

**UNIOESTE
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA SOB PLANTAS DE
COBERTURA**

DIEGO DOS SANTOS

**CASCAVEL
2010**

DIEGO DOS SANTOS

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA SOB PLANTAS DE
COBERTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Godoy de Souza

Co-orientadora: Prof^ª. Dra. Lúcia Helena Pereira Nóbrega.

Cascavel - Paraná - Brasil
Fevereiro - 2010

Santos, Diego dos
S237 Atributos físicos do solo e produtividade da soja
sob plantas de cobertura. / Diego dos Santos. –
Cascavel, 2010.
78 f.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Godoy de Souza.
Dissertação(Mestrado) – Universidade Estadual do
Oeste do Paraná – Campus de Cascavel.

1. Solos – Porosidade. 2. Soja - Produtividade. 3.
Geoestatística. 4. Culturas - Rotação. 5.
Variabilidade Espacial. I. Souza, Eduardo Godoy de.
II. Título.

CDD – 631.4
631.43

DIEGO DOS SANTOS

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA SOB PLANTAS DE
COBERTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação “*Stricto Sensu*” em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Godoy de Souza
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof. Dr. Raimundo Pinheiro Neto
Centro de Ciências Agrárias, UEM

Prof. Dr. Miguel Angel Uribe Opazo
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Profª. Dra. Silvia Renata Machado Coelho
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Cascavel, 12 de Fevereiro de 2010

BIOGRAFIA RESUMIDA

Diego dos Santos, natural da cidade de Cafelândia – PR, nascido em 13 de Novembro de 1985. Graduou-se Engenheiro Agrônomo pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná em 2007. Foi professor de ensino médio na disciplina de química no Colégio Atual em Cafelândia – PR durante o ano de 2008. Atualmente é bolsista da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e mestrando em Engenharia Agrícola na área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais e linha de pesquisa em Tecnologia da Produção Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

*“E quando o nó cegar
Deixa desatar em nós
Solta a prosa presa
Luz acesa
Lá se dorme um sol em mi menor
Eu sinto que sei que sou um tanto bem maior”
(Pena - O Teatro Mágico)*

DEDICATÓRIA

À minha família e, de modo especial, à minha mãe, Elza Meurer dos Santos, pelo apoio e cumplicidade durante toda minha caminhada, pois mais importante que tudo é o amor de mãe que compreende, afaga e nos ajuda a suportar todas as dores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a força inspiradora da evolução, à vida, e ao Planeta Terra, por sua generosa e bela acolhida. Aos meus pais, Neuri dos Santos e Elza Meurer, pelo amor, educação e apoio. Agradeço por serem sempre meus guias e grandes amigos em todos os momentos de minha vida. Pela área cedida para realização do estudo e ainda por todas as facilidades prontamente oferecidas;

Às minhas irmãs, Deyzimara e Isabella, pela grande sorte e prazer que tenho em partilhar das suas doces companhias e infinita amizade;

À minha filha, Júlia, por sempre me ajudar a evoluir como ser humano na simplicidade de viver e amar de uma criança;

A todos os meus antepassados, à minha Avó, Natália Meurer, e a toda minha grande família de primos, cunhado, tios e tias pelo apoio e orações;

Ao professor Dr. Eduardo Godoy de Souza e à professora Dra. Lúcia Helena Pereira Nóbrega, pelos conhecimentos transmitidos, orientação, paciência, ajuda, compreensão e amizade durante esses dois anos de convívio e pela disponibilização do Laboratório de Água Solo e Planta (LASP) e o Laboratório de Agricultura de Precisão pertencentes à UNIOESTE, *campus* Cascavel, para a realização das análises;

Aos professores Dr. Miguel Angel Uribe Opazo e Dr. Erivelto Mercante, pelos conhecimentos transmitidos durante a realização dos créditos, colaboração e disponibilização do GPS para realização do trabalho. Às professoras Dra. Sílvia Renata Machado Coelho e Dra. Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa, pela colaboração e carinho;

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), *campus* de Cascavel, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela possibilidade de realização deste curso;

Aos amigos que, sob sol ou chuva, muito me ajudaram, nas avaliações em campo: Narciso Guedes, Wesley Cardoso, Júnior Campestrini, Jhoanini Soares e Ricardo Cardoso;

Aos amigos: Grazieli Suszek, Michelle Tonini, Gislaine Piccolo, Carolina Amaral, Márcia Mauli, pela amizade e por toda ajuda nas avaliações em laboratório e Fábio Pacheco também pela ajuda nas avaliações em campo;

Aos amigos(as) Márcia Konopatzki, Márcia Santorum, Daniele Medina Rosa, Eliane Hermes, Fábio Orsatto;

E, aos meus irmãos de república, Cláudio Bazzi e Fernando Nakayama, pela cumplicidade, amizade, paciência e grande ajuda em todos os momentos que precisei, tanto na realização deste trabalho, como na vida pessoal;

Aos amigos que tanto me deram força para prosseguir nos momentos mais difíceis desses dois últimos anos: Caroline Canabarro, Célia Gonçalves, Gracieli Buss, Ricardo Nazario e à psicóloga Leia.

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA SOB PLANTAS DE COBERTURA

RESUMO

A associação dos benefícios do sistema plantio direto e da rotação de culturas com a necessidade de amenizar problemas oriundos da compactação do solo mostra que o uso de plantas de cobertura aparece como um manejo interessante na melhoria da qualidade do solo e conseqüentemente, da produtividade de culturas comerciais. Entretanto, os atributos do solo apresentam dependência espacial, portanto, necessitam de análise geoestatística para detectar a estrutura de dependência dentro da área em estudo. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de plantas de cobertura em manejo de inverno e a variabilidade espacial de porosidade, densidade e teor de água do solo e produtividade da soja. O experimento foi implantado sob delineamento experimental de blocos ao acaso, com três blocos, cinco tratamentos e duas repetições por tratamento. Cada parcela foi uma faixa de 5,1 m de largura e 133 m de comprimento. Os tratamentos foram os cinco manejos de inverno: aveia preta; consórcio 1 (consórcio de nabo forrageiro e aveia preta); consórcio 2 (consórcio entre nabo forrageiro, aveia preta e ervilhaca comum); trigo; e testemunha (permaneceu em pousio durante o inverno). Os dados foram coletados em uma área de 2ha, em duas épocas: antes de cada semeadura e após o manejo dos tratamentos de inverno em que se avaliaram macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade e teor de água do solo, na profundidade de 0 - 0,1 m. O manejo das plantas de cobertura foi realizado com rolo-faca e o trigo colhido com colhedora. A soja foi semeada em toda área no verão e determinada sua produtividade para cada tratamento. Após as análises exploratória e geoestatística, ajustaram-se os modelos teóricos aos semivariogramas para cada atributo por meio da validação cruzada. Para elaboração de cada mapa, consideraram-se os pontos amostrais relativos a cada tratamento de inverno. Então, realizou-se a interpolação dos valores para toda a área, como se em toda área tivesse sido usado o respectivo tratamento. Para comparação dos mapas elaborados para os diferentes tratamentos, utilizou-se o coeficiente de desvio relativo (CDR) sendo a testemunha a referência. Para a avaliação do grau de correlação entre as variáveis, foram utilizados o coeficiente de correlação linear de Pearson e o coeficiente de correlação não-paramétrica de Spearman. Na primeira análise do solo, todas as variáveis apresentaram dependência espacial. Tal fato, entretanto, não foi verificado na segunda análise do solo, na qual, com exceção da produtividade da soja, todas as variáveis apresentaram efeito pepita puro em algum tratamento (exceto para o Consórcio 2). A redução da macroporosidade promoveu os altos valores para a densidade do solo que, por sua vez, diminuíram a capacidade do solo em reter água. As plantas de cobertura utilizadas melhoraram a macroporosidade e porosidade total em algumas regiões dentro da área em estudo. O uso da aveia preta como planta de cobertura foi mais eficiente em manter mais elevado o teor de água do solo e pode ser recomendado em rotação com a soja pelo potencial para diminuição da densidade do solo.

Palavras-chave: variabilidade espacial, porosidade do solo, densidade do solo, rotação de culturas

PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL AND SOYBEAN YIELD UNDER COVER CROPS

ABSTRACT

The benefits of a no-tillage system and crop rotation in order to mitigate soil compaction problems show that the use of cover crops is an interesting management to improve soil quality and therefore crop yield. However, there is a spatial dependence for soil properties, thus it is an important geostatistic analysis to detect the structure of dependence in the studied area. This study aimed at evaluating the cover crops performance in winter management and the spatial variability of porosity, bulk density, water content of soil and soybean yield. The experiment was carried out in a randomized block design with three blocks, five treatments and two replications per treatment. Each plot was averagely 5.1 m wide and 133 m of length. There were five winter managements as treatments: black oat; Consortium 1 (consortium of forage turnip and black oats); Consortium 2 (forage turnip, black oat and common vetch), wheat, and control (remained fallow during the winter). Data were collected in a two hectare area, in two periods: before each sowing and after management of winter treatments to evaluate macro and microporosity, total porosity, bulk/ soil density and water content of soil from 0 - 0.1 m depth. The cover crops management was carried out with a roller-knife and wheat was cropped by a harvester machine. Soybean was sown in the whole area during summertime and determined its yield for each treatment. After exploratory and geostatistic analyses, the theoretical models were set to semivariograms for each attribute by cross-validation. For each map drawing, the sampling points were considered for each winter treatment. Then an interpolation of values for the whole area was done, as if the respective treatment were used in it. For the comparison of maps made for different treatments, it was used the relative deviation coefficient (RDC) by taking the control as standard. Pearson's correlation and Spearman non-parametric correlation coefficients were used to evaluate the correlation degree among variables. In the first soil analysis, all variables showed spatial dependence. This fact, however, was not observed in the second soil analysis, where, except for soybean yield, all variables showed a nugget effect in someone treatment (except for Consortium 2). It was concluded that the reduction of porosity raised high values for the soil density, which, in its turn, decreased soil ability to retain water. The studied cover crops improved macroporosity and total porosity in some regions of this area. Besides, the use of black oats as cover crop was more efficient and kept higher soil water content, so it can be suggested in rotation with soybeans to decrease bulk density.

Keywords: spatial variability, soil porosity, bulk density, crop rotation

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 Geral.....	13
2.2 Específicos	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Sistema Plantio direto	14
3.2 Rotação de culturas	14
3.3 Plantas de cobertura.....	15
3.3.1 Aveia preta.....	17
3.3.2 Nabo forrageiro	17
3.3.3 Ervilhaca comum.....	18
3.3.4 Consórcios	18
3.4 Trigo	18
3.5 Soja	19
3.6 Solo	20
3.6.1 Propriedades físicas do solo	21
3.7 Agricultura de precisão	24
3.8 Sistemas de informações geográficas.....	25
3.9 Mapas temáticos.....	25
3.10 Análise geoestatística	26
3.11 Interpolação	27
4 MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1 Localização do experimento.....	29
4.2 Descrição da área e do material vegetal	29
4.3 Delineamento experimental.....	30
4.4 Instalação e condução do experimento	31
4.5 Avaliações	32
4.5.1 No solo.....	32
4.5.2 Produtividade da soja.....	33
4.6 Análise dos dados.....	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 Avaliações no solo antes da semeadura dos tratamentos de inverno	39
5.2 Avaliação no solo após o manejo dos tratamentos de inverno	44
6 CONCLUSÃO	63
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
9 ANEXOS	73
9.1 Anexo A	73
9.2 Anexo B	74
9.3 Anexo C	75
9.4 Anexo D	76
9.5 Anexo E	77
9.6 Anexo F	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Localização do experimento.....	29
Figura 2	Croqui do delineamento experimental de blocos ao acaso (cada bloco representado por uma cor).....	31
Figura 3	Grade com os pontos de referência (20) das coletas do solo para análises físicas anteriormente à semeadura dos tratamentos de inverno.....	33
Figura 4	Localização dos pontos de referência de coleta (60) para análise física do solo após o manejo dos tratamentos de inverno.....	34
Figura 5	Localização dos pontos de referência (300) para colheita da soja.....	34
Figura 6	Exemplo de elaboração dos mapas temáticos.....	37
Figura 7	Distribuição espacial da (a) macroporosidade; (b) macroporosidade reclassificada; (c) microporosidade; (d) porosidade total; (e) densidade; (f) densidade reclassificada; (g) teor de água do solo.....	42
Figura 8	Distribuição espacial da produtividade da soja (kg ha^{-1}) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.....	48
Figura 9	Distribuição espacial da macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para os tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.....	49
Figura 10	Distribuição espacial da macroporosidade do solo reclassificada ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.....	50
Figura 11	Distribuição espacial da microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.....	51
Figura 12	Distribuição espacial da porosidade total do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.....	52
Figura 13	Distribuição espacial da densidade do solo (kg dm^{-3}) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.....	53
Figura 14	Distribuição espacial da densidade do solo reclassificada (kg dm^{-3}) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.....	54
Figura 15	Distribuição espacial do teor de água do solo (kg kg^{-1}) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.....	55
Figura 16	Mapas temáticos dos desvios relativos (%) para macroporosidade do solo dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.....	59
Figura 17	Mapas temáticos dos desvios relativos (%) para microporosidade do solo dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.....	60
Figura 18	Mapas temáticos dos desvios relativos (%) para porosidade total do solo dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.....	60
Figura 19	Mapas temáticos dos desvios relativos (%) para densidade do solo dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.....	61
Figura 20	Mapas temáticos dos desvios relativos (%) para teor de água do solo dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.....	61
Figura 21	Mapas temáticos dos valores CDR (%) para produtividade da soja dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.....	62
Figura 1A	Semivariogramas ajustados para cada atributo da análise física do solo antes da implantação dos tratamentos no inverno.....	73
Figura 2B	Precipitação média mensal para o município de Cascavel-PR.....	74
Figura 3C	Semivariograma construído com a grade de 12 pontos amostrais e o número de pares utilizado nos cálculos das semivariâncias.....	75
Figura 4D	Semivariogramas ajustados para a produtividade da soja em cada tratamento..	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Atributos químicos do solo na área experimental.....	30
Tabela 2 Estatística descritiva da macroporosidade (Macro, $m^3 m^{-3}$), microporosidade (Micro, $m^3 m^{-3}$) porosidade total (PT, $m^3 m^{-3}$), densidade ($kg dm^{-3}$) e teor de água do solo ($kg kg^{-1}$)	39
Tabela 3 Índice de comparação de erros (ICE) para seleção do melhor modelo teórico	40
Tabela 4 Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais.....	40
Tabela 5 Estatística descritiva básica da macroporosidade ($m^3 m^{-3}$), microporosidade ($m^3 m^{-3}$) porosidade total ($m^3 m^{-3}$), densidade ($kg dm^{-3}$) e teor de água do solo ($kg kg^{-1}$) dos valores preditos após interpolação por krigagem ordinária	41
Tabela 6 Coeficientes de correlação linear de Pearson para macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT), densidade e teor de água do solo	43
Tabela 7 Coeficientes de correlação não-paramétrica de Spearman para macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT), densidade e teor de água do solo	44
Tabela 8 Estatística descritiva da macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade, teor de água do solo e produtividade da soja para os tratamentos de inverno: aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha	45
Tabela 9 Índice de comparação de erros (ICE) para seleção do melhor modelo teórico	47
Tabela 10 Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para a produtividade da soja para os tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.....	47
Tabela 12 Valores médios dos coeficientes de desvio relativo (CDR, %) para os mapas da macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade, teor de água do solo e produtividade da soja para os tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.....	55
Tabela 13 Porcentagem da área correspondente aos valores de desvios relativos instantâneos.....	57
Tabela 1E Massa seca na primeira (quando as coberturas foram manejadas; MS1) e segunda (quando o solo foi coletado, MS2) amostragem dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha (1).....	77
Tabela 2F Estatística descritiva básica dos valores dos desvios relativos para a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, teor de água do solo e produtividade da soja para os tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo	78

1 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto tem sido bastante difundido no Brasil graças aos seus benefícios na conservação do solo, bem como pela diminuição dos custos de produção em relação ao sistema convencional de cultivo. Mas, apesar do solo ser submetido ao menor tráfego de máquinas, ele não é revolvido, portanto tende à compactação superficial, principalmente em solos com elevados teores de argila. A compactação afeta adversamente o solo, em particular como fonte armazenadora de água e nutrientes e tem sido verificada pelo aumento da densidade e microporosidade do solo, bem como da diminuição quanto à porosidade total e, principalmente, à macroporosidade. Assim, esses atributos podem ser utilizados como indicadores da qualidade do solo de acordo com o manejo ao qual é submetido.

Ao se aliarem os benefícios do sistema plantio direto e da rotação de culturas à necessidade de amenizarem-se problemas oriundos da compactação do solo, o uso de espécies de plantas com sistema radicular vigoroso, boa cobertura e matéria orgânica para o solo aparece como proposta de manejo visando à melhoria não apenas das condições físicas, mas também químicas e biológicas do solo e controle de plantas invasoras.

Em geral, a partir da comparação dos tratamentos, os princípios básicos da experimentação consideram que a variabilidade do solo ocorre de forma inteiramente aleatória e independente. Entretanto, estudos têm relatado que os atributos do solo apresentam dependência espacial e necessitam, portanto, de análise geoestatística para detectar a estrutura dessa dependência dentro da área em estudo.

Assim como as pesquisas de manejos que melhoram a qualidade do solo e, conseqüentemente, aumentam a produtividade de culturas comerciais, o estudo sobre a distribuição espacial, tanto das características físicas do solo como da produtividade das culturas comerciais, é importante no contexto agrônomo e ambiental. Dessa forma, é possível realizar o mapeamento das características do solo, localizar áreas de menor ou maior produtividade e proporcionar manejo adequado, conforme a variabilidade espacial dessas características.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o desempenho de plantas de cobertura em manejo de inverno nas propriedades físicas do solo e produtividade da soja.

2.2 Específicos

- Avaliar a variabilidade espacial quanto à porosidade, densidade e ao teor de água do solo;
- Avaliar a variabilidade espacial da produtividade da soja e
- Avaliar a correlação entre as propriedades físicas do solo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistema Plantio direto

O sistema plantio direto foi iniciado, no Brasil, há cerca de 30 anos e ampliado de forma mais efetiva nos últimos 15 a 20 anos. Fundamenta-se na produção de grande quantidade de massa vegetal para cobertura do solo, visando à prevenção da erosão hídrica, à conservação e melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo e ao aumento de sua capacidade de armazenamento de água. As culturas predominantes no Sul do Brasil incluem soja e milho no verão, aveia preta e trigo no inverno. A sequência, periodicidade de uso e a adequação dessas culturas variam de produtor para produtor (SILVA et al., 2006).

Segundo a Embrapa (2006a), o sistema plantio direto é a melhor alternativa para reverter a situação de degradação gerada pelo cultivo convencional. Desde que seja adotado de modo correto, apresenta vantagens sobre os sistemas que revolvem o solo, tais como a diminuição da erosão, melhoria dos níveis de fertilidade do solo, principalmente de fósforo, manutenção ou aumento da matéria orgânica, redução dos custos de produção (menor desgaste de tratores e maior economia de combustível, em razão da ausência das operações de preparo), melhor racionalização no uso de máquinas, implementos e equipamentos, haja vista possibilitar que as diferentes culturas sejam implantadas nas épocas indicadas e, finalmente, que ocorra estabilidade na produção e melhoria de vida do produtor rural.

O grande diferencial do sistema plantio direto reside na sua capacidade de preservar ou aumentar a matéria orgânica do solo, pelo não revolvimento do mesmo e manutenção de cobertura por resíduos vegetais com o uso de sistemas de rotação de culturas incluindo as plantas de cobertura. A matéria orgânica influencia diretamente um grande espectro de propriedades do solo, como: a capacidade de troca de cátions, a capacidade de armazenamento de água, a estabilidade estrutural e a atividade e diversidade biológica (FRANCHINI et al., 2007). Conforme Muzzilli et al. (2006), os pilares de sustentação do plantio direto baseiam-se no revolvimento mínimo do solo (apenas nos sulcos de semeadura), na diversificação de culturas (rotação de culturas comerciais com plantas de cobertura), na cobertura vegetal permanente e na adoção de métodos integrados para o controle de plantas invasoras, pragas e doenças.

