-143, p. 20-23, 2015.

SANTOS, C. A. P. et al. Atributos indicadores da qualidade do solo em povoamentos de eucalipto fertirrigado no Vale do Rio Doce – MG. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 135-141, mar./abr. 2009.

SANTOS, C. L. et al. Estimativa da umidade na capacidade de campo em vasos e em laboratório. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 8, n. 2, p. 151-160, abr./jun. 2013.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, M. S. et al. Riqueza de formigas (Hymenoptera, Formicidae) da serrapilheira em fragmentos de floresta semidecídua da Mata Atlântica na região do Alto do Rio Grande, MG, Brasil. **Iheringia, Série Zoologia**, Porto Alegre, v. 96, n. 1, p. 95-101, mar. 2006.

SILVA, A. J. et al. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, n. 2, p. 118-127, jun. 2008.

SILVA, E. A. A. et al. Um Estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos do solo e planta. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 365-371, 2003.

SILVA, R. F. et al. Fauna edáfica influenciada pelo uso de culturas e consórcios de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, p. 130-137, abr./jun. 2013.

SILVEIRA JUNIOR, S. D. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1854-1867, 2012.

STEFFEN, R. B.; ANTONIOLLI, Z. I.; STEFFEN, G. P. K. Avaliação de substratos para reprodução de colêmbolos nativos em condições de laboratório. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 3, p. 265-269, 2007.

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

TISDALL, J. M.; COCKROFT, B.; UREN, N. C. The stability of soil aggregates as affected by organic materials microbial activity and physical disruption. **Soil Research**, Victoria, v. 16, p. 9-17, 1978.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 743-755, jul./ago. 2009.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of the America Society of Agricultural Engineering**, v. 4, p. 242-246, 1961.

6 ARTIGO V – USO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE PLANTAS DE COBERTURAS DO SOLO

6.1 RESUMO

Avanços tecnológicos na agropecuária têm mostrado a importância de se medir a variabilidade espacial dos atributos do solo e de planta que afetam ou determinam o rendimento das lavouras, fornecendo uma ferramenta valiosa que não estava disponível anteriormente, permitindo interpretar situações semelhantes de forma diferenciada. Objetivou-se avaliar a eficiência do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para estimar a fitomassa seca produzida por dez sistemas de plantas de cobertura do solo no norte do Estado do Rio Grande do Sul. Foram estabelecidos coeficientes de determinação (R^2) entre o NDVI observado e a matéria seca da biomassa coletada nos sistemas de plantas de cobertura do solo com 10 repetições. Os dez sistemas utilizados foram: aveia preta (AP), aveia branca (AB), azevém (AZ), nabo forrageiro (NF), ervilhaca (E), consórcio AP+NF+E, consórcio AP+NF, consórcio AP+E, tremoço branco (TB), vegetação espontânea ou pousio (P). O NDVI foi capaz de estimar a massa da matéria seca de forma satisfatória em sete sistemas analisados, mostrando ser uma ferramenta valiosa também na entressafra. Os sistemas que estavam em floração tiveram o R^2 prejudicado. Não é recomendada a utilização do NDVI para estimar fitomassa seca em consórcios envolvendo três ou mais plantas, ou analisar os dados de diferentes plantas de cobertura em conjunto, por se mostrar pouco eficiente nestes casos.

PALAVRAS-CHAVE: Agricultura de precisão, GreenSeeker, NDVI, Palhada.

6.2 ABSTRACT

Technological advances in agriculture have shown the importance of measuring the spatial variability of soil properties and plant that affect or determine crop yields, providing a valuable tool that was not previously available, allowing interpret similar situations differently. The objective of this study was to evaluate the efficiency of normalized difference vegetation index (NDVI) to estimate the dry matter produced for ten systems of ground cover plants in the north of the Rio Grande do Sul State. Were established determination coefficients (R^2) between the observed NDVI and dry biomass collected of ten cover crops systems with ten repetitions each. Determination coefficients were established (R^2) between

the observed NDVI and dry biomass collected ten of soil cover crops systems with 10 repetitions each. The ten systems used were: black oat (AP), oat (AB), ryegrass (AZ), radish (NF), vetch (E), consortium AP+NF+E, consortium AP+NF, consortium AP+E, white lupine (TB), and spontaneous vegetation or fallow (P). The NDVI was able to estimate the dry matter satisfactorily in seven systems analyzed, proving to be a valuable tool also in the off season. Systems that were in bloom had harmed R^2 . It is not recommended to use the NDVI to estimate biomass in consortiums involving three or more plants, or analyze data from different plant cover together, for being inefficient in these cases.

KEYWORDS: Precision agriculture, GreenSeeker, NDVI, Straw.

6.3 INTRODUÇÃO

O uso de plantas de cobertura (PC), que é uma prática antiga como forma de melhorar o potencial produtivo das áreas utilizadas na agricultura (ZIECH et al., 2014), vem ganhando cada vez mais espaço no Sistema de Plantio Direto (SPD) nas áreas agrícolas do Sul do Brasil, por atender uma das premissas básicas do SPD, que é a adequação de sistemas de rotação e sucessão de culturas de modo a aumentar o aporte de material orgânico e nutrientes, bem como proteger o solo dos processos erosivos (MARCELO et al., 2009), sendo fundamental selecionar PCs com maior potencial em produzir fitomassa e acumular principalmente, C e N contidos em seus tecidos (DONEDA et al., 2012).

A produção de matéria seca das espécies utilizadas para cobertura do solo depende de inúmeras condições, como as edafoclimáticas, fitossanitárias, de práticas de manejo, e em grande parte, da agressividade do sistema radicular (CARVALHO e AMABILE, 2006; CARVALHO et al., 2013), sendo essencial a criação de uma ferramenta adequada para estimar a produção desta em tempo real.

Na agricultura de precisão, utilizam-se de forma intensa, as geotecnologias, tais como sensoriamento remoto, tais como obter informações de objetos, sem contato físico, por meio de uso de sensores (DEGHAIID et al., 2013), e nos últimos anos, têm ganhado destaque os estudos sobre parametrização de atributos morfológicos dos dosséis vegetais, feitos com métodos baseados nas propriedades ópticas das plantas (OLLINGER, 2011; SIMÕES et al., 2015).

Diversos índices gerados pela combinação de valores de refletância entre bandas espectrais específicas vêm sendo utilizados, como indicadores da quantidade de vegetação e

outros atributos dos dosséis, sendo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o mais conhecido (OLLINGER, 2011; SIMÕES et al., 2015), sendo que o NDVI apresenta ótima correlação linear com a biomassa da vegetação em casos que o terreno apresente boa cobertura vegetal (MENESES e ALMEIDA, 2012; DEGHAID et al., 2013), assim como as plantas de cobertura do solo.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do NDVI para estimar a fitomassa seca produzida por dez sistemas de plantas de cobertura do solo diferentes no norte do Estado do Rio Grande do Sul.

6.4 MATERIAL E MÉTODOS

Local

O experimento foi conduzido no município de Frederico Westphalen - RS na safra agrícola de 2014, na área experimental da Universidade Federal de Santa Maria, campus de Frederico Westphalen – RS, localizada a 27°23'24.33" S e 53°25'39.58" O, com altitude de 483 m. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é Cfa ou subtropical úmido, com temperatura média anual de 19°C e precipitação entre 1800 e 2000 mm bem distribuídos ao longo do ano.

O solo foi classificado conforme a Santos et al. (2013) como Latossolo Vermelho distrófico típico, com textura argilosa, cujas características físicas e químicas do solo de 0,00-0,20 m de profundidade se encontram na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição e características químicas e físicas do solo da área experimental

Análise	Unidade	Valor
pH _{água}	-log[H ⁺]	5,1
Argila	g kg ⁻¹	740
Matéria orgânica (MOS)	g kg ⁻¹	32
P (Mehlich ⁻¹)	mg dm ⁻³	9,3
K ⁺	mg dm ⁻³	268,0
Al ³⁺	cmol _c dm ⁻³	0,4
Acidez potencial	cmol _c dm ⁻³	5,6
Ca ⁺⁺	cmol _c dm ⁻³	6,0
Mg ⁺⁺	cmol _c dm ⁻³	2,8
Capacidade de Troca de Cátions (CTC)	cmol _c dm ⁻³	11,3
Saturação da CTC por bases (V)	%	50,6

Coleta de dados

Foram efetuadas as três leituras de NDVI em cada uma das dez parcelas por tratamento. Na mesma data foi feito o corte de 0,25 m² (0,5 x 0,5 m) de biomassa vegetal, que foram levadas a estufa com ventilação forçada á 65 °C até peso constante para determinar a massa da matéria seca (MMS) de cada parcela. As plantas de cobertura foram semeadas na primeira quinzena do mês de maio de 2014, sendo as leituras de NDVI e coletas de MMS, efetuadas dois dias antes da dessecação do experimento (primeira semana de setembro) para permitir a semeadura da cultura da soja no local. Cada sistema de planta de cobertura de inverno possuía dimensões de 5 m x 25 m cada, divididas em dez parcelas por tratamento (5 m x 2,5 m cada) e área total de 1250 m². Os dez sistemas de plantas de cobertura analisados foram: aveia preta (*Avena strigosa* S. - AP), aveia branca (*Avena sativa* L. - AB), azevém (*Lolium multiflorum* L. - AZ), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. - NF), ervilhaca (*Vicia sativa* L. - E), aveia preta + ervilhaca + nabo forrageiro (AP+NF+E), aveia preta + nabo forrageiro (AP+NF), aveia preta + ervilhaca (AP+E), tremoço branco (*Lupinus albus* L. - TB) e pousio (vegetação espontânea - P).