3.2 Rotação de culturas

A necessidade da produção de alimentos para uma população crescente, sem causar degradação ambiental, aumenta a demanda por mais conhecimento das variáveis

envolvidas no sistema de produção. Muitas vezes, o processo de empobrecimento do solo, quando submetido a qualquer sistema de produção agrícola, é causado por um desequilíbrio entre o que é colocado e o que é retirado do solo. Além disso, a perda de matéria orgânica, devido ao cultivo sem restauração, pode dar início a processos de degradação física dos solos. Isso geralmente começa com alguns danos à estrutura do solo, pois há o impedimento do fluxo da água e do ar e termina com a desertificação da área (VIEIRA; GONZALEZ, 2003).

A rotação de culturas consiste na alternância de espécies vegetais, no correr do tempo, numa mesma área agrícola. As espécies escolhidas devem ter propósito comercial e de manutenção ou recuperação do meio ambiente. Para a obtenção de máxima eficiência da capacidade produtiva do solo, o planejamento de rotação deve considerar, além das espécies comerciais, aquelas destinadas à cobertura do solo, que produzam grandes quantidades de biomassa, cultivadas quer em condição solteira ou em consórcio com culturas comerciais (EMBRAPA, 2006a).

Da mesma forma, Silva et al. (2006) destacaram que para a sustentabilidade do sistema plantio direto é fundamental sua associação a um sistema de rotação de culturas que produza adequada quantidade de resíduos culturais na superfície do solo. Dentre as vantagens do uso de sistemas apropriados, destacam-se a estabilidade de rendimento de grãos, por meio da quebra do ciclo de pragas, moléstias e diminuição da infestação de plantas invasoras, bem como a reciclagem de nutrientes com o uso de espécies com diferentes sistemas radiculares, na manutenção ou melhoria das condições físicas do solo.

Contudo, um importante componente a ser considerado como limitante ao uso da rotação de culturas diz respeito ao pragmatismo do produtor rural, que é o de avaliar somente os resultados de uma safra isolada, perdendo assim a oportunidade de entendimento do sistema como um todo. Além da não observação detalhada dos efeitos favoráveis da rotação de culturas no solo e, principalmente, ao longo do tempo, na racionalização do uso dos insumos e conseqüentemente, na diminuição dos custos de produção (MEDEIROS; CALEGARI, 2006).

3.3 Plantas de cobertura

O uso de plantas de cobertura corresponde à utilização de plantas em rotação, sucessão ou consorciadas em cultivos. Esse também tem a finalidade de proteção superficial, manutenção e melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, inclusive a profundidades significativas, graças aos efeitos de suas raízes. Tais plantas promovem melhor equilíbrio e maior produção de biomassa, com o conseqüente aumento do potencial produtivo do solo (CALEGARI, 2006).

Espécies produtoras de grande quantidade de palha e raiz promovem a melhoria do solo nos seus atributos físicos e biológicos, além de favorecerem o sistema plantio direto, a reciclagem de nutrientes e estabelecer o aumento da proteção do solo contra a ação dos agentes climáticos. A diversificação da cobertura vegetal constitui-se em processo auxiliar no controle de plantas invasoras ocorrentes na soja, principalmente nos primeiros anos de implantação da semeadura direta (EMBRAPA, 2006a). Penteado (2007) destacou que são múltiplos os benefícios ao solo, pois melhoram sua estrutura, fornecem nutrientes essenciais, conservam a umidade e favorecem a flora e fauna microbiana.

Os resíduos das plantas, pelo efeito da massa vegetal na superfície ou das raízes no perfil do solo contribuem para o aumento da capacidade de retenção de água, aumento da porosidade do solo, melhor aeração, menores perdas de água por evaporação devido ao efeito da cobertura morta na superfície e diminuição da densidade do solo pelo efeito da matéria orgânica (CALEGARI, 2006).

Rosa et al. (2009), ao trabalharem com plantas de cobertura, demonstraram que os tratamentos não interferiram de forma negativa na cultura do milho, sendo alternativa para o manejo integrado de espécies na prática de adubação verde de verão e rotação de culturas no sistema plantio direto. Carvalho et al. (2004), ao estudarem adubos verdes na primavera, verificaram que esses não influenciaram a produtividade da soja em sucessão, tanto quando deixados sobre o solo, sob plantio direto, como quando incorporados sob sistema de preparo convencional.

Kubo et al. (2007) destacaram que houve tendência de que a produtividade da soja, após as culturas de trigo, aveia branca e aveia preta, com e sem adubação nitrogenada, apresentasse valores absolutos maiores do que aquele obtido no tratamento em pousio, apesar de não se observar diferença significativa. Tal diferença pode estar relacionada com a reciclagem de nutrientes, que pode ter influenciado na maior disponibilidade desses para a cultura da soja.

Lopes et al. (2007a), ao avaliarem plantas de cobertura na rotação de cultura, concluíram que as coberturas influenciaram na produtividade das plantas de soja, e o consórcio aveia preta/milheto mostrou ser uma opção viável de cobertura de solo, aumentando a produtividade da soja. Além das coberturas vegetais promoverem melhorias no solo com redução da compactação em algumas de suas camadas. Da mesma forma, mas para a cultura do feijão, Nunes et al. (2006) obtiveram maiores rendimentos com a utilização de gramíneas, como plantas de cobertura para o sistema de plantio direto.

Assim, o uso de plantas de cobertura tem sido avaliado e recomendado por alguns autores, porém, é necessária a escolha da espécie adequada, principalmente quanto à uniformidade de crescimento e características edafoclimáticas de cada região (SEVERINO; CHRISTOFFOLETI, 2004).

3.3.1 Aveia preta

A aveia preta (*Avena strigosa* Scherb) é uma planta anual da família Poaceae. É a espécie mais cultivada como cobertura de inverno no Sul do Brasil, pois antecede os cultivos de milho e soja, em sistema plantio direto. Entre as causas determinantes do seu intenso uso destacam-se: alto rendimento de matéria seca, facilidade de aquisição de sementes e implantação, rusticidade, rapidez de formação de cobertura, decomposição lenta e ciclo adequado (SILVA et al., 2006).

Como planta de cobertura, protege o solo, pois o cobre rapidamente, bem como melhoram as características físicas (raízes e resíduos da parte aérea) e químicas (reciclagem de nutrientes) do solo. Apresentando elevados efeitos supressores alelopáticos sobre muitas invasoras, diminuindo os custos com capina e herbicidas (CALEGARI, 2006). A aveia fornece biomassa rica em nutrientes, principalmente o potássio, que pode favorecer o solo em um programa de rotação de culturas (PENTEADO, 2007). É empregada como regeneradora da sanidade do solo, pois diminui a população de patógenos, além de aumentar os rendimentos das culturas de verão (CALEGARI et al, 1992).

3.3.2 Nabo forrageiro

A brassicácea nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) é uma planta anual, cuja área cultivada aumentou significativamente no outono/inverno no Sul do Brasil (GIACOMINI et al., 2004) e que apresenta, entre outras vantagens, o desenvolvimento inicial muito rápido, alto rendimento de matéria seca e ciclo curto (SILVA et al., 2006). Tem elevada capacidade de reciclagem de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, o que a torna uma importante espécie em esquema de rotação de culturas. Por ter decomposição rápida, geralmente é consorciada com aveia, centeio, ervilha forrageira ou ervilhaca (CALEGARI, 2006).

É uma planta muito vigorosa, com sistema radicular pivotante e agressivo, capaz de romper camadas de solo extremamente compactadas a profundidades superiores a 2,5 m. Apresenta, ainda, características alelopáticas muito acentuadas que lhe conferem a condição de inibir a emergência e o desenvolvimento de uma série de invasoras indesejáveis (PENTEADO, 2007). Dentre os benefícios adicionais da adubação verde com nabo, incluem-se: a probabilidade reduzida de erosão através da melhoria da estrutura dos agregados e uma melhor cobertura do solo (KUBOTA et al., 2005).

3.3.3 Ervilhaca comum

Silva et al. (2006) destacaram as espécies da família das Fabáceas de inverno, como a ervilhaca comum (*Vicia sativa*), por possuírem capacidade de fixar nitrogênio atmosférico pela simbiose com bactérias específicas e aumentarem a disponibilidade desse nutriente no solo. A ervilhaca comum desenvolve-se em solos corrigidos ou já cultivados, com bons teores de cálcio, fósforo e sem problemas de acidez. É recomendada para o cultivo em rotação de culturas, além de promover grande disponibilidade de nitrogênio às culturas sucessoras.

Proporciona uma boa cobertura do solo e é considerada como planta melhoradora das características físicas, químicas e biológicas do solo. Por ser geralmente de hábito trepador, o cultivo da ervilhaca comum poderá ser consorciado com aveia, tremoço, centeio, azevém entre outras (CALEGARI et al., 1992).

3.3.4 Consórcios

Cada espécie cultivada como cobertura de solo no inverno apresenta vantagens e desvantagens para o sistema plantio direto quando cultivada isoladamente. Assim, torna-se difícil a recomendação de uma espécie que reúna somente aspectos desejáveis. O uso de sistemas consorciados de culturas pode formar camadas de coberturas de solo mais próximas do ideal, com benefícios para o rendimento da cultura sucessora e para o sistema semeadura direta (SILVA et al., 2006). Consórcios de aveia preta e ervilhaca, e entre aveia preta, azevém, centeio, ervilhaca e nabo forrageiro conferem elevado acúmulo de massas fresca e seca como destacaram Balbinot et al. (2004), ao estudarem o desempenho de plantas invernais na produção de massa e cobertura do solo sob cultivos isolado e em consórcios.

Nicoloso et al. (2008) atribuíram maior rendimento da soja nos tratamentos onde havia sido implantado o consórcio de aveia preta e nabo forrageiro à interação entre a maior cobertura de solo, proporcionada pela elevada produção de fitomassa, melhores condições físicas e maior infiltração de água no solo comparado com tratamentos utilizando somente aveia-preta.

3.4 Trigo

O trigo (*Triticum aestivum*) é uma planta de ciclo anual, cultivada durante o inverno e a primavera. O grão é consumido na forma de farinha, pão, massa alimentícia, bolo e biscoito. É, usado também como ração animal, quando não atinge a qualidade exigida para consumo humano (EMBRAPA, 2009). Segundo Manfron et al. (1993), os trigos cultivados

no Brasil pertencem ao grupo denominado “trigos de primavera”. Essas cultivares têm ciclo total aproximado entre 100 e 130 dias, não necessitam de frio para o desenvolvimento da espiga e são indiferentes ao fotoperíodo.

O trigo ocupa o primeiro lugar em volume de produção mundial. No Brasil, a produção anual oscila entre 5 e 6 milhões de toneladas e é cultivado nas regiões Sul (RS, SC e PR), Sudeste (MG e SP) e Centro-oeste (MS, GO e DF). O consumo anual no País tem se mantido em torno de 10 milhões de toneladas. Cerca de 90% da produção de trigo está no Sul do Brasil. O cereal vem sendo introduzido paulatinamente na região do cerrado, sob irrigação ou sequeiro (EMBRAPA, 2009).

3.5 Soja

A soja (*Glycine max*) é o principal grão oleaginoso cultivado no mundo. Ela participou, em 2006/2007, com cerca de 60% do total de 385 milhões de toneladas de grãos produzidos em nível global pelos principais grãos oleaginosos (soja, girassol, canola, amendoim, algodão, mamona). Seu elevado teor em proteínas (40%) faz dela a principal matéria-prima na fabricação de rações para alimentação de animais domésticos e, apesar do seu baixo teor de óleo (cerca de 19%), disputa com o dendê a posição de maior produtora de óleo vegetal (ROESSING et al., 2007).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja. Na safra 2008/2009, a cultura ocupou área de 21,7 milhões de hectares, o que totalizou a produção de 57,1 milhões de toneladas. O Paraná é o segundo maior produtor brasileiro de soja, posto que obteve a produção de 9,5 milhões de toneladas na safra de 2008/2009, numa área de 4,1 milhões de hectares, com produtividade média de 2337 kg ha⁻¹ (CONAB, 2010).

A necessidade total de água na cultura da soja, para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 e 800 mm ciclo⁻¹, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo, a temperatura ideal para seu crescimento e desenvolvimento está em torno de 30°C. A soja, preferencialmente, deve ser cultivada em sistemas ordenados de rotação de culturas, sempre planejados para deixar os solos cobertos o maior espaço de tempo possível (EMBRAPA, 2006a). Em rotação, aproveita muito bem o efeito residual dos fertilizantes e 50% de sua produção estão relacionados à correção do solo. Podem ser fixados de 17 a 370 kg de nitrogênio ha⁻¹, sendo que cerca de 20 kg são fornecidos pelos nódulos (PENTEADO, 2007).

A absorção de nutrientes é influenciada por diversos fatores, entre eles as condições climáticas como chuvas e temperaturas, as diferenças genéticas entre cultivares de uma mesma espécie, o teor de nutrientes no solo e os diversos tratamentos culturais. As indicações de adubação devem ser orientadas pelos teores dos nutrientes determinados na análise de solo. E a avaliação da necessidade de calagem é realizada a partir da

interpretação dos resultados da análise da camada 0 a 20 cm do solo, ao se aplicar a quantidade necessária para elevar a saturação por bases a 70% (EMBRAPA, 2006a).

3.6 Solo

Os solos agrícolas funcionam como um sistema complexo que retém e fornece água, ar, nutrientes e calor às sementes e plantas. De maneira que é fundamental um ambiente físico favorável ao crescimento radicular, para maximizar a produção das culturas (TORMENA et al, 2002).

Conforme Carvalho et al. (2003), numa paisagem natural, o solo apresenta variabilidade espacial e temporal de seus atributos, resultante da interação de processos que comandam os fatores responsáveis por sua formação. A variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser influenciada pelos seus fatores intrínsecos (fatores de formação, que são o material de origem, relevo, clima, organismos e tempo), e pelos fatores extrínsecos, normalmente empreendidos pelas práticas de manejo do solo (adubação, calagem, dentre outros). Sendo assim, o solo cultivado revela fontes adicionais de heterogeneidade originadas exclusivamente pelo efeito antrópico da agricultura (CASTRIGNANO et al., 2000).

Conforme Vieira e Gonzalez (2003), os princípios básicos da experimentação, estabelecidos por meio do método estatístico clássico, consideram que a variabilidade do solo ocorre de forma inteiramente aleatória, admitindo-se que seus atributos apresentem distribuição de frequência do tipo normal. Entretanto, vários estudos têm relatado que os atributos do solo apresentam intensa dependência espacial, portanto, necessitam de análise geoestatística. A pesquisa da ciência do solo tem se apoiado intensamente na utilização da geoestatística, que juntamente com a estatística clássica formaram uma dupla de extraordinária importância agronômica, decorrente das inúmeras respostas dadas às mais variadas questões existentes que, até então, eram ignoradas (CARVALHO et al., 2003; CAVALCANTE et al. 2007). Para Mello et al. (2006), a variabilidade espacial dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo influencia a eficiência do manejo das culturas e seu desenvolvimento.

A variabilidade espacial dos solos não tem sido devidamente levada em consideração nos processos produtivos da agricultura. Um maior conhecimento da variabilidade espacial da produtividade e das propriedades físicas do solo, bem como o estudo dessa variabilidade, com o passar dos anos (variabilidade temporal), vem se somar ao conhecimento já existente sobre o assunto, o qual, ao ser devidamente disponibilizado para os produtores que adotam a técnica de agricultura de precisão, pode viabilizar uma agricultura moderna, economicamente competitiva e ecologicamente correta (MERCANTE et al., 2003).

3.6.1 Propriedades físicas do solo

As propriedades físicas do solo dizem respeito à capacidade de absorver e reter água, de circular o ar e à facilidade que oferece para a penetração das raízes das plantas (PENTEADO, 2007). A quantificação de atributos, como a densidade e a porosidade do solo, é fundamental para as questões relacionadas ao manejo agrícola do solo e mostram se um solo apresenta condições adequadas para o desenvolvimento e exploração das raízes, bem como indicam se há ou não problemas de compactação no solo (RAMIREZ-LOPEZ et al., 2008; STRUDLEY et al., 2008).

A compactação afeta adversamente o solo, em particular no que tange à fonte e ao armazenamento de água e nutrientes, por meio do aumento crescente da densidade, diminuição da porosidade, aumento da impermeabilidade, diminuição da infiltração de água e da capacidade de retenção de água pelo solo. Esses efeitos adversos reduzem a eficiência dos fertilizantes, retardam a germinação das sementes e conseqüentemente, diminuem a produtividade das culturas, aumentam o escoamento e a erosão do solo trazendo problemas ambientais indesejáveis (GOEDERT et al., 2002; KILIÇ et al., 2004; HAMZA; ANDERSON, 2005; MEGDA et al., 2008). Mas, conforme Suzuki et al. (2007), podem ser observadas respostas diferenciadas do rendimento das culturas com grau de compactação do solo. Os valores de grau de compactação para obtenção dos maiores rendimentos dependem das culturas, das condições climáticas e do tipo de solo.

No sistema plantio direto, o solo é submetido a um menor tráfego, porém, não é revolvido, por isso tende ao adensamento superficial do solo. O adensamento tem sido verificado pelo aumento da densidade do solo e da microporosidade, da diminuição da porosidade total e, principalmente, da macroporosidade. Assim, esses atributos podem ser utilizados como indicadores da qualidade do solo de acordo com o manejo a que o solo é submetido. Uma contínua avaliação, no tempo, dos atributos físicos do solo permite monitorar a eficiência ou não desses sistemas de manejo do solo quando se objetiva estabilidade estrutural (SECCO et al., 2005).

A densidade do solo é de grande importância para os estudos agrônômicos, pois permite avaliar atributos como porosidade, condutividade hidráulica e difusividade do ar, além de ser utilizada como indicador do estado da compactação do solo (KIEHL, 1979). Pela estreita relação com outros atributos, a grande maioria das pesquisas converge para o fato de que, com o seu aumento, ocorre diminuição da porosidade total, macroporosidade, condutividade hidráulica, absorção iônica, o conseqüente aumento da microporosidade e da resistência mecânica à penetração do solo (ROSA FILHO et al. 2009).

A estrutura do solo, como a porosidade e a agregação, afeta sensivelmente a viabilidade para cultivo dos solos argilosos. O número, a continuidade e a distribuição espacial da macroporosidade do solo afetam significativamente os processos hidrológicos,

químicos e biológicos em solos argilosos, assim, moderam a taxa de infiltração de água e secagem do solo após a chuva, com possíveis consequências econômicas e ambientais (ALAKUKKU et al. 2009).

Os limites críticos de densidade do solo, ao se considerarem propriedades como porosidade e condutividade hidráulica do solo ou desenvolvimento e produtividade das culturas, têm sido buscados. No entanto, limites críticos e ideais de densidade do solo para o desenvolvimento das culturas dependem da textura, mineralogia, forma das partículas do solo e da matéria orgânica presente no solo, que afetam a estrutura do solo e conseqüentemente a infiltração de água, ar e resistência mecânica do solo (REICHERT et al., 2009).

Secco et al. (2004), ao estudarem a produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distroférico, concluíram que a compactação do solo influenciou negativamente os valores de densidade do solo, espaço poroso e resistência à penetração do solo na camada de 0-0,10 m de profundidade. E, quando os valores da densidade do solo foram de até $1,51 \text{ kg dm}^{-3}$ e volume de macroporos superiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, em condições de lavoura, não houve comprometimento do rendimento de grãos de soja.

Reichert et al. (2009) sugeriram valores críticos de densidade para Latossolos de textura argilosa sob sistema de plantio direto, com variação de $1,21 \text{ kg dm}^{-3}$, restringindo tanto o crescimento radicular para cultura da soja, até $1,62 \text{ kg dm}^{-3}$, como a produtividade do trigo. E valores críticos de densidade de $1,36$ e $1,39 \text{ kg dm}^{-3}$, para uma macroporosidade de $0,05$ e $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, também restringem o crescimento radicular e a produtividade da cultura da soja.

Da mesma forma, Kiehl (1979) destacou que a macroporosidade está correlacionada com o crescimento das plantas e seus valores ótimos encontram-se entre $0,20$ e $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo que valores superiores são prejudiciais, pois restringem a capacidade de retenção de água do solo, e valores menores que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ prejudicam o desenvolvimento das raízes, a infiltração de água e aeração do solo. E ainda que a amplitude média de variação da densidade aparente para solos argilosos é de $1,00$ a $1,25 \text{ kg dm}^{-3}$, sendo $1,60 \text{ kg dm}^{-3}$ o valor limite acima da qual as raízes não podem penetrar nos solos argilosos.

Conforme Souza et al. (2004), os atributos físicos do solo variam entre pontos relativamente próximos em área de mesma unidade taxonômica, muitas vezes de forma significativa. Desta forma, a pouca eficácia das respostas encontradas somente com as ferramentas clássicas da estatística fez com que a geoestatística tivesse grande aplicação nessa área. Para Schaffrath et al. (2008), essa não uniformidade provavelmente está associada ao sistema de manejo de solo e de culturas adotadas e das características intrínsecas do solo, relacionadas com os fatores e processos de formação.

Vieira e Klein (2007) relataram que dos componentes do manejo, o preparo do solo é a atividade que mais influi no seu comportamento físico, pois atua diretamente na sua

estrutura, causando modificações na porosidade e densidade, que afetam a retenção de água e a resistência mecânica, dentre outros efeitos. Entretanto, as medidas corretivas aplicadas em situações relacionadas com problemas físicos do solo são por meio de práticas de mecanização, em geral realizadas de forma inadequada, pois deixam de lado a inerente dependência espacial das propriedades físicas dos solos (RAMIREZ-LOPEZ et al., 2008).

Uma vez quantificada a dependência espacial, ela pode ser utilizada para a classificação e o levantamento de solos em uma área, assim como na interpolação entre observações. Isso permite o mapeamento da propriedade do solo dentro da área, por meio da krigagem (GONÇALVES et al., 2001), a fim de se identificarem as áreas compactadas e conseqüentemente, haja o manejo localizado do problema (RAMIREZ-LOPEZ et al., 2008).

É difícil sugerir apenas uma prática agrícola como solução ao problema da compactação do solo. Torres e Saraiva (1999) afirmaram que a rotação de culturas com espécies que apresentam sistema radicular vigoroso e profundo, como o guandu, crotalária, aveia preta, tremoço, nabo forrageiro, milho e milheto, auxiliam na redução da compactação e densidade do solo. Lopes et al. (2007b) concluíram que o solo apresentou melhoria de sua condição física pelo acréscimo de porosidade e redução de densidade do solo com o cultivo de aveia preta em consórcio com nabo forrageiro em rotação com milho.

Para Nicoloso et al. (2008), o nabo-forrageiro foi eficiente ao aumentar a macroporosidade do solo, diminuir a resistência do solo à penetração e melhorar a infiltração de água em um Latossolo inicialmente compactado. Kubota et al. (2005) observaram aumento da macroporosidade, de porosidade total e da estabilidade de agregados do solo em áreas que anteriormente receberam nabo forrageiro no inverno em relação àquelas em que foi cultivado trigo. No entanto, Nicoloso et al. (2008) e Kubota et al. (2005), em avaliação realizada após o manejo do nabo forrageiro, não observaram efeito imediato da cultura de cobertura em relação à densidade do solo.

Costa et al. (2009), em experimento com aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca peluda, dentre outras plantas de coberturas, concluíram que a rotação de culturas no sistema plantio direto proporcionou melhorias na densidade, macroporosidade e porosidade total na camada superficial do solo, que é a mais afetada pela compactação nesse sistema.

Hamza e Anderson (2005) sugeriram uma combinação de práticas para abrandar ou retardar o problema de compactação do solo. Tais práticas incluem o plantio direto, o tráfego controlado de máquinas agrícolas, o uso de rotação de culturas que inclua plantas de raízes profundas e fortes capazes de penetrar em solos relativamente compactados. Adição de matéria orgânica vegetal ou animal de fontes externas é igualmente importante para diminuir a densidade da maioria dos solos. E finalmente, as operações de exploração agrícola devem ser realizadas na umidade mínima aceitável do solo.

3.7 Agricultura de precisão

Com o advento da mecanização e o aumento da produção agrícola mundial, o processo de produção agrícola passou a ser objeto de atenção e estudo de diversos pesquisadores, na busca de uma agricultura sustentável, capaz de maximizar a produção de forma racional, com diminuição do uso irracional de insumos (GUEDES et al., 2008). O conceito da agricultura de precisão não é novo, tendo sido praticado já no início da agricultura quando se manejava pequenas áreas, tratando de forma individualizada cada planta ou pequenas áreas manualmente. Com o aumento do tamanho das áreas dos cultivos, esse tipo de tratamento tornou-se praticamente impossível, passando-se a trabalhar as áreas de maneira uniforme, sem se considerar a variabilidade (WERNER, 2004).

A proposta da agricultura de precisão é permitir que se faça aquilo que o pequeno agricultor sempre fez, porém, em larga escala e associar todo o conhecimento acumulado pelas ciências agrárias até hoje. A ideia básica é de que o agricultor possa, inicialmente, identificar as manchas de altas e de baixas produtividades dos talhões atuais e depois possa administrar as diferenças. Para que isso seja possível, é necessário um bom grau de automatização que depende de tecnologias modernas, muitas delas apenas adaptadas para o meio agrícola (MOLIN, 2008).

A adoção da agricultura de precisão se justifica porque a grande maioria dos produtores agrícola considera uniforme o solo de cada área de cultivo e cada talhão pode ter consideráveis variações em seus atributos, tais como variabilidade espacial do tipo de solo, da produtividade, da declividade e da necessidade de nutrientes. Assim, a otimização das quantidades aplicadas de corretivos, fertilizantes, herbicidas, fungicidas, inseticidas e água irrigada pode ajudar a maximização de lucro e a proteger o meio ambiente com a redução do uso indiscriminado e irracional de insumos (JOHANN et al., 2004).

Para Tschiedel e Ferreira (2002), há a necessidade do aumento da eficiência de todos os setores da economia globalizada para manter a competitividade e isso, para a agricultura, não poderia ser diferente. A evolução da informática, tecnologias em geoprocessamento, sistemas de posicionamento global e muitas outras tecnologias estão proporcionando à agricultura uma nova forma de se enxergar a propriedade, deixando de ser uma, mas várias propriedades dentro da mesma, porém com características específicas. Esta mudança é necessária para que se entenda a propriedade não como homogênea mas, que se trate cada parte conforme a sua necessidade, fazendo com que o produtor tenha o conhecimento detalhado em cada parte da linha de produção ou cada metro quadrado da sua propriedade.

Os parâmetros que influenciam a agricultura são variáveis em relação ao tempo e ao espaço. Dada a gama de fatores e parâmetros envolvidos, a agricultura de precisão requer um monitoramento contínuo, espacial e temporal da área estudada. Isso resulta em

um grande volume de dados derivados de sensores ou de observações a campo, a partir de análises laboratoriais (JOHANN et al., 2004).

3.8 Sistemas de informações geográficas

Sistemas de informações geográficas (SIG) são ferramentas que permitem armazenar, analisar, recuperar, manipular e manejar grandes quantidades de dados espaciais. Como o campo de aplicação dos SIG é bastante amplo e diversificado, incluem-se a geografia, agricultura, hidrologia, geologia, geotecnia, meio ambiente, computação, economia, fotogrametria, agrimensura, planejamento urbano e regional, engenharia florestal e outros (SILVA, 2007). Molin (2001) definiu SIG como uma família de programas que permitem armazenar, manipular e mostrar espacialmente os resultados colhidos em campo. Também podem interagir com outros programas para produção de mapas e permitem analisar diversas camadas de dados referentes a um mesmo talhão.

Para Lamparelli, Rocha e Borghi (2001), ao se utilizar o SIG no contexto agrícola, os dados de variabilidade espacial de produtividade para determinada cultura podem ser analisados conjuntamente com outros dados (atributos), para a modelagem de cenários futuros e avaliação da efetividade do manejo monitorado para cada área. Há um grande número de *softwares* adequados para SIG que podem ter diferenças significativas, principalmente, na maneira como representam e trabalham com dados geográficos e a ênfase dada nas várias operações (SILVA, 2007).

3.9 Mapas temáticos

Segundo a *International Cartographic Association*, a definição de mapa temático é: “Um mapa projetado para demonstrar elementos ou conceitos particulares” (DENT, 1985). Esses mapas podem representar diferentes aspectos da vida econômica, social, ambiental, histórica, agrônômica de uma região (ESTEIO, 2009), cuja função é registrar, tratar e comunicar informação. O mapeamento da produtividade ou de atributos do solo compreende a aquisição de informações para a representação, na forma de um mapa, da variabilidade espacial da lavoura (GIMENEZ; MOLIN, 2004).

Quando uma grande quantidade de dados é coletada, como é o caso do mapeamento de colheita, em que são coletados pontos amostrais a cada um ou dois segundos, as técnicas de suavização podem ser utilizadas para que se evidenciem as tendências no mapa. Porém, quando os dados são esparsos, como nas amostragens de solo, são necessárias técnicas de interpolação para a produção de mapas dos componentes da fertilidade ou da textura, por exemplo (MOLIN, 2001).

Para Johann et al. (2004), enquanto na agricultura de precisão os mapas de variabilidade espacial da produtividade são gerados a partir de um conjunto de sensores (ex: de fluxo de massa e de posicionamento espacial), permitindo uma cobertura de toda a área, os dados relativos às variáveis ligadas ao solo são baseados em processos de amostragem. Há, portanto, a necessidade de se gerar uma superfície contínua, expressa em um mapa, por meio de um processo de interpolação digital. Para que se possa estudar a variabilidade espacial, baseada em amostras, é conveniente utilizarem-se técnicas como a geoestatística.

Conforme Miranda (2005), o SIG permite muitas análises espaciais e assim cria a possibilidade de gerar muitos mapas. À medida que aumenta o conjunto de dados disponíveis, cresce também a capacidade de novas análises e novos mapas, sendo possível reclassificá-los e fazer comparações entre mapas. No processo de reclassificação, o SIG reagrupa as classes do mapa original, geralmente por meio de um processo de fusão, em novas classes, para a geração de um novo mapa. Assim, no processo de reclassificação, novos padrões espaciais são criados.

Landis e Koch (1977) consideraram que um método eficiente de comparação entre mapas é fazer uma sobreposição e uma avaliação *pixel-a-pixel*, de modo a identificarem-se as áreas de concordância entre os dois mapas. Para expressar o grau de concordância entre os mapas classificados num único valor, os autores utilizaram o índice kappa. Esse índice assume um valor máximo igual a um, em qual os valores mais elevados representam maior correspondência entre as classes dos dois mapas considerados.

Ainda, visando à comparação de mapas temáticos, Coelho et al. (2009) propuseram o coeficiente de desvio relativo (CDR). Ele expressa a diferença média, em módulo, dos valores interpolados em um mapa temático quando comparado com um mapa assumido como referência. E concluíram que o CDR mostrou-se eficiente na comparação de mapas.

3.10 Análise geoestatística

Antes da análise geoestatística é preciso realizar uma análise exploratória dos dados. Ela compreende a aplicação de métodos da estatística descritiva e inferencial, com o objetivo de conhecer como os atributos estão distribuídos, o tipo de correlação existente entre atributos, verificar a existência de dados inconsistentes e erros (VALENCIA; MEIRELLES; BETTINI, 2004).

A geoestatística possibilita estudar o comportamento da variabilidade espacial, a fim de permitir a interpretação dos resultados com base na estrutura dessa variabilidade, além de poder quantificar seu tamanho (CAVALCANTE et al., 2007). Segundo Lamparelli, Rocha e Borghi (2001), a geoestatística é um conjunto de técnicas que estima valores regionalizados e espacializados de atributos ou características de determinada área a ser

estudada. O sucesso e as suposições das técnicas geoestatísticas estão fundamentadas na teoria das variáveis regionalizadas, desenvolvidas por Matheron (1963).

Fundamenta-se em conceitos básicos da estatística tradicional, mas leva em consideração as coordenadas geográficas dos pontos amostrais e a dependência espacial entre as amostras. A partir da determinação de um gráfico, conhecido como semivariograma, em que se relaciona a distância entre as amostras e a respectiva função semivariância, ajusta-se um modelo teórico que fornece os parâmetros necessários para determinar a estrutura de variabilidade espacial e, posteriormente, a interpolação de valores em qualquer posição na área em estudo por meio da krigagem (ASSUMPÇÃO et al., 2007).

A geoestatística utiliza uma função espacial numérica denominada semivariância, que varia de um local para o outro, dependendo da distância da amostragem, com uma continuidade aparente cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples (MATHERON, 1963). Para o cálculo das semivariâncias, é recomendado o uso de no mínimo 30 pares de pontos em cada distância (*lag*) (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978; GUERRA, 1988; WOLLENHAUPT et al., 1997). Webster e Oliver (1992) recomendam um mínimo de 100 pares para o cálculo das semivariâncias gerar um semivariograma de confiança e permitir estimativas mais exatas através da krigagem. Conforme Gribov, Krivoruchko e Hoef (2010), uma das razões para o uso de 30 pares ou mais é fazer uma suavização pela média, assim, permite-se que a estrutura do semivariograma possa ser detectada com mais facilidade.

O semivariograma é o principal instrumento da teoria das variáveis regionalizadas. Ele quantifica a escala e intensidade da variação espacial e fornece base para uma ótima interpolação por meio do método da krigagem (VENDRUSCULO et al., 2004). O principal estimador utilizado na construção do semivariograma experimental é o dos momentos, conhecido como semivariograma de Matheron, para processos estocásticos gaussianos (FARACO et al., 2008).

3.11 Interpolação

A interpolação é um procedimento de estimação do valor de um atributo em locais não amostrados com base em pontos amostrados na mesma área ou região. Uma interpolação espacial converte dados de observações pontuais em campos contínuos, bem como produz padrões espaciais que podem ser comparados com outras entidades espaciais contínuas. O raciocínio que está na base da interpolação é o de que, em média, valores do atributo tendem a ser semelhantes em locais mais próximos do que em locais mais afastados (MIRANDA, 2005).

Os métodos de interpolação mais comuns e de uso em conjuntos de dados relacionados à agricultura de precisão são: vizinho próximo, média local, inverso da

distância, contorno e krigagem (MOLIN, 2001). Para Yasrebi et al. (2009), krigagem e inverso da distância são dois métodos comumente usados na caracterização da variabilidade espacial e na interpolação de pontos amostrais. E os resultados obtidos na comparação desses dois métodos indicaram a krigagem como o método de interpolação mais adequado. Entretanto, Coelho et al. (2009), ao avaliarem a influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos da produtividade da soja, verificaram que com a diminuição do número de amostras, o interpolador inverso da distância teve melhor desempenho. E recomendaram a krigagem, desde que sejam coletadas amostras em muitos pontos para que um bom semivariograma seja construído.

A krigagem é um dos mais flexíveis e complexos métodos de interpolação e extrapolação de valores para quase todos os tipos de dados. Sua utilização requer o tratamento preliminar dos dados por meio da geração de um modelo de variabilidade espacial denominado de semivariograma. Após a geração desse modelo, a interpolação é feita a partir dos mesmos princípios dos outros métodos (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Cressie (1993) mencionou que a eficiência da krigagem se deve por fornecer um algoritmo dos erros associados aos resultados obtidos, o que, efetivamente, é fornecido pelo método geoestatístico da krigagem, segundo um modelo contínuo de variação espacial.

Segundo Webster e Oliver (1990), a krigagem engloba um conjunto de métodos de estimação como a krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal, cokrigagem, entre outros. A partir da comparação entre os métodos da krigagem simples, ordinária e universal, Goovaerts (1999) explica que cada método tem determinada aplicação, mas que a krigagem ordinária se mostrou com maior facilidade de implantação e gerou melhores estimativas do que a krigagem simples (que considerou inapropriada) e a krigagem universal (utilizada quando os dados apresentam tendências dentro da área em estudo).

As interpolações por krigagem estão fortemente associadas aos modelos de semivariogramas ajustados, que podem ser avaliados por meio da validação cruzada (ROSA FILHO, 2009), considerado o critério mais adequado para a escolha do melhor ajuste conforme Faraco et al. (2008). A validação cruzada, segundo Isaaks e Srivastava (1989), é uma técnica de avaliação de erros de estimativas que permite comparar os valores previstos com os amostrados. O valor da amostra, em certa localização, é temporariamente descartado do conjunto de dados e, então, é feita uma previsão por krigagem no local, usando-se as amostras restantes.

Esse procedimento pode ser visto como um experimento no qual se imita o processo de estimação, ao supor que nunca se toma uma amostra naquela localização. Uma vez que a estimação é feita, pode-se compará-la ao valor da amostra que foi inicialmente removida do conjunto de dados amostrais. Esse procedimento, método de 'deixar um fora', é repetido para todas as amostras disponíveis (FARACO et al., 2008).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização do experimento

O experimento foi conduzido de Junho de 2008 a Abril de 2009 em uma área agrícola localizada no município de Cafelândia, situada na região Oeste do Paraná. A área está localizada na latitude $24^{\circ} 37' 05''$ S e longitude de $53^{\circ} 19' 18''$ O, na altitude média de 550 m. O clima é subtropical úmido e mesotérmico, com média anual de precipitação de 1850 mm e média anual de temperatura entre 18 e 22 °C.

4.2 Descrição da área e do material vegetal

O experimento foi implantado em uma área de 2,03 ha, com 153 m de largura e 133 m de comprimento (Figura 1).

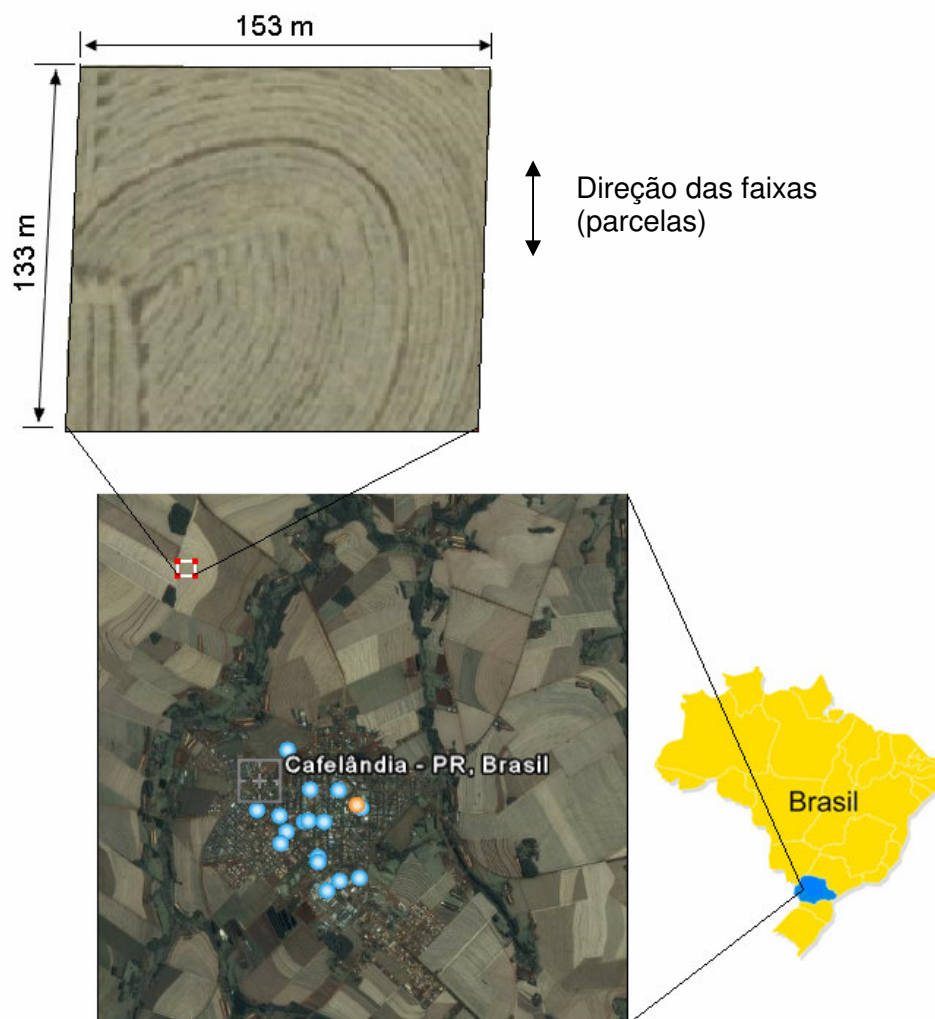


Figura 1 Localização do experimento.
Fonte: Google Earth (2009).