As leituras de NDVI foram realizadas com aparelho GreenSeeker® 505 Handheld Sensor, que calcula o NDVI a partir da equação $NDVI = (\rho_{ivp} - \rho_v) / (\rho_{ivp} + \rho_v)$, onde ρ_{ivp} é a refletância no infravermelho próximo (0,725-1,1 μ m), e ρ_v é a refletância no vermelho (0,58-0,68 μ m). Seus valores variam de -1 a 1 de modo que, quanto mais próximo de 1 maior o vigor de desenvolvimento da cultura (ROUSE et al., 1978; GROHS et al., 2011), ou maior a cobertura de solo pela mesma. A altura de leitura foi fixa segundo a recomendação do fabricante, com distância entre o topo do dossel e o sensor de aproximadamente 0,8 a 1 m, sendo realizadas todas entre as 09 e 12 horas (CRUSIOL et al., 2013).

Análise dos dados

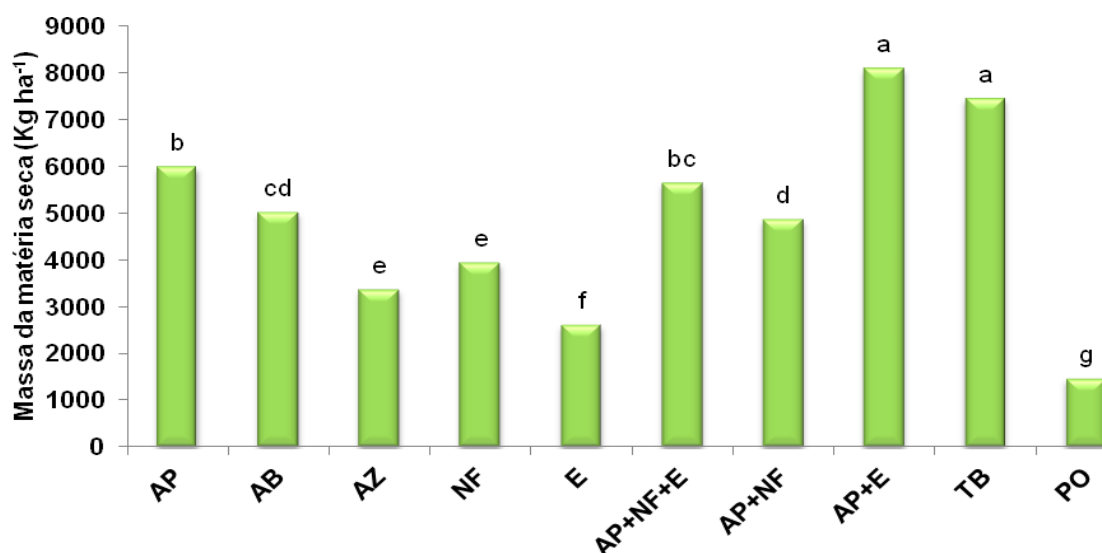
Os dados de fitomassa seca e NDVI foram analisados de acordo com o modelo de delineamento experimental inteiramente casualizado, submetidos à análise da variância pelo teste F ($p < 0,05$), e as médias comparadas pelo teste t de Student ($p < 0,05$), conforme Ferreira et al. (2012). Ainda foram feitas regressões para estimar o coeficiente de determinação de fitomassa seca da parcela através das leituras de NDVI. Para as análises dos dados foi utilizado o programa estatístico ASSISTAT, tomando como base os níveis de significância maiores que 95% ($p \leq 0,05$).

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos de massa da matéria seca (MMS) foram classificados segundo Pimentel-Gomes (1985), onde se considera que quanto menor o CV%, mais homogêneos são os dados. AB e AZ apresentaram baixa variabilidade (CV% = 9,6 e 7,5), e sendo detectada alta variabilidade em AP (CV% = 22,3), provavelmente devido ao acamamento dessa cultura, muito alta variabilidade em P (CV% = 59,6), e média variabilidade entre os demais tratamentos (CV% entre 10,7 e 15,8).