O solo foi caracterizado como Latossolo Vermelho distroférrico (IAPAR/ EMATER-PR, 2008; EMBRAPA, 2006b), com granulometria de: 92; 363 e 545 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente. E foi caracterizado quimicamente conforme Tabela 1, na camada de 0 a 0,20 m de profundidade.

Tabela 1 Atributos químicos do solo na área experimental

⁽¹⁾ P	MO	pH CaCl ₂	V	⁽³⁾ H + Al	⁽²⁾ Al ³⁺	⁽¹⁾ K ⁺	⁽²⁾ Ca ²⁺	⁽²⁾ Mg ²⁺	SB	CTC
(mg dm ⁻³)	(g dm ⁻³)	(0,01 mol L ⁻¹)	(%)	(cmol _c dm ⁻³)						
32,31	37,12	5,27	66,20	4,81	0,05	0,82	6,65	2,26	9,73	14,54

Extratores: ⁽¹⁾ Mehlich-1; ⁽²⁾ KCl 1 mol L⁻¹; ⁽³⁾ pH SMP 7,5.

A área é manejada sob sistema plantio direto há 10 anos, com sucessão das culturas de soja, milho e trigo, com periódicas correções de calcário e adubação com esterco de aves, com base nas análises químicas do solo e recomendações técnicas. Anteriormente à instalação do experimento, a área havia sido cultivada com soja, além de restos vegetais, remanescentes da colheita, sobre o solo. No georeferenciamento da área, foi usado o receptor DGPS Trimble Geo Explorer 3, com correção pós-processada.

Quatro culturas foram utilizadas para a composição dos tratamentos no inverno, sendo três culturas utilizadas como plantas de cobertura: aveia preta (*Avena strigosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e ervilhaca comum (*Vicia sativa*), com ciclo total de 140 a 180, 150 a 200 e 200 a 240 dias, respectivamente. Ainda, uma espécie cultivada para fins comerciais: trigo (*Triticum aestivum*) da cultivar CD 104, com crescimento determinado e ciclo total de 124 dias foi utilizada. Antes da instalação do experimento em campo, foram realizados testes de germinação nas sementes do material vegetal utilizado, para cálculo da necessidade de semente que foi utilizada na semeadura. As porcentagens obtidas foram de 86%, 82%, 92%, 94%, respectivamente, para a ervilhaca, nabo, aveia e trigo. No verão, foi semeada a soja convencional BRS 232, com crescimento determinado, ciclo total de 125 dias e porcentagem de germinação mínima de 80%.

4.3 Delineamento experimental

O experimento foi implantado em delineamento experimental de blocos ao acaso (Figura 2), com três blocos, cinco tratamentos e duas repetições por tratamento em cada bloco. Cada parcela era uma faixa de 5,1 m de largura e 133 m de comprimento. Os tratamentos foram os cinco manejos de inverno:

- Aveia preta;
- Consórcio de nabo forrageiro e aveia preta (consórcio 1);
- Consórcio entre nabo forrageiro, aveia preta e ervilhaca comum (consórcio 2);
- Trigo e a

- Testemunha (permaneceu em pousio durante o inverno).
No verão, foi implantada a cultura de soja em toda a área.

4.4 Instalação e condução do experimento

A semeadura das coberturas de inverno foi realizada em solo coberto com restos vegetais da colheita da soja, sem revolvimento ou preparo do solo (plantio direto). Previamente, foi feito o controle químico das plantas invasoras existentes na área com produtos à base de glifosato ($1,5 \text{ L ha}^{-1}$) e 2,4-D ($1,25 \text{ L ha}^{-1}$), a fim de se estabelecer um nível inicial igual a zero de cobertura de plantas espontâneas em toda a área.

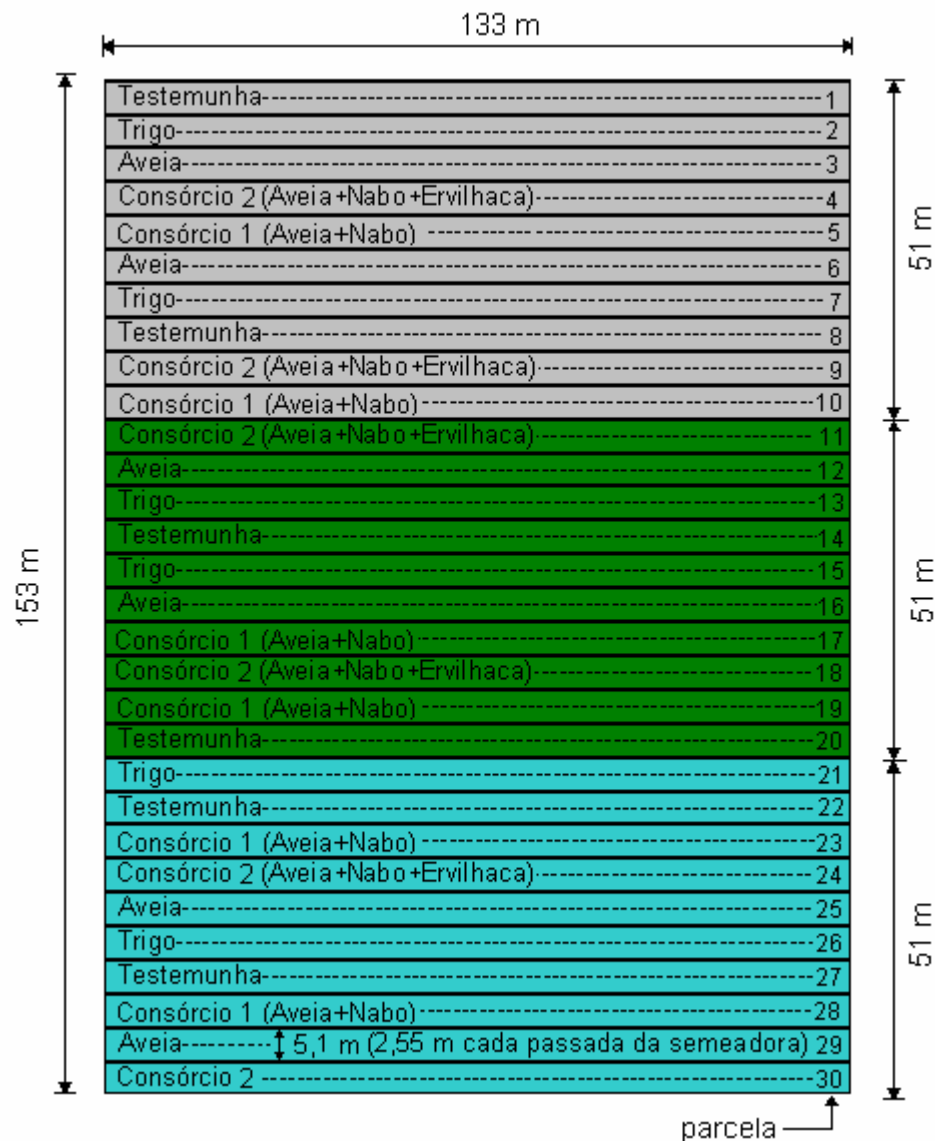


Figura 2 Croqui do delineamento experimental de blocos ao acaso (cada bloco representado por uma cor).

Para a semeadura das culturas de inverno, foi utilizada uma semeadora de trigo Semeato TD 220, ano 1984, com 15 linhas (0,17 m entre linhas, 2,55 m de largura de trabalho). Seguindo recomendações de Calegari (2006), as seguintes quantidades de

semente foram utilizadas: tratamento aveia preta (50 kg ha^{-1}); tratamento consórcio 1 (aveia preta, 30 kg ha^{-1} ; nabo forrageiro, 10 kg ha^{-1}); tratamento consórcio 2 (aveia preta, 30 kg ha^{-1} ; nabo forrageiro, 8 kg ha^{-1} e ervilhaca comum, 15 kg ha^{-1}). O trigo foi semeado com densidade de $65 \text{ plantas m}^{-2}$, conforme COODETEC (2008), e a adubação de 165 kg ha^{-1} realizada na linha de semeadura com adubo NPK 8-20-20, conforme recomendação técnica para as necessidades de adubação na área, em função da análise do solo.

As plantas de cobertura foram manejadas na fase de pleno florescimento (100 dias após semeadura) com rolo-faca e o trigo colhido com colhedora *New Holland TC 57*, ano 2000 (plataforma de 4,5 m).

Para a semeadura da soja, sob plantio direto, no verão, foi utilizada a semeadora de soja *John Deere 1109*, com nove linhas ($0,45 \text{ m}$ entre linhas, $4,05 \text{ m}$ de largura de trabalho), 50 dias após o manejo das plantas de cobertura e 15 dias após a colheita do trigo. A densidade de semeadura foi de $16 \text{ plantas m}^{-2}$, em espaçamento de $0,45 \text{ m}$, seguindo-se a recomendação para a cultivar utilizada enquanto a adubação foi de 206 kg ha^{-1} , realizada na linha de semeadura com adubo NPK 2-24-16, efetuada conforme a análise de solo e a necessidade da cultura da soja.

A capina manual das plantas invasoras e os tratamentos fitossanitários foram feitos no trigo e na soja sempre que o nível de dano econômico foi atingido.

4.5 Avaliações

4.5.1 No solo

As avaliações no solo foram realizadas em duas épocas: antes de cada semeadura e após o manejo dos tratamentos de inverno.

Para caracterização da área experimental, antes da semeadura dos tratamentos de inverno foram coletadas amostras de solo para análise química (de rotina), granulométrica e física, visando caracterizar a variabilidade espacial. A área foi medida com o aparelho DGPS *Trimble Geo Explorer 3*, com correção pós-processada e o mapa da área gerado pelo *software Pathfinder*. Usando o *software FieldRover*, foi construída uma grade de 30 por 33 m, a fim de obterem-se, na área, os 20 pontos de referência de amostragem (Figura 3). Nos 20 pontos da grade, foram determinados o teor de água e densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo na profundidade de 0 a 0,10 m.

A determinação da densidade do solo foi realizada no mesmo dia da determinação do teor de água (umidade gravimétrica), pelo método do anel volumétrico e da estufa, respectivamente, descrito em Kiehl (1979) e Embrapa (1997).

Para a determinação da porosidade do solo (porosidade total, macro e microporosidade), as amostras indeformadas foram saturadas por 24 h em bandeja com

água até dois terços da altura do anel. Após o período de saturação, as amostras foram drenadas no potencial equivalente a $-0,006$ MPa utilizando-se uma mesa de tensão (KIEHL, 1979; EMBRAPA, 1997).

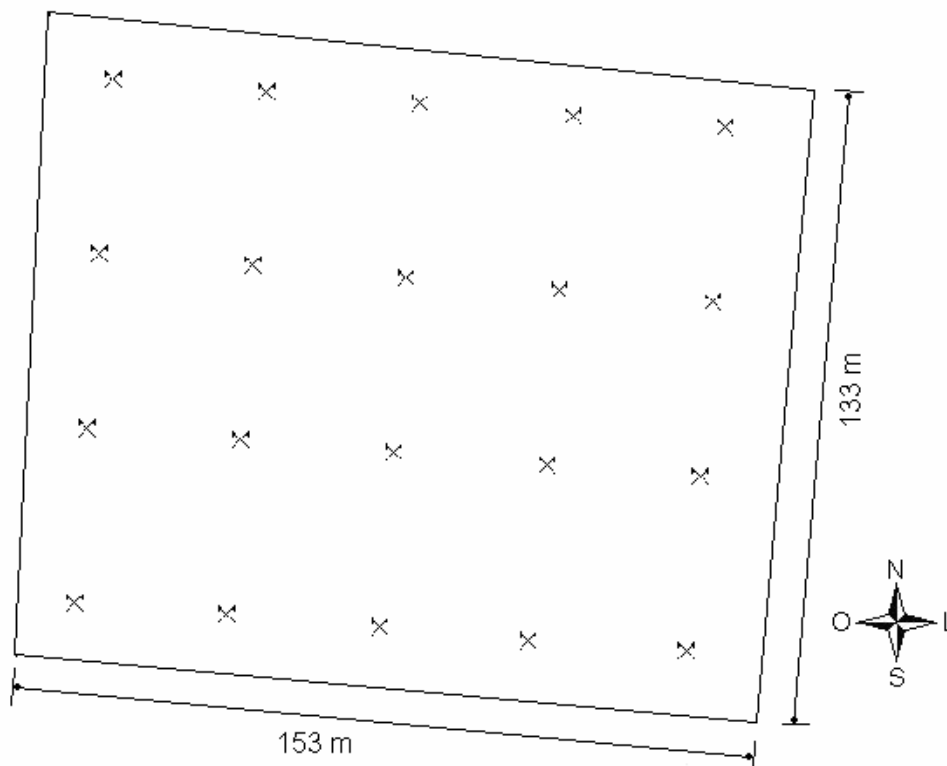


Figura 3 Grade com os pontos de referência (20) das coletas do solo para análises físicas anteriores à semeadura dos tratamentos de inverno.

Para análise física após o manejo dos tratamentos de inverno (50 dias após o manejo das plantas de cobertura e 15 dias após a colheita do trigo), foram demarcados dois pontos em cada parcela (faixa), com auxílio do GPS (Figura 4). Em cada um dos 60 pontos, foram determinados: macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade, e teor de água do solo, na profundidade de 0 a 0,10 m, conforme metodologia da Embrapa (1997).

4.5.2 Produtividade da soja

A colheita da soja foi manual e separadamente, em dez pontos amostrais para cada faixa (parcela), demarcados com o auxílio de um GPS e determinados da seguinte forma: cada parcela foi dividida de forma a se obterem cinco pontos em cada parcela (faixa) e para captar a variabilidade espacial a pequenas distâncias foram incluídos pontos a 5 m de distância de cada um desses cinco pontos demarcados (Figura 5). Em cada um dos 300 pontos amostrais, colheram-se as plantas de soja contidas em 1 m de comprimento em duas linhas de semeadura. As sementes foram embaladas, identificadas e pesadas, para determinação da produtividade, com teor de água corrigido para 13%.

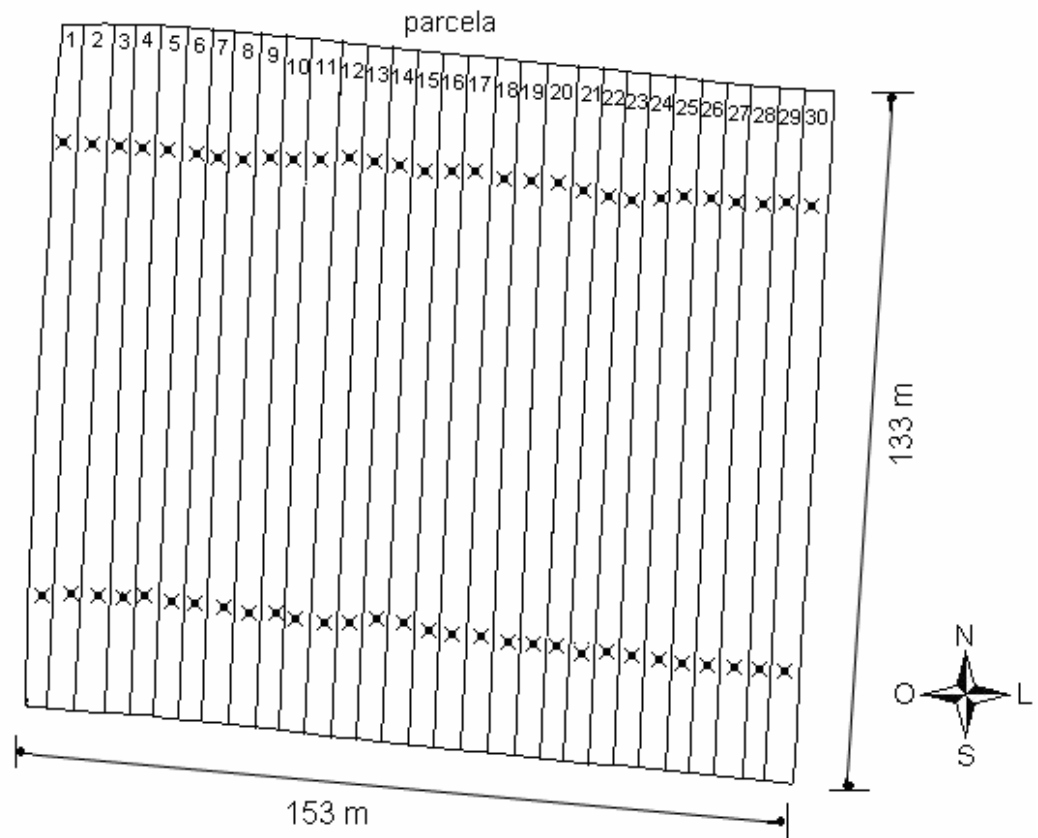


Figura 4 Localização dos pontos de referência de coleta (60) para análise física do solo após o manejo dos tratamentos de inverno.

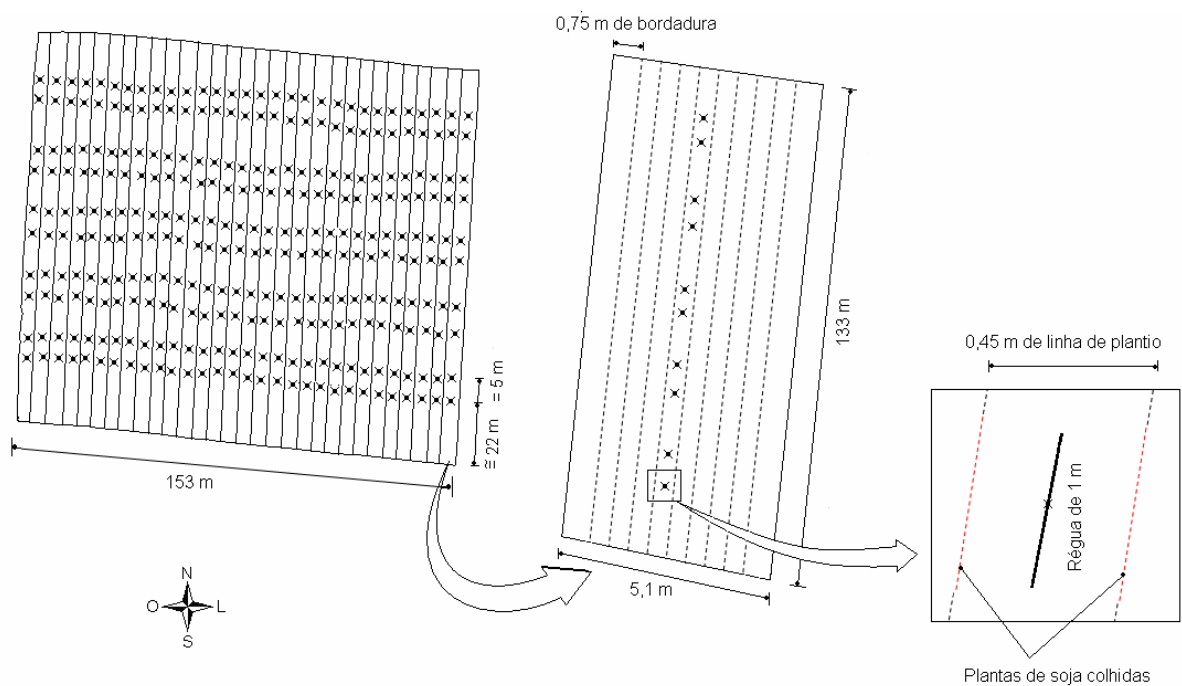


Figura 5 Localização dos pontos de referência (300) para colheita da soja.