Os tratamentos que produziram maior quantidade de MMS foram AP+E e TB, seguido de AP, como pode ser visto na Figura 1. Estes dados corroboram com os resultados encontrados por Carvalho et al. (2013), destacando que os consorciamentos tendem a produzir uma quantidade maior de massa da matéria seca podendo proporcionar benefícios aos sistemas de produção de distintas formas, além de não recomendar a prática do pousio, visto que produz pouca massa da matéria fresca e possui uma menor cobertura vegetal.

Figura 1 – Produção de Massa da matéria seca em diferentes sistemas e plantas de cobertura do solo

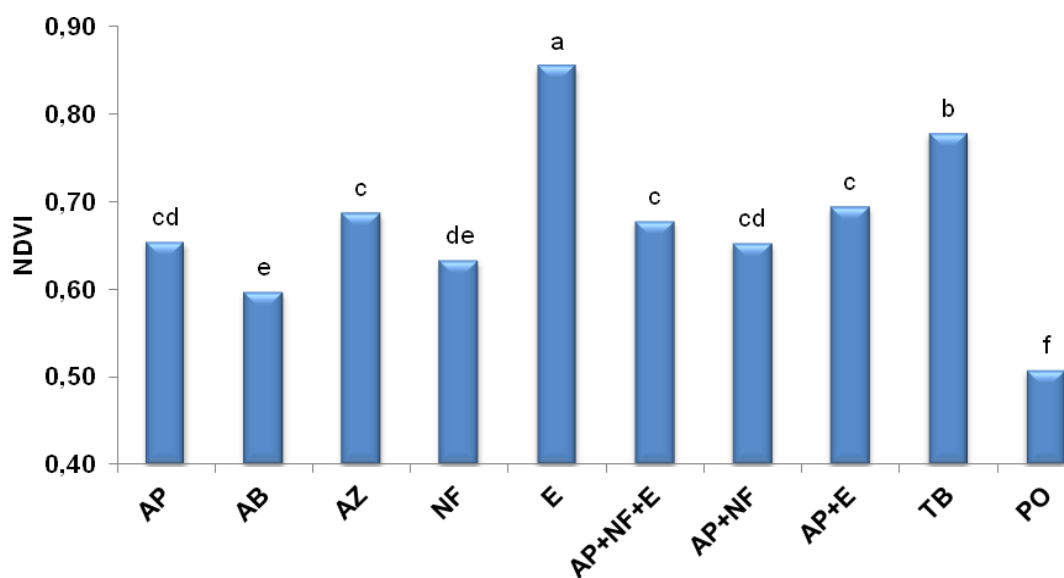


Aveia preta (AP), aveia branca (AB), azevém (AZ), nabo forrageiro (NF), ervilhaca (E), tremço branco (TB), vegetação espontânea ou pousio (PO). Médias seguidas de mesma letra, não diferem pelo teste t a 5% probabilidade.

Já para os valores de NDVI (Figura 2), que apresentaram baixo CV com exceção do P (12,2%), o tratamento E mostrou o maior valor observado (0,86), apesar de ser uma das PCs que menos produziram fitomassa seca. Isto demonstra que as PCs analisadas não devem ser

interpretadas de forma conjunta, devendo-se apenas comparar os dados entre cada cobertura analisada. Ainda, Risso et al. (2012) destaca que uma das peculiaridades inerentes ao NDVI é a saturação assintótica, que torna o índice incapaz de diferenciar biomassa verde em condições de elevado IAF e cobertura do solo, atendido pelo tratamento citado.

Figura 2 – NDVI observado no momento da coleta em diferentes sistemas de plantas de cobertura do solo

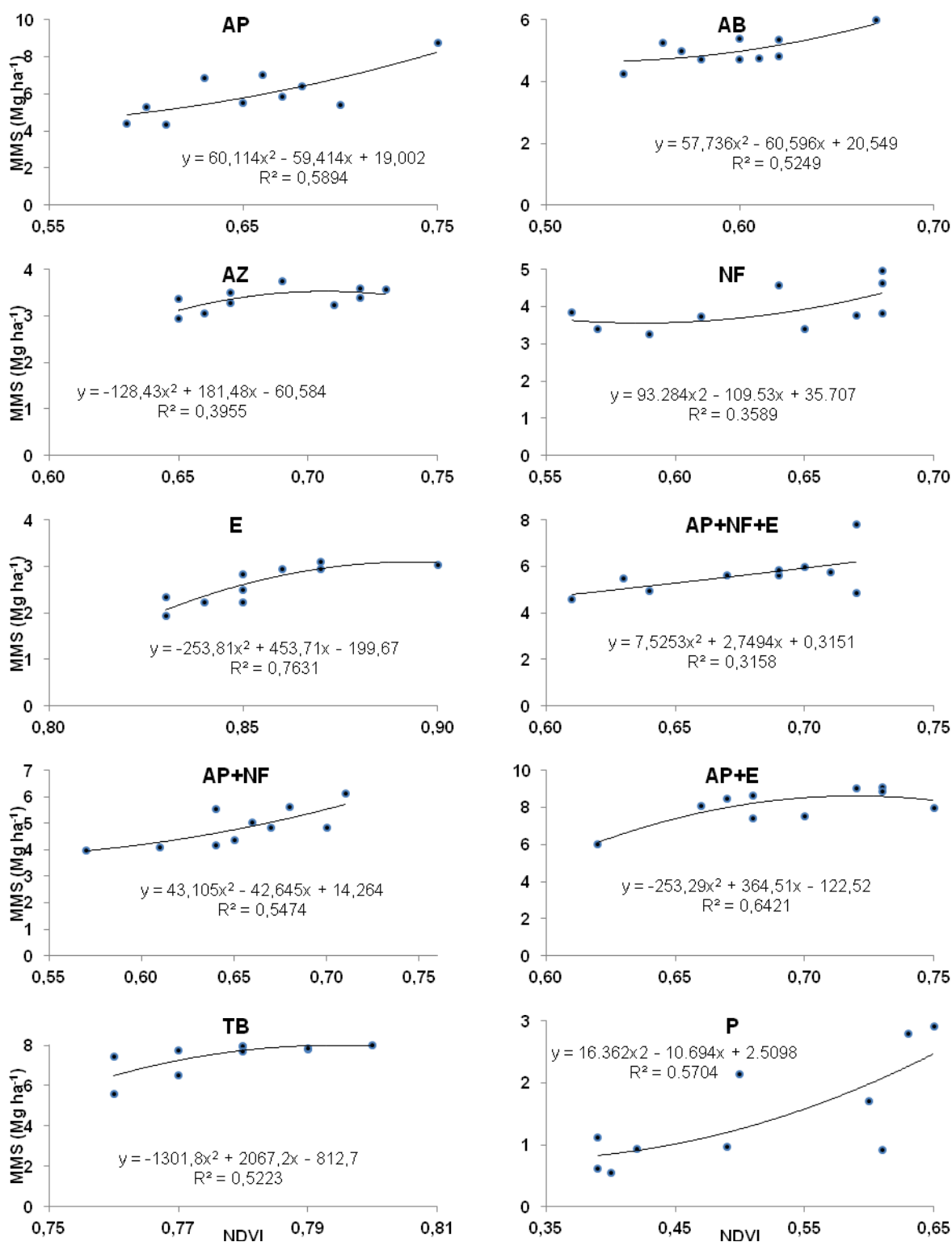


Aveia preta (AP), aveia branca (AB), azevém (AZ), nabo forrageiro (NF), ervilhaca (E), tremço branco (TB), vegetação espontânea ou pousio (PO). Médias seguidas de mesma letra, não diferem pelo teste t a 5% probabilidade.

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) apresentou comportamento quadrático com a MMS produzida pelos dez sistemas de PCs analisados, obtendo-se coeficientes de determinação que variaram de 0,3158 a 0,7631. De acordo com DEGHAID et al. (2001), estudando a correlação do NDVI com a cultura do amendoim, existe correlação positiva entre a refletância do dossel das plantas, expressa em valores de NDVI e a cobertura vegetal das culturas, encontrando um coeficiente de determinação de 0,8270 no estudo realizado.

As regressões entre a produção de fitomassa seca e o NDVI observado nos sistemas de plantas de cobertura do solo se encontram na Figura 3.

Figura 3 – Análise de regressão entre a produção de fitomassa seca e NDVI em dez sistemas de plantas de cobertura do solo



Todos os tratamentos analisados apresentaram regressões polinomiais de segundo grau significativas, sendo que o tratamento E apresentou forte correlação entre o NDVI e a MMS coletada ($r^2=0,7631$), enquanto em AP+E houve correlação moderada a forte ($r^2=0,6421$),

evidenciando que o índice testado é muito eficiente para estimar a quantidade de palhada produzida por estas PCs (Figura 3), dado que o NDVI apresenta associação significativa com a biomassa verde das plantas (PONZONI & SHIMABUKURO, 2007; FONTANA et al., 2015), fundamental para mitigar o processo de degradação do solo e manter a qualidade do mesmo (COSTA et al., 2009; BEUTLER et al., 2014).