4.6 Análise dos dados

Os dados foram avaliados utilizando as estatísticas descritiva, exploratória e geoestatística. Na análise exploratória dos dados, foram calculadas as medidas de posição (média, mediana), de dispersão (desvio-padrão) e da forma da distribuição (coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose). O coeficiente de variação (CV) foi considerado baixo, quando $CV \leq 10\%$ (homocedasticidade); médio, quando $10\% < CV \leq 20\%$; alto, quando $20\% < CV \leq 30\%$; e muito alto, quando $CV > 30\%$ (heterocedasticidade) (GOMES; GARCIA, 2002).

Os coeficientes de assimetria e curtose foram comparados de acordo com o intervalo de confiança fornecido por Jones (1969) ao nível de 5% de significância. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelos testes de Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov, com 5% de significância, utilizando-se o *software Minitab 15*.

Na análise geoestatística, foram construídos os semivariogramas para verificar a dependência espacial dos dados. Para estimar a função semivariância experimental foi utilizado o estimador proposto por Matheron (1963). Os modelos teóricos ajustados aos semivariogramas foram: esférico, exponencial e gaussiano. Os semivariogramas experimentais foram obtidos ao se aplicarem os métodos de ajuste de mínimos quadrados ordinários (OLS) para que fossem estimados os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$) e alcance (a) ao se adotar o modelo isotrópico (semivariograma omnidirecional) com *cut-off* de 50% da distância máxima (CLARK, 1979). Nessa análise, foi utilizado o *software ArcView 9.2*. Os mapas temáticos foram elaborados, por meio de interpolação por krigagem ordinária.

O melhor modelo foi selecionado por meio da validação cruzada, a partir do método de Bazzi et al. (2009), os quais propuseram o índice de comparação de erros (ICE, equação 1).

$$ICE_i = \frac{ABS(\overline{ER})_i}{\max_{i=1 \text{ to } j} ABS(\overline{ER})_i + 0,001} + \frac{ABS(SER-1)_i}{\max_{i=1 \text{ to } j} ABS(SER-1)_i + 0,001} \quad \text{Eq. (1)}$$

Segundo McBratney e Webster (1986) e Cressie (1993), ao se aplicar a condição de não-tendenciosidade, o valor populacional para o erro médio reduzido deve ser zero e o do desvio-padrão do erro reduzido, igual a um. Dessa forma, o valor de \overline{ER} (erro médio reduzido) mais próximo de zero e o valor de S_{ER} (desvio padrão dos erros reduzidos) mais próximo de um são os critérios para escolha do melhor modelo ajustado (FARACO et al., 2008). Assim, o ICE, na seleção de j modelos, proporciona um valor tão menor quanto mais próximo de zero for o \overline{ER} (Equação 2) e mais perto de um for o S_{ER} (Equação 3). Portanto,

na escolha entre diversos modelos, aquele que teve menor ICE foi considerado o melhor modelo.

$$\overline{ER} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z(s_i) - \hat{Z}(s_i)}{\sigma(\hat{Z}(s_i))} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z(s_i) - \hat{Z}(s_i)|}{\sigma(\hat{Z}(s_i))}} \quad \text{Eq. (3)}$$

em que, n é o número de dados; $Z(s_i)$, valor observado no ponto s_i ; e $\hat{Z}(s_i)$, valor predito por krigagem ordinária no ponto s_i , sem considerar a observação $Z(s_i)$; $\sigma(\hat{Z}(s_i))$ é o desvio-padrão da krigagem no ponto s_i , sem considerar a observação $Z(s_i)$.

A dependência espacial, representada pelo coeficiente de efeito pepita ($E\%$, $C_0/(C_0+C) \times 100$), foi considerada forte, quando $E\% < 25\%$; moderada, quando $25 \leq E\% \leq 75\%$; e fraca, quando $E\% > 75\%$ (CAMPARDELLA et al., 1994, SOUZA et al., 1999).

Para avaliar o grau de correlação entre as variáveis, foram utilizados o coeficiente de correlação linear de Pearson (R) e o coeficiente de correlação não-paramétrica de Spearman (R_s), calculados por meio do *software Minitab 15* e classificados conforme interpretação adaptada de Zou et al. (2003). O coeficiente de Spearman foi usado para investigar se os dados não formam uma nuvem comportada, com alguns pontos bem distantes dos demais ou se existe uma relação crescente ou decrescente em um formato não linear.

Para a elaboração dos mapas temáticos das variáveis avaliadas em cada tratamento, consideraram-se apenas os pontos amostrados nas parcelas onde havia sido implantado um tratamento de inverno, então, realizou-se a interpolação dos valores amostrados nesses pontos para toda a área, como se em toda área tivesse sido usado o respectivo tratamento (Figura 6). Procedeu-se dessa forma, para cada tratamento.

Para análises dos atributos físicos do solo e da produtividade da soja foram utilizados, respectivamente, 12 e 60 pontos amostrais em cada tratamento. Tendo em vista as seis faixas (parcelas) para cada tratamento e que foram amostrados em cada faixa, dois pontos para análises dos atributos físicos do solo e dez pontos para avaliação da produtividade da soja.

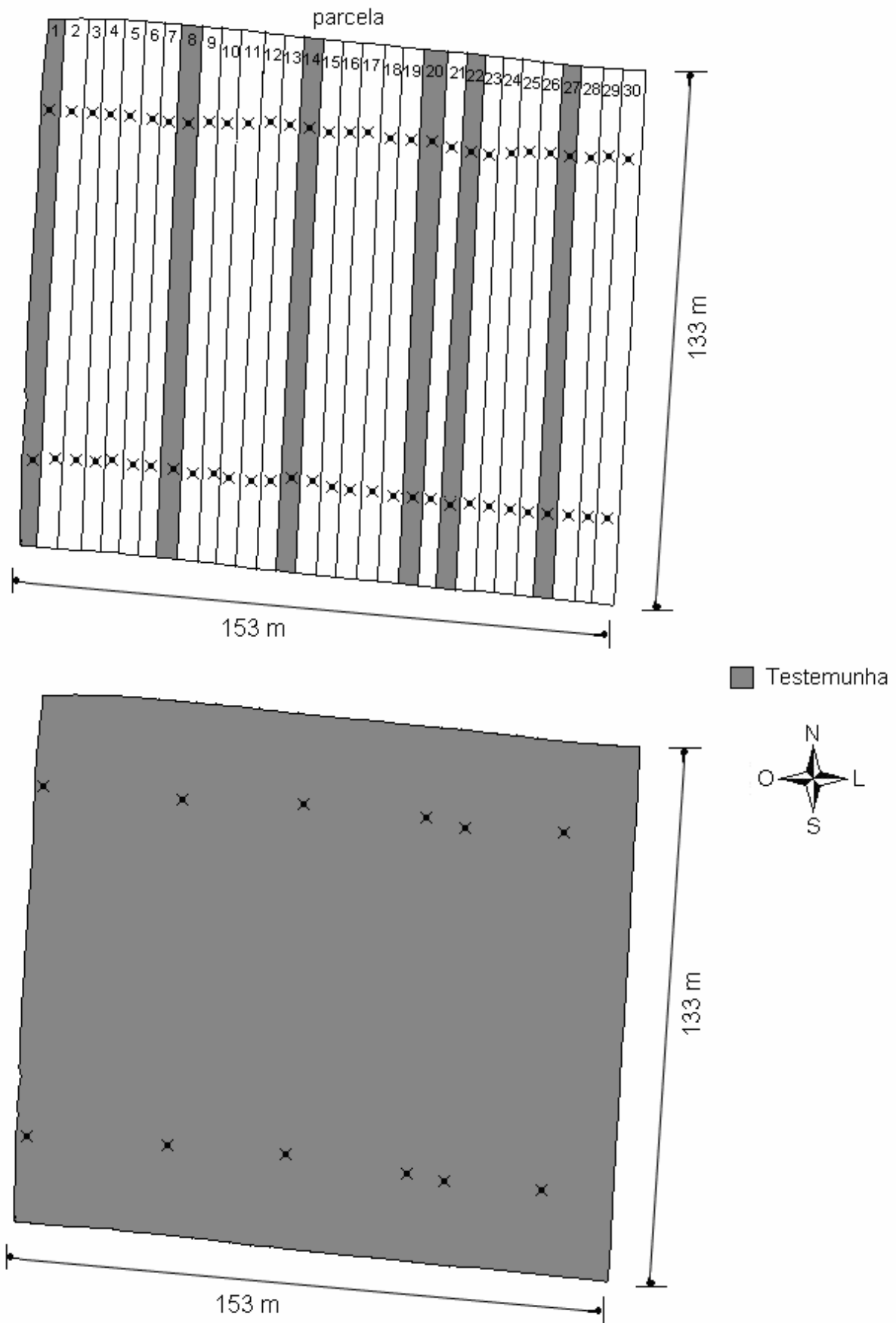


Figura 6 Exemplo de elaboração dos mapas temáticos.

Para comparação dos mapas, utilizou-se o coeficiente de desvio relativo (CDR) proposto por Coelho et al. (2009). Ele expressa a diferença média em módulo dos valores interpolados em um mapa temático quando comparado com um mapa assumido como referência. Nesse estudo, compararam-se os outros tratamentos (aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo) em relação à testemunha (deixada em pousio durante o inverno), considerada como referência.

$$CDR = \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{ij} - V_{ipad}}{V_{ipad}} \right| * \frac{100}{n} \quad \text{Eq. (4)}$$

em que, n é o número de pontos interpolados; V_{ipad} é o valor de referência no ponto i (neste estudo, os valores referência são do tratamento testemunha); V_{ij} é o valor no ponto i para o tratamento j ($j = 1, 2, 3, 4$); $j = 1$: aveia; $j = 2$: consórcio 1; $j = 3$: consórcio 2; $j = 4$: trigo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliações no solo antes da semeadura dos tratamentos de inverno

Todos os atributos físicos do solo estudados apresentaram normalidade (Tabela 2) e com distribuição simétrica e mesocúrtica para variável porosidade total, densidade e teor de água do solo. A variável macroporosidade apresentou distribuição assimétrica positiva e mesocúrtica, enquanto a microporosidade apresentou distribuição leptocúrtica e assimétrica negativa. Os coeficientes de variação (CV) indicaram homogeneidade dos dados ($CV \leq 10\%$), segundo Gomes e Garcia (2002). Como exceção, teve-se a macroporosidade com $CV = 29\%$, considerado alto. Tais dados estão em concordância com os resultados obtidos por Souza et al. (2004) e Schaffrath et al. (2008) para sistema plantio direto.

Tabela 2 Estatística descritiva da macroporosidade (Macro, $m^3 m^{-3}$), microporosidade (Micro, $m^3 m^{-3}$) porosidade total (PT, $m^3 m^{-3}$), densidade ($kg dm^{-3}$) e teor de água do solo ($kg kg^{-1}$)

Atributo	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	DP	CV (%)	Assimetria	Curtose	Normal*
Macro	0,05	0,08	0,07	0,14	0,023	29	1,20 (b)	1,94 (A)	sim
Micro	0,42	0,46	0,47	0,49	0,016	3	-1,57 (c)	3,42 (C)	sim
PT	0,52	0,54	0,54	0,58	0,018	3	0,33 (a)	-0,86 (A)	sim
Densidade	1,16	1,32	1,33	1,43	0,069	5	-0,41 (a)	0,13 (A)	sim
Teor de água	0,33	0,35	0,35	0,39	0,015	4	0,72 (a)	0,90 (A)	sim

*Teste de normalidade Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov.

Assimetria - distribuição simétrica (a), assimetria positiva (b), assimetria negativa (c);

Curtose - mesocúrtica (A), platicúrtica (B), leptocúrtica (C).

Coefficientes de variação (CV), desvio padrão (DP).

Observa-se que os valores para densidade do solo apresentaram-se entre 1,16 e 1,43 $kg m^{-3}$, semelhantes aos obtidos por Faraco et al. (2008). Considerando valores encontrados por Thimóteo et al. (2001), Souza et al. (2004) e Schaffrath et al. (2008), verificou-se que a microporosidade apresentou valores elevados (média de 0,46 $m^3 m^{-3}$) e que a macroporosidade apresentou valores baixos (média de 0,08 $m^3 m^{-3}$). Assim, segundo Megda et al. (2008), quando a macroporosidade do solo é reduzida a um valor inferior a 0,15 $m^3 m^{-3}$, o crescimento das raízes pode ser prejudicado. Os resultados obtidos podem ser consequência do tráfego de máquinas e implementos agrícolas que modificam o tamanho de agregados, com aumento na proporção de microporos em relação aos macroporos, conforme relatado por Souza et al. (2006) e também a prática de revolvimento mínimo do solo (somente nos sulcos de semeadura), adotada no sistema plantio direto (SECCO et al., 2005).

A seleção dos modelos se deu pelo menor índice de comparação de erros (ICE, equação 1, Tabela 3), obtido a partir da validação cruzada. Os modelos teóricos de semivariograma selecionados foram: o esférico, para as variáveis porosidade total e teor de

água no solo; exponencial, para as variáveis microporosidade e densidade do solo; e gaussiano para a variável macroporosidade, que discorda dos modelos obtidos por Souza et al. (2004), Schaffrath et al. (2008) e Siqueira et al. (2009) que obtiveram o modelo esférico para todas as variáveis.

Tabela 3 Índice de comparação de erros (ICE) para seleção do melhor modelo teórico

Variáveis	ICE do Modelo		
	Esférico	Exponencial	Gaussiano
Macroporosidade	1,839	1,923	1,801
Microporosidade	1,807	1,759	2,000
Porosidade total	1,566	1,759	2,000
Densidade	1,824	1,154	1,924
Teor de água	0,912	1,833	1,860

Obs.: o melhor modelo (menor ICE) está em destaque para cada variável.

Todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial (Tabela 4). O coeficiente de efeito pepita (E%; CAMBARDELLA et al., 1994, SOUZA et al., 1999) mostrou forte dependência espacial para densidade do solo ($E\% \leq 25\%$); e moderada para macroporosidade, microporosidade, porosidade total e teor de água do solo ($25 \leq E\% \leq 75\%$), discordando de Siqueira et al. (2009), os quais obtiveram forte dependência espacial para esses atributos em solo sob plantio direto por 20 anos. O comportamento espacial de cada atributo físico do solo pode ser observado nos semivariogramas ajustados (Figura 1A, Anexo A).

Tabela 4 Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais

Variável	Modelo	C_0 (efeito pepita)	C_0+C_1 (patamar)	a (alcance, m)	$E\%^*$ $(C_0/(C_0+C_1)) \times 100$
Macroporosidade	Gaussiano	0,000408	0,000600	124	68
Microporosidade	Exponencial	0,000091	0,000277	124	33
Porosidade total	Esférico	0,000134	0,000341	49	39
Densidade	Exponencial	0,000000	0,005208	74	0
Teor de água	Esférico	0,000155	0,000234	124	66

*E% = coeficiente de efeito pepita.

Conforme Panosso et al. (2008), o alcance (a) é um importante parâmetro no estudo do semivariograma, uma vez que representa a distância máxima em que pontos da mesma variável estão correlacionados espacialmente. Sendo assim, pode-se verificar que a dependência dos dados se deu em um raio que variou de 49 m (porosidade total) até 124 m (macroporosidade, microporosidade e teor de água), sendo essas superiores às encontradas por Schaffrath et al. (2008), Souza et al. (2004) e Siqueira et al. (2009).

Os valores das estatísticas descritivas básicas referentes aos valores obtidos após a interpolação dos dados (Tabela 5) mostram como a distribuição dos dados é alterada com a utilização da krigagem. Pode-se observar que os CVs diminuíram em todos os atributos sendo que para a maioria das variáveis, os valores mínimos aumentaram e os valores máximos diminuíram. Isso fez com que os dados ficassem menos dispersos.

Tabela 5 Estatística descritiva básica da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), densidade (kg dm^{-3}) e teor de água do solo (kgkg^{-1}) dos valores preditos após interpolação por krigagem ordinária

Atributo	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	CV (%)
Macroporosidade	0,06	0,08	0,09	0,005	6
Microporosidade	0,44	0,47	0,48	0,006	1
Porosidade Total	0,52	0,54	0,57	0,009	2
Densidade	1,16	1,32	1,43	0,043	3
Teor de água	0,34	0,35	0,37	0,005	1

Os menores valores encontrados para os macroporos (Figura 7a, 0,06 a 0,07 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ocorreram na região central da área (11% da área) e os maiores valores (0,08 a 0,09 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) concentram-se principalmente no extremo sudoeste e extremo norte da área (20% da área). Os valores intermediários (0,07 a 0,08 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) abrangem 69% da área e se estendem da parte central à quase totalidade da região sudeste.

A macroporosidade está correlacionada com o crescimento das plantas e seus valores ótimos encontram-se entre 0,20 e 0,30 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Já os valores superiores são prejudiciais, pois restringem a capacidade de retenção de água do solo, e valores menores que 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ prejudicam o desenvolvimento das raízes, a infiltração de água e a aeração do solo (KIEHL, 1979). Essa variável teve seus valores reclassificados (Figura 7b) segundo os valores apresentados por Kiehl (1979). Utilizou-se o valor máximo igual a 0,60 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ exclusivamente para classificação da legenda. Os valores encontrados apresentaram-se todos dentro da mesma faixa de classificação, ou seja, abaixo de 0,10 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e representam valores prejudiciais para o perfeito desenvolvimento das plantas.

Os valores de microporosidade (Figura 7c) variaram de 0,44 a 0,49 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, sendo que os valores intermediários (0,46 a 0,47 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) predominaram em 48% da área. Os valores maiores (0,47 a 0,49 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) se mostraram em grande parte do mapa (41% da área), os quais se estenderam desde o centro-oeste e abrangeram grande parte do nordeste da área. Enquanto os menores valores de microporosidade (0,44 a 0,46 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) concentraram-se em pequenas regiões no extremo sudoeste e norte do mapa, representando apenas 11% da área total.

Com relação à porosidade total (Figura 7d), os valores variaram de 0,52 a 0,57 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, predominando valores menores de poros totais (0,52 a 0,54 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) que estenderam-se do noroeste até o sudeste do mapa (representam 42% da área), enquanto os maiores valores (0,55 a 0,57 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) concentraram-se, principalmente, na região nordeste, com 21% da área. Os valores intermediários (0,54 a 0,55 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) representaram 37% da área total.

Os valores de densidade do solo (Figura 7e) variaram de 1,16 a 1,43 kg dm^{-3} e os valores mais elevados (1,34 a 1,43 kg dm^{-3}) encontraram-se no centro, os quais se estendem por toda região noroeste, assim representam 35% da área. Os menores valores (1,16 a 1,25 kg dm^{-3}) restringiram-se a uma pequena região (3% da área) no extremo

sudoeste, enquanto que valores intermediários de densidade ($1,25$ a $1,34$ kg dm^{-3}) prevaleceram nos 62% da área total.

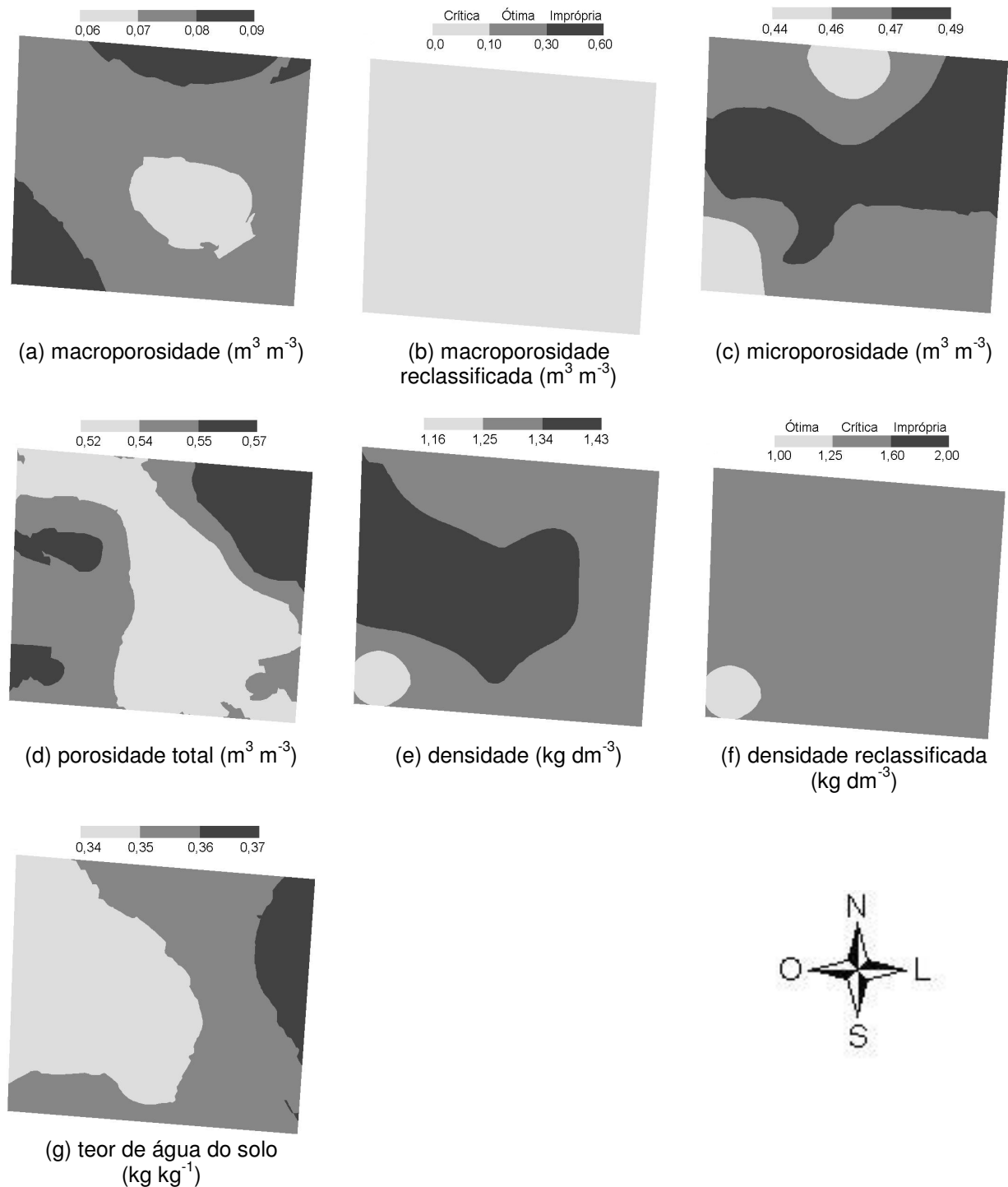


Figura 7 Distribuição espacial da (a) macroporosidade; (b) macroporosidade reclassificada; (c) microporosidade; (d) porosidade total; (e) densidade; (f) densidade reclassificada; (g) teor de água do solo.

A amplitude média de variação da densidade aparente para solos argilosos é de $1,00$ a $1,25$ kg dm^{-3} , sendo $1,60$ kg dm^{-3} o valor limite acima da qual as raízes não podem penetrar nos solos argilosos (KIEHL, 1979). A variável densidade do solo (Figura 7e) foi

reclassificada (Figura 7f) ao se utilizarem esses parâmetros, considerando-se valores intermediários de 1,25 a 1,60 kg dm⁻³ como densidades críticas, para as quais o solo deve ser manejado de forma a evitar o aumento da densidade e consequente compactação do solo. Utilizou-se o valor máximo igual a 2,00 kg dm⁻³ exclusivamente para classificação da legenda. Verificou-se que apenas 3% da área estão dentro da faixa densidade ótima, enquanto a grande parte da área apresentou-se com valores de densidades considerados críticos, logo, os manejos adequados foram considerados medidas fundamentais.

O teor de água do solo (Figura 7g) apresentou valores crescentes no sentido oeste-leste. Valores entre 0,34 a 0,35 m³ m⁻³ prevaleceram em toda região noroeste até a região central (40% da área). E valores de 0,36 a 0,37 m³ m⁻³ apresentam-se no nordeste da área (11% da área).

Observou-se comportamento inverso entre a densidade e a macroporosidade. Já para a microporosidade e a densidade do solo, verificou-se que a região que possui índices baixos foi a mesma para os dois atributos. E regiões com elevados índices de macroporosidade tiveram baixos índices de microporosidade. Comportamentos semelhantes foram encontrados por Siqueira et al. (2009).

De acordo com Thimóteo et al., (2001), os poros totais do solo constituem-se de macro e microporos, sendo que o aumento de um reduzirá a quantidade do outro. Quando ocorrer uma diminuição da macroporosidade, poderá ocasionar um aumento de densidade do solo, diminuição de infiltração de água e, conseqüentemente, maior suscetibilidade do solo à erosão.

As correlações lineares de Pearson (Tabela 6) e não-paramétrica de Spearman (Tabela 7) apresentaram tendências semelhantes às observadas nos mapas temáticos. Observou-se uma fraca correlação linear positiva entre a densidade e a microporosidade e uma fraca correlação linear negativa entre a macroporosidade e a densidade.

Tabela 6 Coeficientes de correlação linear de Pearson para macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT), densidade e teor de água do solo

	Micro	Densidade	Macro	PT	
Densidade	0,385 ^{ns}				0 ≤ R < 0,2 (muito fraca)
Macro	-0,67*	-0,389 ^{ns}			0,2 ≤ R < 0,4 (fraca)
PT	0,046 ^{ns}	-0,119 ^{ns}	0,668*		0,4 ≤ R < 0,6 (moderada)
Teor de água	0,407 ^{ns}	-0,654*	-0,173 ^{ns}	0,143 ^{ns}	0,6 ≤ R < 0,8 (forte)
					0,8 ≤ R ≤ 1 (muito forte)

*Significativo pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade.

Já entre macroporosidade e microporosidade e entre densidade e teor de água do solo, verificou-se uma forte correlação linear negativa. Esses dados discordam do resultado encontrado por Lopes et al. (2007b) para densidade e teor de água do solo, mas concordam com Kiehl (1979), quando explicou que a diminuição da densidade aparente significa o predomínio no solo de partículas mais finas com maior capacidade de retenção de água, e também com Rosa Filho et al. (2009). Foi detectada também uma correlação

entre macroporosidade e porosidade total, resultados que concordam com os obtidos por Schaffrath et al. (2008).

A constatação de diferença entre os coeficientes de correlação linear e o de Spearman pode refletir tanto uma relação não-linear como a presença de pares de valores extremos, mas esse fato não foi observado neste trabalho.

Tabela 7 Coeficientes de correlação não-paramétrica de Spearman para macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT), densidade e teor de água do solo

	Micro	Densidade	Macro	PT	
Densidade	0,300 ^{ns}				0 ≤ Rs < 0,2 (muito fraca)
Macro	-0,428 ^{ns}	-0,315 ^{ns}			0,2 ≤ Rs < 0,4 (fraca)
PT	0,156 ^{ns}	-0,119 ^{ns}	0,751*		0,4 ≤ Rs < 0,6 (moderada)
Teor de água	0,331 ^{ns}	-0,661*	-0,106 ^{ns}	0,071 ^{ns}	0,6 ≤ Rs < 0,8 (forte)
					0,8 ≤ Rs ≤ 1 (muito forte)

*Significativo pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade.

5.2 Avaliação no solo após o manejo dos tratamentos de inverno

Verificou-se normalidade para produtividade da soja e para todos os atributos físicos do solo, medidos após o manejo dos tratamentos de inverno (Tabela 8), bem como distribuição simétrica e mesocúrtica. Como exceções, a macroporosidade apresentou distribuição assimétrica negativa e a densidade, distribuição platicúrtica, ambas no tratamento trigo. Os coeficientes de variação (CV) indicaram homogeneidade dos dados ($CV \leq 10\%$, GOMES; GARCIA 2002). Como exceções, em todos os tratamentos, obteve-se a produtividade da soja, com $20\% < CV \leq 30\%$ considerado elevad. Os dados concordam com o resultado obtido por Johann et al. (2004), mas discordam de Rosa Filho et al. (2009) e Amado et al. (2007) que obtiveram média variabilidade para essa variável. E a resposta associada à macroporosidade, com $CV > 30\%$, considerado muito elevado, discorda dos resultados obtidos por Megda et al. (2008), Souza et al. (2004) e Schaffrath et al. (2008) que obtiveram CV médio e elevado para essa variável.

Os macroporos variaram de $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (com exceção do consórcio 1, com $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) a $0,08$ (trigo), $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (aveia) e $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (consórcio 1, consórcio 2 e testemunha). Verificou-se que os tratamentos aveia e trigo obtiveram menores valores médios de macroporosidade ($0,05$ e $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em relação aos demais tratamentos (média de $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Para a variável microporosidade do solo, obtiveram-se valores que variaram de $0,45$ a $0,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (consórcio 1). Porém, em todos os tratamentos, o valor médio de microporos foi de $0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A porosidade total do solo nos tratamentos variou de $0,49$ a $0,63 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (testemunha), com valores médios de $0,56$ e $0,57 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (consórcio 1 e testemunha, respectivamente) e $0,55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nos demais tratamentos, os quais estão de acordo com

Kiehl (1979), quando considerou que, em média, a porosidade total de solos argilosos varia de 0,40 a 0,60 m³ m⁻³.

Tabela 8 Estatística descritiva da macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade, teor de água do solo e produtividade da soja para os tratamentos de inverno: aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha

Tratamento	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	D.P.	CV (%)	Assimetria	Curtose	Normal*
MACROPOROSIDADE (m ³ m ⁻³)									
Aveia	0,01	0,05	0,05	0,09	0,026	49	-0,22 (a)	0,28 (A)	sim
Consórcio 1	0,02	0,07	0,07	0,12	0,029	43	-0,33 (a)	0,04 (A)	sim
Consórcio 2	0,01	0,07	0,06	0,12	0,035	52	-0,36 (a)	-0,54 (A)	sim
Trigo	0,01	0,06	0,07	0,08	0,021	35	-1,58 (c)	2,12 (A)	sim
Testemunha	0,01	0,07	0,07	0,12	0,035	48	-0,38 (a)	-1,05 (A)	sim
MICROPOROSIDADE (m ³ m ⁻³)									
Aveia	0,48	0,49	0,49	0,51	0,009	2	0,15 (a)	-0,43 (A)	sim
Consórcio 1	0,45	0,49	0,49	0,54	0,024	5	0,53 (a)	0,88 (A)	sim
Consórcio 2	0,46	0,49	0,49	0,50	0,011	2	-1,19 (a)	2,12 (A)	sim
Trigo	0,46	0,49	0,49	0,52	0,016	3	-0,51 (a)	0,57 (A)	sim
Testemunha	0,47	0,49	0,49	0,52	0,016	3	0,79 (a)	-0,29 (A)	sim
POROSIDADE TOTAL (m ³ m ⁻³)									
Aveia	0,51	0,55	0,55	0,61	0,027	5	0,53 (a)	1,84 (A)	sim
Consórcio 1	0,50	0,56	0,56	0,62	0,029	5	-0,16 (a)	1,97 (A)	sim
Consórcio 2	0,50	0,55	0,55	0,60	0,032	6	-0,04 (a)	-0,58 (A)	sim
Trigo	0,50	0,55	0,56	0,59	0,028	5	-1,05 (a)	0,18 (A)	sim
Testemunha	0,49	0,57	0,57	0,63	0,038	7	-0,52 (a)	0,70 (A)	sim
DENSIDADE (kg dm ⁻³)									
Aveia	1,26	1,34	1,34	1,40	0,039	3	-0,55 (a)	0,36 (A)	sim
Consórcio 1	1,18	1,34	1,36	1,48	0,080	6	-0,39 (a)	0,36 (A)	sim
Consórcio 2	1,27	1,35	1,34	1,41	0,037	3	-0,34 (a)	0,71 (A)	sim
Trigo	1,30	1,37	1,35	1,43	0,046	3	0,09 (a)	-1,67 (B)	sim
Testemunha	1,23	1,33	1,34	1,42	0,059	4	-0,54 (a)	-0,34 (A)	sim
TEOR DE ÁGUA (kg kg ⁻¹)									
Aveia	0,34	0,36	0,36	0,38	1,252	3	0,07 (a)	-0,58 (A)	sim
Consórcio 1	0,31	0,35	0,34	0,41	2,712	8	1,20 (a)	2,06 (A)	sim
Consórcio 2	0,33	0,35	0,35	0,36	0,734	2	-0,57 (a)	0,52 (A)	sim
Trigo	0,32	0,35	0,36	0,38	1,745	5	-0,84 (a)	-0,18 (A)	sim
Testemunha	0,32	0,34	0,34	0,38	1,559	4	0,81 (a)	0,16 (A)	sim
PRODUTIVIDADE (kg ha ⁻¹)									
Aveia	857	1666	1642	2903	420	25	0,50 (a)	0,31 (A)	sim
Consórcio 1	708	1472	1430	2333	368	25	0,22 (a)	-0,47 (A)	sim
Consórcio 2	941	1702	1710	2653	413	24	0,26 (a)	-0,43 (A)	sim
Trigo	1030	1872	1843	2971	539	29	0,20 (a)	-1,1 (A)	sim
Testemunha	729	1793	1756	2952	455	25	0,26 (a)	-0,09 (A)	sim

*Teste de normalidade Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov.

Assimetria - distribuição simétrica (a), assimetria positiva (b), assimetria negativa (c);

Curtose - mesocúrtica (A), platicúrtica (B), leptocúrtica (C).

D.P. - desvio padrão.

O menor valor (1,18 kg dm⁻³) e o maior valor (1,48 kg dm⁻³) para densidade do solo foram encontrados no tratamento consórcio 1. Os valores médios para esse atributo do solo foram de 1,33 kg dm⁻³ (no tratamento testemunha), 1,34 kg dm⁻³ (aveia e consórcio 1), 1,35 kg dm⁻³ (consórcio 2) e 1,37 kg dm⁻³ (trigo), sendo valores próximo aos valores críticos, segundo Reichert et al. (2009), considerando que a média da macroporosidade para todos os tratamentos foi abaixo de 0,10 m³ m⁻³. Os teores médios de água do solo foram de 0,35, 0,34 (testemunha) e 0,36 kg kg⁻¹ (aveia).

As médias da produtividade de todos os tratamentos foram menores que a produtividade média de 2.337 kg ha⁻¹ do Paraná, conforme dados da CONAB (2010),

devido provavelmente à estiagem ocorrida nos meses de Dezembro de 2008 e Janeiro de 2009, a qual prejudicou o perfeito desenvolvimento da cultura da soja na região na qual foi instalado o experimento (Figura 2B, Anexo B; SIMEPAR, 2010).

A produtividade da soja variou de 708 (consórcio 1) a 2.971 kg ha⁻¹ (trigo). A produtividade média foi menor no consórcio 1 (1.472 kg ha⁻¹), seguido da aveia (1.666 kg ha⁻¹) e do consórcio 2 (1702 kg ha⁻¹). As maiores médias de produtividade foram obtidas no tratamento trigo (1.872 kg ha⁻¹) e na testemunha (1.793 kg ha⁻¹). A razão desse resultado contraditório foi a época do manejo dos tratamentos (aveia, consórcio 1 e consórcio 2), que resultou na germinação e rebrota das próprias plantas de cobertura nas áreas onde foram implantadas como tratamento de inverno, tornando-se plantas invasoras e competindo com as plantas de soja no início do estabelecimento da cultura.

Com o objetivo de conciliar a melhor época de manejo para proporcionar o máximo de produção de massa vegetal, tanto para a aveia, como para o nabo forrageiro e a ervilhaca comum, as plantas de cobertura foram manejadas com rolo-faca, aproximadamente, aos 100 dias após semeadura, na fase de pleno florescimento e início de enchimento de grãos, seguindo recomendações de Calegari et al. (1992) e Calegari (2006). No entanto, o desenvolvimento das plantas de cobertura não é uniforme e foi bastante rápido, tendo em vista as excelentes condições climáticas na época da implantação dos tratamentos. Dessa forma, mesmo estando na fase de florescimento para maioria das plantas, havia plantas com sementes que já se encontravam em maturidade fisiológica quando os tratamentos (aveia, consórcio 1 e consórcio 2) foram manejados.

Conforme Rizzardi e Silva (2006), o manejo da aveia deve ser efetuado na fase de floração a grãos leitosos, antes da emissão de 50% das panículas, para evitar a interferência com as culturas implantadas em sucessão. Araújo e Rodrigues (2000) destacam que o manejo mecânico é eficiente apenas quando realizado no estágio correto de desenvolvimento da aveia, ou seja, na fase de grão leitoso, quando a produção de massa vegetal atinge o máximo e a rebrota é reduzida. O manejo antecipado resulta em rebrota intensa da espécie e, posterior, na formação de sementes viáveis e competição com a cultura seguinte.

Silva et al. (2006) destacam que o nabo forrageiro, se mal manejado, pode se transformar em planta invasora importante para os cultivos subsequentes. Desta forma, o uso exclusivo do rolo-faca representa uma alternativa mais econômica ao produtor, uma vez que requer apenas uma operação agrícola. Contudo, deve-se considerar que a eficiência do rolo-faca depende do estágio da cultura a ser manejada e da uniformidade de seu desenvolvimento (ARAÚJO; RODRIGUES 2000).

Nessa segunda análise, não foi analisada a estrutura de dependência espacial dos atributos físicos do solo através da construção do semivariograma experimental, pois a grade amostral utilizada não proporcionou o mínimo de 30 pares de pontos para cálculo da

semivariância como sugerido por Journel e Huijbregts (1978), Guerra (1988) e Wollenhaupt et al. (1997) (Figura 3C do anexo C). Sendo assim, para elaboração dos mapas temáticos referentes aos atributos físicos do solo, utilizou-se o interpolador inverso da distância.

Contudo, o estudo da dependência espacial foi possível para a produtividade da soja que foi determinada em uma grade amostral mais adensada (60 pontos em cada tratamento). O método validação cruzada, por meio do índice de comparação de erros (ICE), apontou, na análise geoestatística, o modelo com o melhor ajuste para cada semivariograma experimental da produtividade da soja (Tabela 9).

Tabela 9 Índice de comparação de erros (ICE) para seleção do melhor modelo teórico

Tratamento	ICE do Modelo		
	Esférico	Exponencial	Gaussiano
PRODUTIVIDADE			
Aveia	1,946	1,975	1,894
Consórcio 1	1,991	1,717	2,000
Consórcio 2	0,577	1,172	1,070
Trigo	1,118	2,000	0,224
Testemunha	1,712	1,229	2,000

Obs. para cada variável o melhor ajuste (ICE menor) está em destaque.