Os tratamentos AP, AB, AP+NF, TB e P apresentaram correlação moderada entre o NDVI observado e a MMS produzida por estes sistemas, mostrando que esta ferramenta pode ser utilizada nestas PCs com certos ajustes ou até mesmo com novos testes em diferentes épocas de leituras. Destaca-se que no sensoriamento remoto, o uso de funções exponenciais é comum para expressar a relação da variável indicadora com o NDVI (LIU, 2006).

Já nos tratamentos AZ, NF e o consorciamento AP+NF+E, houve correlação fraca à moderada, variando de 0,3158 à 0,3955, não sendo o NDVI indicado na determinação da MMS produzida por estes três sistemas. Devido ao SPD no sul do Brasil encerrar o ciclo das culturas de verão geralmente nos meses de março a abril, as PCs de inverno são semeadas na primeira quinzena de maio, sendo dessecadas em agosto para o plantio de milho, ou outubro para o plantio de soja, fazendo com que as coberturas AZ e NF já se encontrem em senescência ou até mesmo em florescimento, como foi o caso das mesmas, dificultando as leituras de NDVI, o que sugere a realização de leituras em diferentes épocas essencialmente nessas duas culturas, de modo a evitar que a presença de flores ou de o fim de ciclo possam interferir negativamente nos resultados, permitindo a utilização do NDVI para estimar a MMS produzida por estas.

Quanto ao consorciamento AP+NF+E, provavelmente obteve uma correlação baixa pelo mesmo fato citado anteriormente em relação à comparação de diferentes PCs, não devendo ser analisadas de forma conjunta, possivelmente impossibilitando a utilização do NDVI nesse sistema de forma adequada, visto que as plantas são semeadas juntamente.

6.6 CONCLUSÕES

O NDVI foi capaz de determinar a fitomassa seca produzida de forma adequada ou satisfatória em sete dos dez sistemas analisados, sendo uma ferramenta que pode ser utilizada para estes fins nestes sistemas.

A presença de flores visíveis no dossel e a senescência natural atrapalharam a leitura de NDVI nos sistemas de plantas de cobertura do solo AZ e NF.

Não se recomenda a utilização deste índice para determinar a fitomassa produzida por consorciamento onde há a presença de três ou mais plantas, visto que o sensor não obteve bons resultados na estimativa da fitomassa produzida por diferentes plantas em conjunto.

6.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEUTLER, A. N. Manejo do solo, palha residual e produtividade de arroz irrigado por inundação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 3, p. 1153-1162, 2014.

CARVALHO, W. P. et al. Desempenho agrônomo de plantas de cobertura usadas na proteção do solo no período de pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 2, p. 157-166, 2013.

CARVALHO, A. M.; AMABILE, R. F. Plantas condicionadoras de solo: interações edafoclimáticas, uso e manejo. In: CARVALHO, A. M. de; AMABILE, R. F. (Ed.). **Cerrado: adubação verde**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2006. 369 p.

COSTA, A. et al. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 235-244, 2009.

CRUSIOL, L. G. T. et al. NDVI de estádios de desenvolvimento da soja BRS 284 em condições de campo. In: VIII Jornada Acadêmica da Embrapa Soja. **Anais...** Londrina: Embrapa Soja, 2013. p. 85-89.

DEGHAI, J. et al. Correlação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e características agrônômicas da cultura do amendoim. In: XLII Congresso Brasileiro de Engenharia - CONBEA 2013. **Anais...** Campo Grande: SBEA, 2013. Não paginado.

DONEDA, A. et al. Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1714-1723, 2012.

FONTANA, D. C. et al. Inferências sobre o calendário agrícola a partir de perfis temporais de NDVI/MODIS. **Bratantia**, Campinas, v. 74, p. 000-000, 2015.

GROHS, D. S. et al. Validação de modelo para predição do potencial produtivo de trigo com sensor óptico ativo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 4, p. 446-449, abr. 2011.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2006. 908 p.

MARCELO, A. V. et al. Crop sequences in no-tillage system: Effects on soil fertility and soybean, maize and rice yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 417-428, 2009.

MENESES, P. R.; ALMEIDA T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: Universidade de Brasília, 2012. 266 p.

OLLINGER, S. V. **Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants**. *New Phytologist*, v. 189, p. 375-394, 2011.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. São Paulo: Esalq, 1985. 467 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese. 2007. 127 p.

RISSO, J. et al. Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1317-1326, 2012.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: III Earth Resources Technology Satellite Symposium. **Anais...** Washington: NASA, 1973. p. 309-317.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SIMÕES, C. R. et al. Imagens multiespectrais para avaliação de índice de área foliar e massa seca do capim 'Tifton 85', sob adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 4, p. 697-703, 2015.

ZIECH, A. R. D. et al. Plantas de cobertura do solo na melhoria do Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 141, p. 28-36, 2014.

7 DISCUSSÃO

Os instrumentos proporcionados pela agricultura de precisão facilitaram a compreensão da dinâmica dos indicadores de qualidade do solo nos diferentes sistemas de culturas de inverno testados, servindo como ferramenta valiosa na definição e indicação de Planos de Manejo Inteligentes (PMI). O uso de mapas temáticos dos atributos do solo podem ser considerados ferramentas indispensáveis na propriedade rural, visando identificar e resolver os problemas anteriormente visados nos mapas de colheitas, almejando aumentar a rentabilidade de todos os talhões das áreas produtivas, sendo uma solução eficiente, racional, sustentável e principalmente de baixo custo.

Os dados obtidos no Artigo I, foram capazes de revelar de forma mais tangível a dinâmica espacial dos atributos físicos do solo após três anos de uso dos mesmos sistemas de culturas de inverno, evidenciando, por exemplo, quais sistemas provocam problemas como maior compactação, menor porosidade e menor agregação do solo, além de ser possível visualizar os meios pelos quais os sistemas passam durante o processo de degradação ou melhoria da qualidade física do solo. Da mesma forma que no Artigo I, no Artigo II pode-se observar que o efeito dos sistemas não são homogêneos, e tão menos permanecem iguais em profundidade, sendo possível afirmar que cada sistema possui efeitos benéficos ou maléficos pontuais ou generalizados, conforme as limitações e alcances do sistema radicular, principalmente. A exemplo disso, pode-se constatar que o nabo forrageiro (NF) não descompacta o solo na camada de 0,00 - 0,10 m, mas como se justifica isto, sendo que este é considerado um sistema utilizado justamente para este fim? Em análise mais profunda, foi constatado que sua camada de maior efeito na redução do adensamento edáfico se encontra exatamente na camada de maior limitação as plantas dos solos agrícolas (0,10 - 0,15 m), sendo destacável e justificável seu uso, justamente por este fato, sendo possível compreender melhor a dinâmica do funcionamento de cada sistema, através das ferramentas utilizadas neste trabalho.

Pode-se ver nos artigos I e II, que embora os sistemas de monoculturas de gramíneas possam por vezes - de forma isolada - diminuir o adensamento do solo, aumentar a profundidade da camada crítica ao crescimento de raízes, ou até mesmo apresentar valores de atributos químicos como K ou MOS elevados, estes sistemas devem ser rotacionados ou consorciados com outras espécies de plantas ao longo do tempo, visto a seu raio de atuação no solo ser limitado pelo tipo de raiz que possui, ou até mesmo pela baixa relação C/N ou C/P, causando até mesmo imobilização acentuada de alguns nutrientes no solo, podendo ainda

diminuir teores de P, $\text{pH}_{\text{água}}$, Ca, Mg, CTC e da saturação por bases, além de limitar o fornecimento de um macronutriente importante ao sistema, o N.

As ferramentas de agricultura de precisão também propiciaram um conhecimento mais detalhado da ecologia e do comportamento da biologia do solo, podendo estabelecer relações com outros fatores que podem alterar as produtividades agrícolas. Ainda, foi possível constatar no Artigo III, o que vários trabalhos já vem trazendo, a utilização eficiente de bioindicadores de qualidade ou estresse do solo, a exemplo das minhocas e das formigas, visto que estas indicaram produção elevada de resíduos culturais e alta biodiversidade, e baixa produção de palhada e alta dominância de uma ordem só, respectivamente.

De forma geral, no artigo IV, que reuniu os dados obtidos nas camadas de 0,00 - 0,10 m dos três artigos iniciais, constatou-se que embora alguns sistemas possuam melhorias pontuais ou até mesmo generalizadas em determinadas funções no solo, a exemplo do pousio invernal (PO), que promove uma das melhores condições as plantas no que diz respeito ao suprimento de nutrientes, devem-se observar mais atentamente os resultados/benefícios destes sistemas de forma mais compacta e conjunta, visto que se fosse escolhido este sistema, as demais funções principais do solo estariam seriamente comprometidas dentro de pouco tempo, devendo ser realmente extinto das lavouras do sul do Brasil.