O comportamento espacial da produtividade da soja para cada tratamento pode ser observado nos semivariogramas ajustados (Figuras de 4D, anexo D). A distância máxima em que os pontos estão correlacionados espacialmente (alcance; Tabela 10) variou de 14 metros, na produtividade da soja (consórcio 1) e até 123 m, no trigo. Os maiores alcances foram encontrados nos tratamentos aveia (76 m) e trigo (123 m). Destaca-se que o grau de dependência espacial da produtividade da soja classificou-se como moderada ($25 \leq E\% \leq 75\%$), na maioria dos tratamentos (excetuando-se o tratamento aveia). Os resultados corroboram com os obtidos por Johann et al. (2004), Rosa Filho et al. (2009) e Amado et al. (2007).

Tabela 10 Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para a produtividade da soja para os tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha

Tratamento	Modelo	C_0 (efeito pepita)	C_0+C_1 (patamar)	a (alcance)	$E\%*$ $(C_0/(C_0+C_1)) \times 100$	Dependência espacial
PRODUTIVIDADE						
Aveia	Esférico	147570	185342	76	80	fraca
Consórcio 1	Exponencial	65061	139100	14	47	moderada
Consórcio 2	Esférico	53453	177503	34	30	moderada
Trigo	Gaussiano	219980	354450	123	62	moderada
Testemunha	Exponencial	130170	212068	56	61	moderada

*E% = coeficiente de efeito pepita.

Entre os tratamentos, observaram-se diferentes estruturas de dependência espacial, provavelmente, devido ao fato das grades amostrais serem diferentes em cada tratamento. Além disso, é possível que os diferentes manejos tenham alterado a variabilidade espacial

dos atributos do solo indicando que a variabilidade espacial de determinado atributo físico não depende apenas dos fatores de formação do solo, mas também do manejo adotado, conforme enfatiza Castrignano et al. (2000) e Lima et al. (2009).

Nos mapas temáticos referentes à produtividade da soja (Figura 8), construídos com o auxílio da interpolação por krigagem ordinária, pode-se observar que no tratamento aveia (Figura 8a) a produtividade variou de 1300 a 2000 kg ha^{-1} , com predominância (63% da área) de uma produtividade intermediária (1533,3 a 1766,6 kg ha^{-1}).

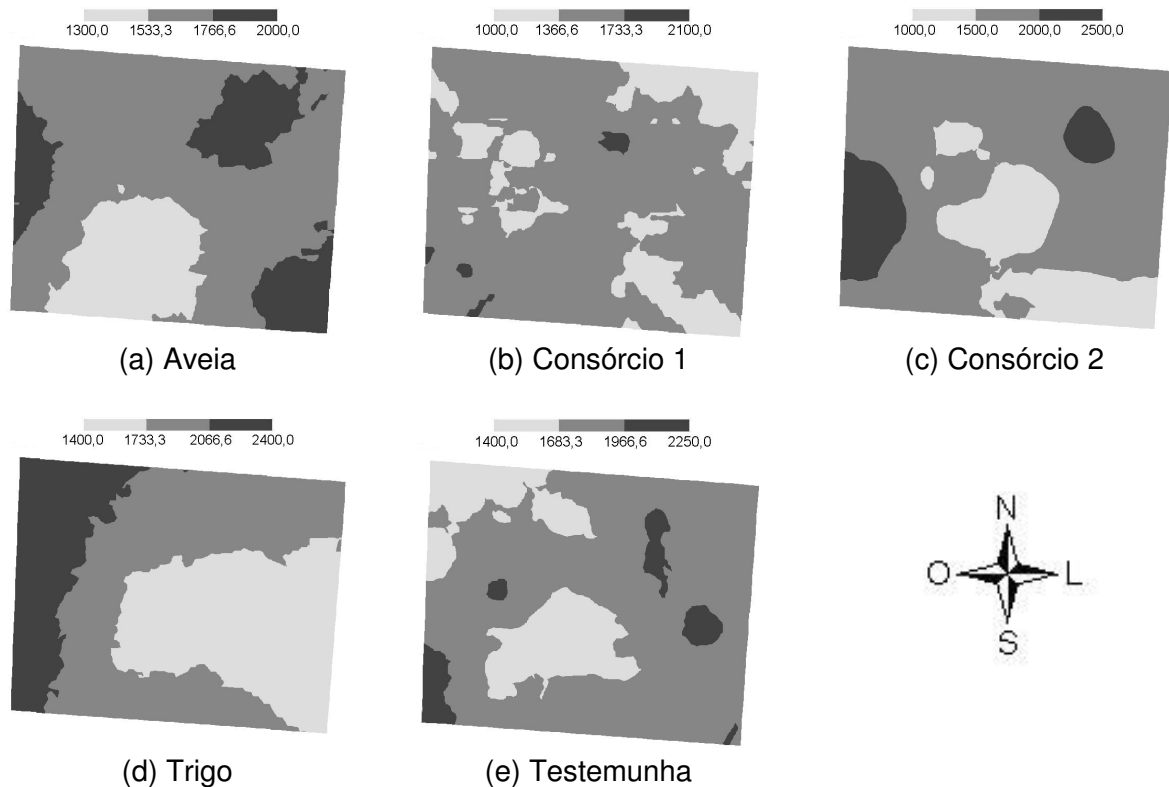


Figura 8 Distribuição espacial da produtividade da soja (kg ha^{-1}) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.

O consórcio 1 (Figura 8b) e o consórcio 2 (Figura 8c) obtiveram 1000 kg ha^{-1} de soja como produtividade mínima, e uma produtividade máxima de 2500 e 2100 kg ha^{-1} , para esse e aquele, respectivamente. As produtividades intermediárias foram obtidas em aproximadamente 70% da área, para os dois tratamentos. No trigo (Figura 8d), a produtividade diminuiu da região oeste (2066,6 a 2400 kg ha^{-1} em 21% da área), para região central e mais ao leste do mapa, com produtividades de 1400 a 1733,3 kg ha^{-1} (34% da área).

Na testemunha (Figura 8e), observaram-se áreas no extremo noroeste e no centro do mapa com menores produtividades (1400 a 1683,3 kg ha^{-1}). Isso representa cerca de 20% da área, possivelmente pela maior incidência de plantas invasoras nesses pontos, conforme observadas em campo.

Nos mapas temáticos relativos à macroporosidade do solo observou-se valores intermediários de $0,04$ a $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,05$ a $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ prevalecendo em 94 e 96% da área, respectivamente, nos tratamentos aveia (Figura 9a) e consórcio 1 (Figura 9b). No consórcio 2 (Figura 9c) e testemunha (Figura 9e) os valores de macroporos variaram de $0,01$ a $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ com áreas de maiores valores ($0,08$ a $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) correspondentes a 13% da área, principalmente no noroeste do mapa (consórcio 2) e em toda região oeste no tratamento testemunha (42%). No trigo observou-se valores que variaram de $0,06$ a $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas extremidades do mapa, predominantemente em 52% da área.

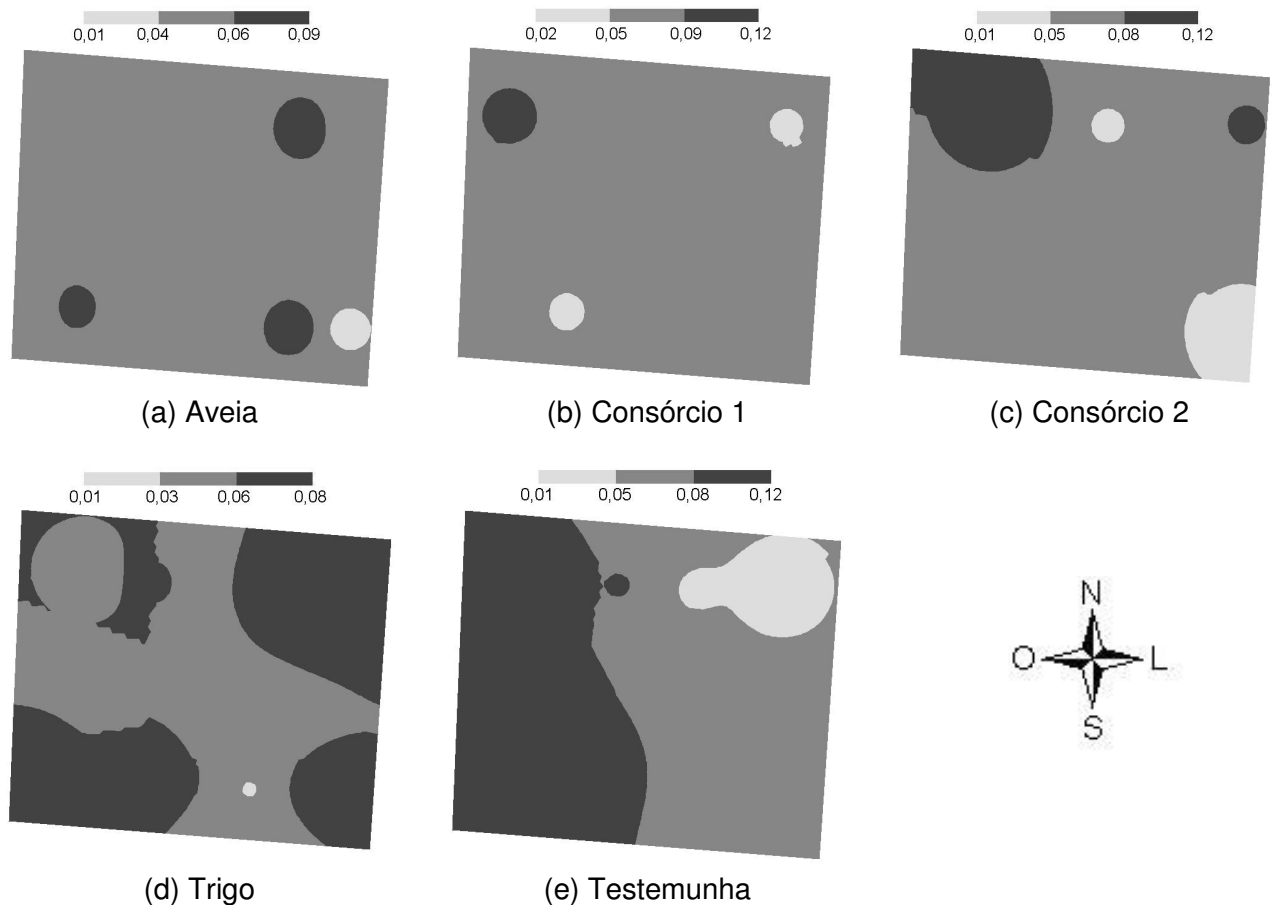


Figura 9 Distribuição espacial da macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) para os tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.

A macroporosidade teve seus valores reclassificados (Figura 10) segundo os valores apresentados por Kiehl (1979). Os valores encontrados nos tratamentos aveia (Figura 10a), (Figura 10c) e trigo (Figura 10d) apresentam-se todos dentro da mesma faixa de classificação, ou seja, abaixo de $0,10 (\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$, representando valores considerados críticos para o perfeito desenvolvimento das plantas. Os tratamentos consórcio 1 (Figura 10b) e consórcio 2 (Figura 10c) apresentaram uma pequena região (menor que 1% da área) no noroeste do mapa, onde a macroporosidade é considerada ótima (valores que estão entre

0,10 e $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) ao passo que na testemunha esses valores ocuparam pequenas áreas (2% da área) no sudoeste do mapa.

Destaca-se o fato de que, em comparação visual com os mapas temáticos da macroporosidade reclassificada da análise física do solo realizada anteriormente a implantação dos tratamentos (Figura 7b), e também comparando com os demais tratamentos, a testemunha foi o tratamento que apresentou maior área com classificação de macroporosidade ótima. Esse tratamento foi deixado em repouso durante todo o inverno, e ocorreu a incidência de plantas espontâneas que possivelmente atuaram como melhoradoras da macroporosidade do solo. Conforme Figueiredo et al. (2007) as plantas indicadoras de compactação do solo provavelmente possuem mecanismos de rompimento das camadas compactas e pouca exigência de umidade e aeração que são conseqüências da compactação do solo.

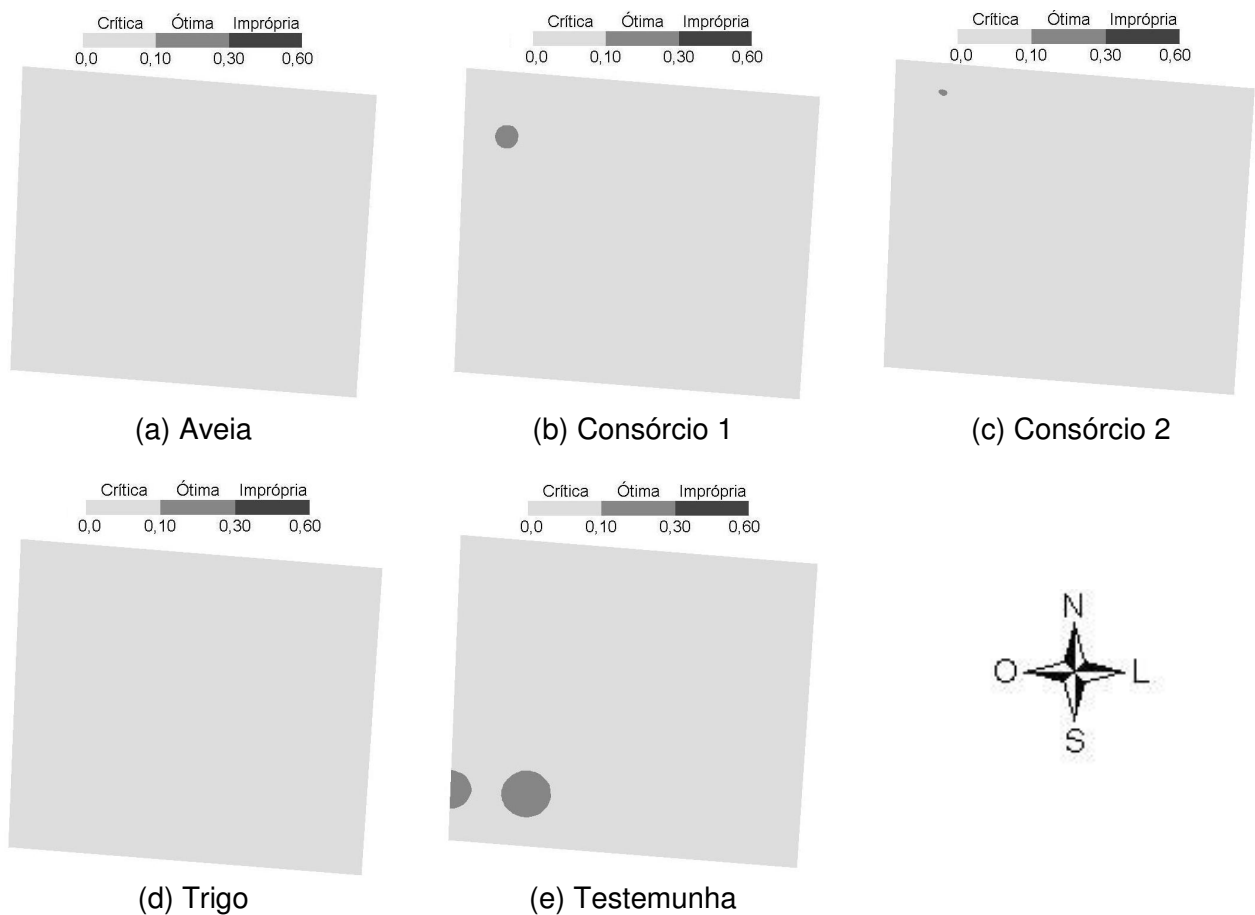


Figura 10 Distribuição espacial da macroporosidade do solo, reclassificada ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.

Nos tratamentos consórcio 1 (Figuras 11b) e trigo (Figuras 11d) a microporosidade foi de $0,48$ a $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,48$ a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, em 97 e 95% da área. No tratamento aveia (Figura 11a), a microporosidade variou de $0,48$ a $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo que a maior parte da área foi representada pela microporosidade de $0,49$ a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (83% da área) e uma menor área da região sudoeste (17%) atingiu os valores mais elevados de

microporosidade (de 0,50 a 0,51 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Comportamento semelhante foi observado no tratamento consórcio 2 (Figura 11c), em qual 69% da área foi representada por valores intermediários de microporosidade (de 0,48 a 0,49 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), e a região sudeste e nordeste teve os maiores valores de microporos que variaram de 0,49 a 0,50 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (27% da área). Enquanto que na testemunha, 22% da área tiveram menores valores de microporos (0,47 a 0,49 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em toda região oeste do mapa e 73% da área mostraram-se com valores intermediários (0,49 a 0,50 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

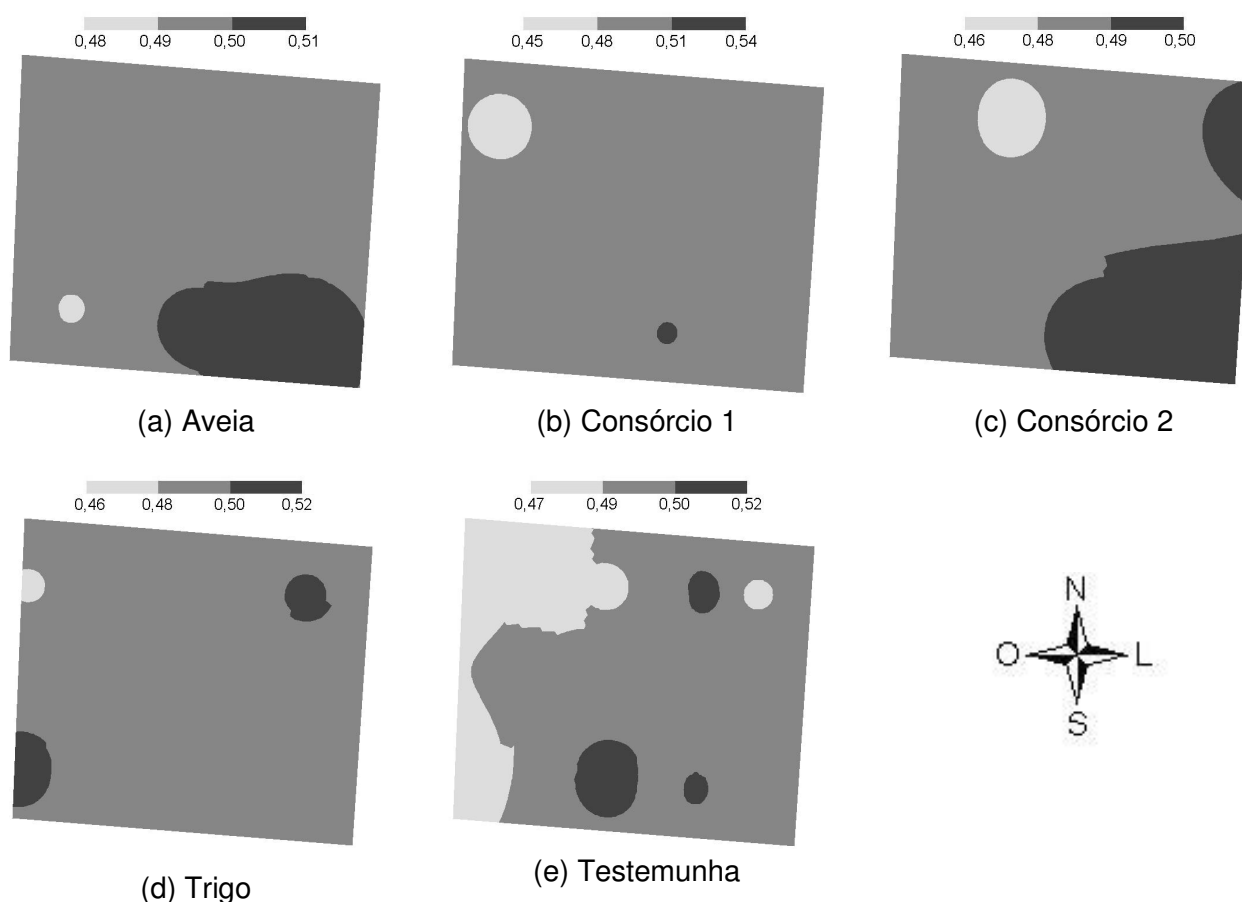


Figura 11 Distribuição espacial da microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.