Através do índice de qualidade do solo (IQS) proposto no artigo IV, viu-se que os sistemas ApNFE, ApE e NF se destacaram como os promotores de melhor qualidade do solo, com o primeiro se destacando de forma interessante como benéfico as quatro funções principais do solo estabelecidas. Todavia, assim como os sistemas ApE e NF, os demais não devem ser menosprezados e nem evitados, ao passo que o problema nas lavouras possam ser solvidos casando sistemas que melhorem os atributos justamente limitantes nessas áreas, surtindo efeito até melhor que o sistema ApNFE, por exemplo. Com base nos dados, assim que identificado em determinado talhão da lavoura, que o problema seja de RP ou Ds elevado, por que não alocar NF ou até mesmo AZ nestas áreas? Ao contrário do que se pode pensar, com base nos resultados generalizados de IQS, estes podem sim sanar este gargalo encontrado na lavoura, visto que são excelentes plantas no aspecto de condicionamento do solo - diminuem RP e Ds - e promoção do crescimento radicular em profundidade (CRAD).

Ainda, considerou-se o método de utilização do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), apresentado no Artigo V, como capaz de determinar a matéria seca produzida pelos sistemas de culturas de inverno, sendo uma ferramenta prática que pode auxiliar no monitoramento da produção de palhada dos sistemas, embora tenha apresentado falhas nas leituras de sistemas como AZ e NF devido a senescência natural ou presença de

flores visíveis no dossel. Este trabalho não recomenda a utilização do NDVI para determinar a matéria seca produzida por sistemas consorciados, devido a este não apresentar boas correlações nestes casos. Por fim, recomenda-se a futuros trabalhos que mais leituras sejam efetuadas durante o ciclo das plantas de cobertura, de modo a avaliar qual o momento proporciona maior relação com a produtividade final de matéria seca por casa sistema.

Desta forma, pode-se concluir que dos objetivos gerais aos mais específicos deste trabalho foram atingidos, visto as respostas obtidas nos cinco artigos que esta dissertação propôs, visando entrar mais a fundo na indicação do manejo multi-plantas, tornando a proposição de PMI mais fundamentada e especializada, além de demonstrar toda a importância que esta prática eficiente e barata possui na realidade agrícola sul brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNARDI, A. C. C. et al. Variabilidade espacial de parâmetros físico-químicas do solo e biofísicos de superfície em cultivo do sorgo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 6, p. 623-630, 2014.

BERNARDI, A. C. C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014. 596 p.

BERNARDI, A. C. C. et al. Estratégias de comunicação em agricultura de precisão. **Perspectivas em Ciência da Informação**, Belo Horizonte, v. 20, n. 1, p. 189-200, jan./mar. 2015.

CORASSA, G. M. **Técnicas de Agricultura de Precisão aplicadas à avaliação da distribuição espacial da fauna edáfica em Sistema Plantio Direto**. 2012. 45 p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen. 2012.

CORASSA, G. M. **Manejo por ambiente: atributos de solo e desempenho de cultivares de soja**. 2015. 124 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2015.

EITELWEIN, M. T. **Definição de estabilidade produtiva e relação com atributos de solo em áreas manejadas com Agricultura de Precisão**. 2013. 90 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2013.

FREITAS, D. A. C. et al. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 417-428, jul./set. 2012.

MAIA, C. E. Qualidade ambiental em solo com diferentes ciclos de cultivo do meloeiro irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 4, p. 603-609, abr. 2013.

MELLONI, R. et al. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2461-2470, 2008.

MELO FILHO, J. F de. et al. Índice de qualidade em um latossolo amarelo coeso cultivado com citros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 04, p. 1168-1177, 2009.

MENEGATTI, L. A. A. et al. Estudo de caso sobre investimento agrícola: oportunidades com agricultura de precisão. **ALCOOLbrás**, São Paulo, v. 95, p. 78-85. ago. 2005.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, p. 83-92, 2002.

RESENDE, A. V.; VILELA, M. F. Avaliação geral, resultados e perspectivas do uso de agricultura de precisão em culturas anuais. In: INAMASU, R. Y. et al. (Eds.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 135-137.

SANA, R. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 10, p. 994-1002, 2014.

SANTI, A. L. et al. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. v. 47, n. 9, p. 1346-1357, set. 2012.

SANTI, A. L. et al. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 3, p. 510-515, 2013.

SANTI, A. L. et al. Multifuncionalidade de biomassas de cobertura do solo e agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 137-138, p. 16-23, 2014.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J. P. A. R. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás – Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 4, p. 689-698, jul./ago. 2015.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 743-755, jul./ago. 2009.

ZHAO, C. et al. A harvest area measurement system based on ultrasonic sensors and DGPS for yield map correction. **Precision Agriculture**, v. 11, p. 163-180, 2010.