Valores intermediários de poros totais (0,54 a 0,58 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) apresentaram-se em maior parte do mapa nos tratamentos consórcio 1 (Figura 12b; 97% da área) e testemunha (Figura 12e; 71% da área), destacando nesse último, uma área no sudoeste, correspondente a 26% da área total, com valores mais elevados de porosidade total (0,58 a 0,63 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

No tratamento aveia (Figura 12a) a porosidade total variou de 0,51 a 0,61 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, prevalecendo em 97% da área, valores intermediários de 0,54 a 0,57 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Da mesma forma, no tratamento consórcio 2 (Figura 12c) os valores intermediários de poros totais (0,53 a 0,57 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) prevaleceram em 97% da área. No trigo (Figura 12d), os valores que

variaram de 0,56 a 0,59 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, apresentaram-se em 14% da área, predominando nas regiões nordeste e sudoeste do mapa.

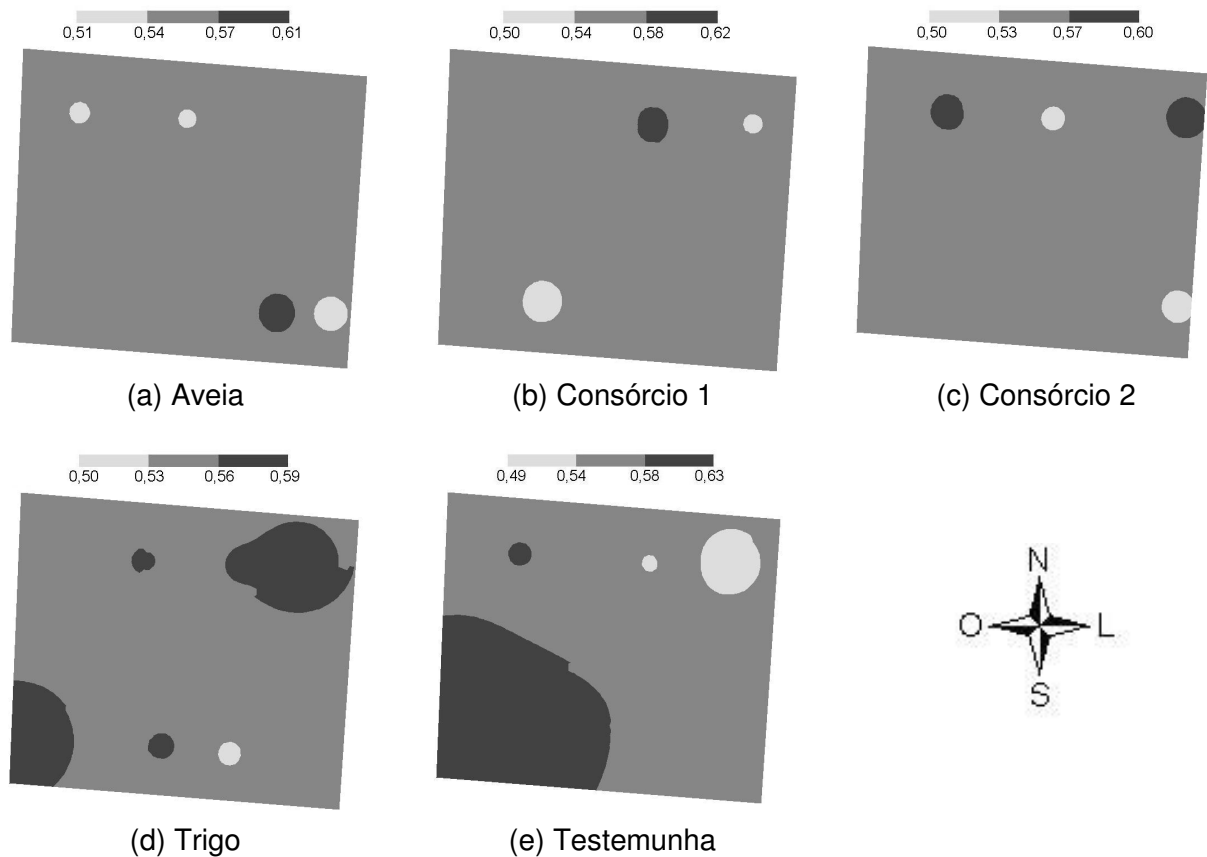


Figura 12 Distribuição espacial da porosidade total do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.

Cada tratamento obteve diferentes valores e distribuições espaciais de densidade do solo (Figura 13). No tratamento aveia (Figura 13a) a densidade do solo variou de 1,26 a 1,40 kg dm^{-3} , sendo que prevaleceram em 73% da área, densidades de 1,31 a 1,35 kg dm^{-3} . Mas com áreas que totalizam 26% da área total apresentando valores mais elevados de densidade (1,35 a 1,40 kg dm^{-3}), na região central ao norte do mapa, principalmente.

No consórcio 1 (Figura 13b) 99% da área foi representada por densidades de 1,28 a 1,38 kg dm^{-3} . No consórcio 2 (Figura 13c) predominou em 81% da área, valores intermediários de 1,32 a 1,36 kg dm^{-3} , enquanto que em 18% da área apresentaram-se maiores densidades (1,36 a 1,41 kg dm^{-3}), na região centra-sul do mapa, principalmente.

No tratamento trigo (Figura 13d) observou-se os maiores valores de densidade do solo (1,39 e 1,43 kg dm^{-3}) em 20% da área, no extremo noroeste do mapa, predominantemente. Os menores valores de densidade (1,30 a 1,34 kg dm^{-3}) concentraram-se no sudeste do mapa (3% da área), enquanto que valores intermediários (1,34 a 1,39 kg dm^{-3}) prevaleceram em 76% da área.

Observaram-se valores intermediários de densidade ($1,29$ a $1,36$ kg dm^{-3}) em 89% da área na testemunha (Figura 13e). As menores densidades ($1,23$ a $1,29$ kg dm^{-3}) concentram-se em duas pequenas áreas no oeste do mapa (representando 2% da área), enquanto que maiores densidades ($1,36$ a $1,42$ kg dm^{-3}) apresentaram-se em pequenas regiões no centro-norte e sudeste do mapa, totalizando 9% da área.

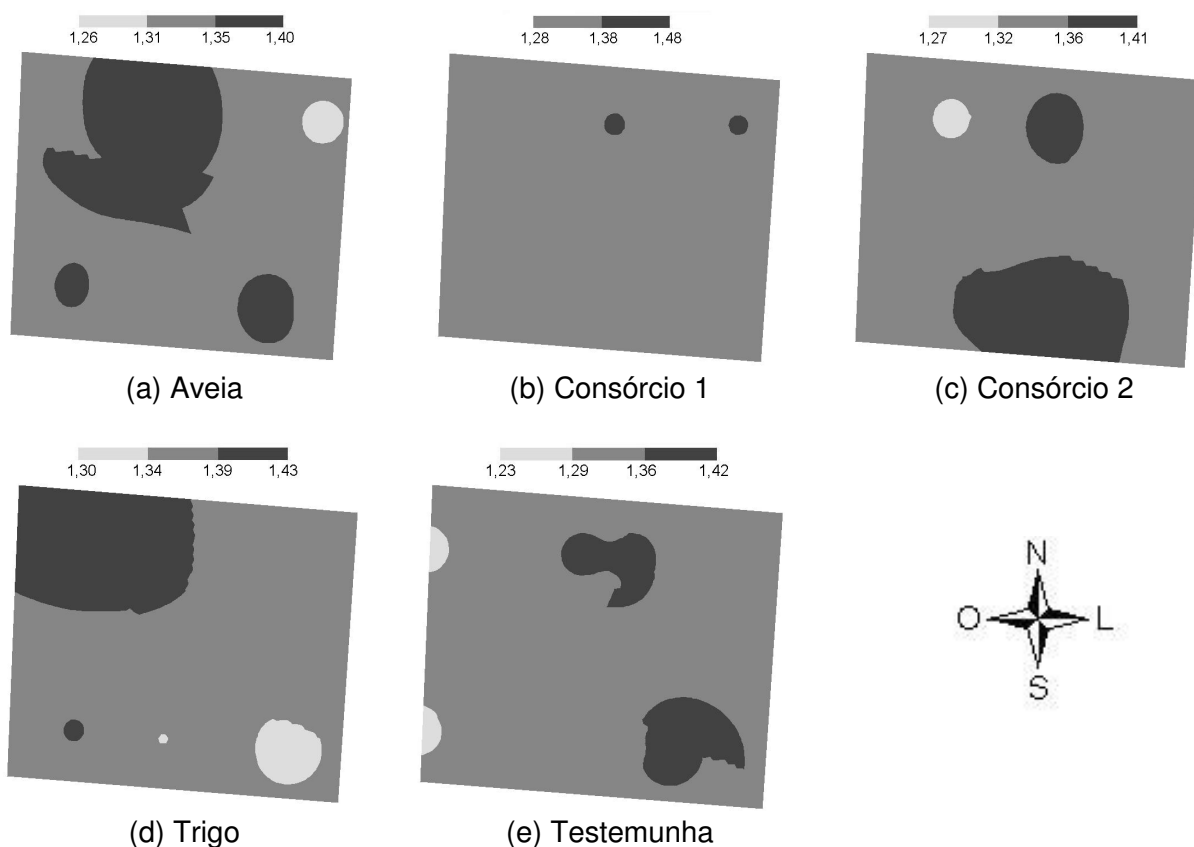


Figura 13 Distribuição espacial da densidade do solo (kg dm^{-3}) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.

A variável densidade do solo (Figura 13) foi reclassificada (Figura 14) utilizando os valores críticos recomendados por Kiehl (1979). Considerando-se valores intermediários de $1,25$ a $1,60$ kg dm^{-3} como sendo densidades críticas. Utilizou-se o valor máximo igual a $2,00$ kg dm^{-3} exclusivamente para classificação da legenda. Verificou-se que, em todos os tratamentos, toda a área apresentou-se com valores de densidades consideradas críticas.

Na primeira análise da densidade solo (Figura 7f), foi recomendado que manejos adequados fossem adotados para diminuição da densidade do solo, a fim de se evitar uma possível compactação do solo. No entanto, os manejos com plantas de coberturas (aveia, consórcio 1 e consórcio 2) não tiveram um efeito imediato na diminuição da densidade do solo, como observado nos mapas da Figura 14. Resultados semelhantes foram encontrados por Kubota et al. (2005) e Nicoloso et al. (2008) ao trabalharem com nabo forrageiro e aveia.

Costa et al. (2009) encontraram valores menores de densidade na camada superficial somente após dois anos de rotação de culturas. O destaque foi para o efeito cumulativo das plantas de cobertura sobre as propriedades do solo, uma vez que em uma avaliação feita após um ano de rotação, não foram encontradas diferenças significativas sobre a densidade.

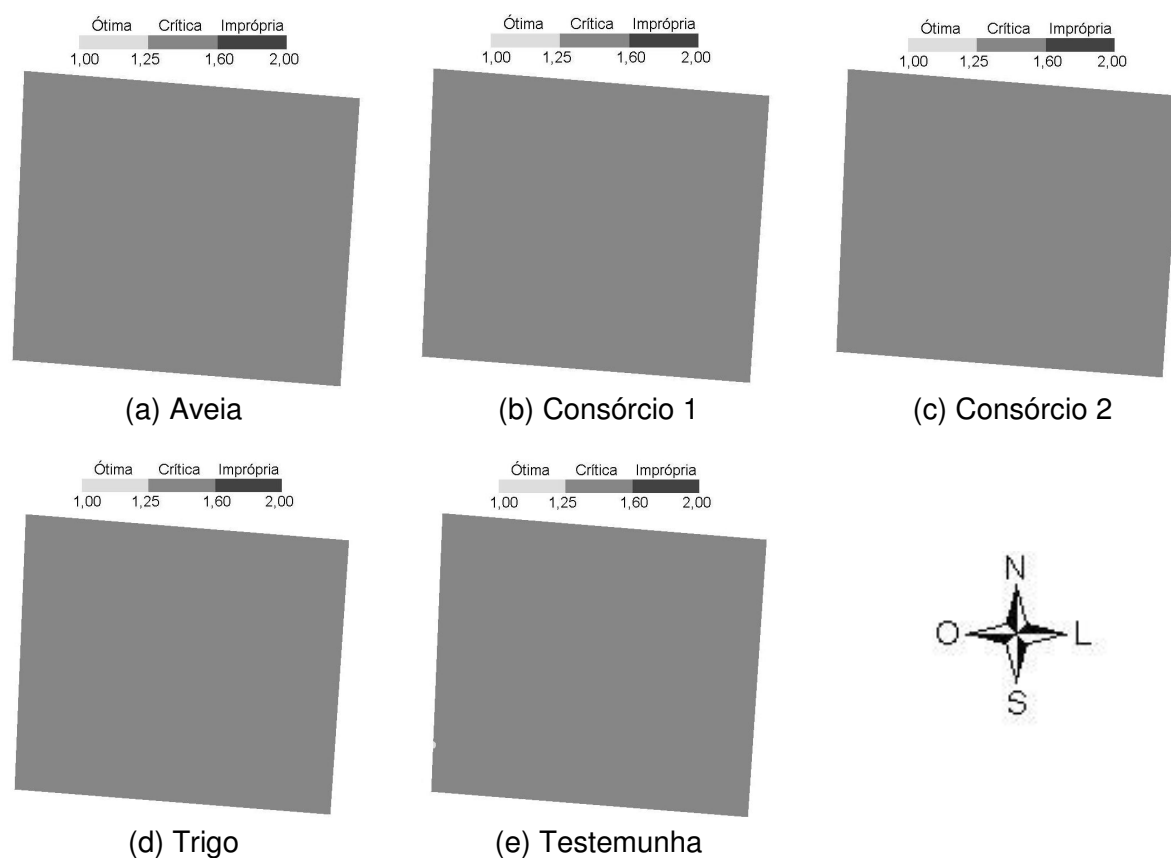


Figura 14 Distribuição espacial da densidade do solo, reclassificada (kg dm^{-3}) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.

O teor de água do solo (Figura 15) foi representado, em 97% da área, por valores intermediários ($0,35$ a $0,37 \text{ kg kg}^{-1}$) no tratamentos aveia (Figura 15a). No consórcio 1 (Figura 15b), observou-se menores teores de água ($0,31$ a $0,34 \text{ kg kg}^{-1}$) no extremo sudeste da área (9% da área) e teores que variaram de $0,34$ a $0,38 \text{ kg kg}^{-1}$ no restante da área. Enquanto que no consórcio 2 (Figura 15c) os teores de água variaram de $0,34$ a $0,36 \text{ kg kg}^{-1}$, no tratamento trigo (Figura 15d) e testemunha (Figura 15e) esses teores foram intermediários e prevaleceram 89 e 85% da área.

Na comparação dos tratamentos em relação à testemunha (que foi deixada em pousio durante todo o inverno), obteve-se a média dos coeficientes de desvio relativo (CDR) dos mapas temáticos de cada tratamento (Tabela 12). Este valor representa a diferença média, em módulo, dos valores interpolados em cada tratamento em relação ao tratamento testemunha, considerado como referência.

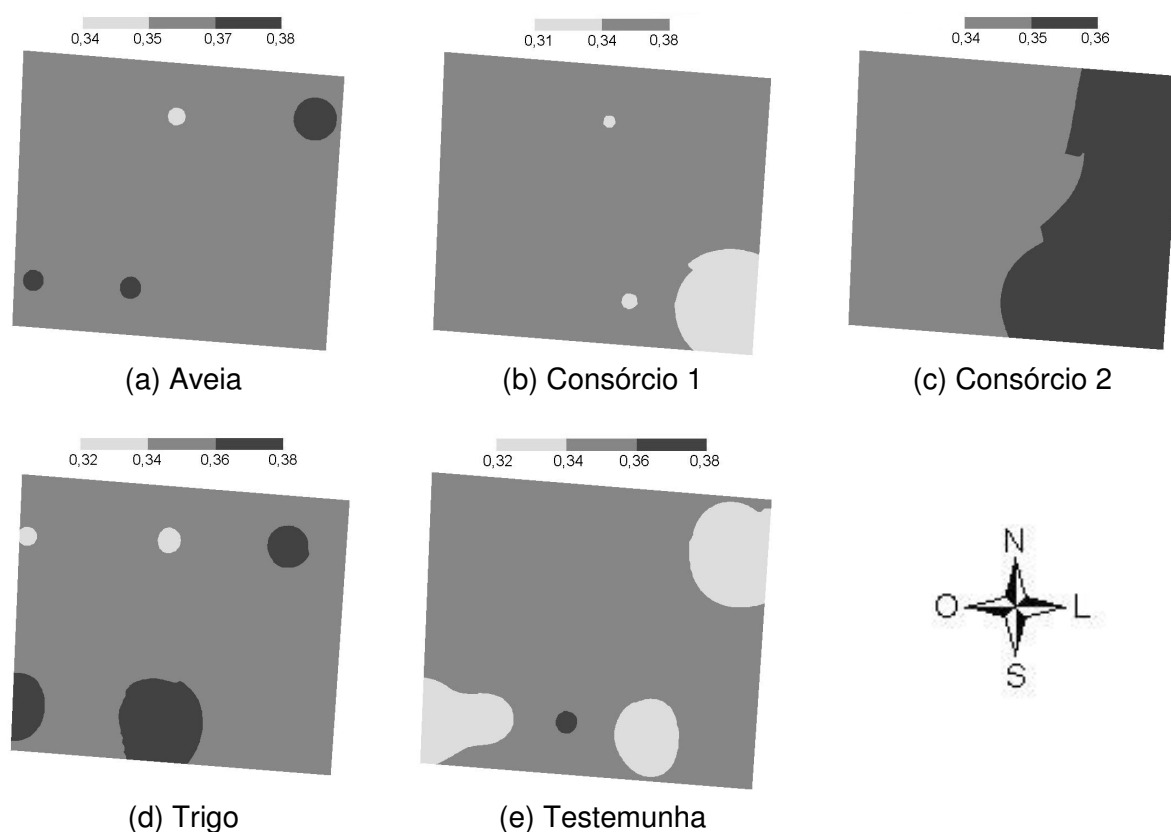


Figura 15 Distribuição espacial do teor de água do solo (kg kg^{-1}) para os tratamentos de inverno aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha.

Notou-se que diferenças maiores de 5%, consideradas arbitrariamente como significativas, ocorreram somente nas variáveis: macroporosidade do solo (média de 21,9%), produtividade da soja (média de 12,0%) e teor de água do solo e, excepcionalmente, no tratamento aveia (CDR = 5,9%). No restante das variáveis, para todos os tratamentos, as diferenças não foram significativas, com variação de 0,6 a 3,7% em relação aos valores interpolados no tratamento testemunha.

Tabela 12 Valores médios dos coeficientes de desvio relativo (CDR, %) para os mapas da macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade, teor de água do solo e produtividade da soja para os tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha

Variável	Tratamentos				Média por atributo
	Aveia	Consórcio 1	Consórcio 2	Trigo	
Macroporosidade	26,5%	17,1%	20,2%	24,0%	21,9%
Microporosidade	0,6%	0,7%	1,4%	0,8%	0,9%
Porosidade Total	3,3%	2,7%	3,2%	3,1%	3,1%
Densidade	1,4%	1,1%	1,2%	2,5%	1,5%
Teor de água	5,9%	1,8%	2,0%	3,7%	3,3%
Produtividade	8,0%	17,7%	10,7%	11,5%	12,0%

Para a macroporosidade do solo, a aveia foi o tratamento que mais se diferenciou da testemunha, com um CDR de 26,5%. Isso significa que a macroporosidade desviou em

média 26,5% dos valores de macroporos interpolados no tratamento testemunha. Seguido dos tratamentos trigo (CDR = 24,0%) e consórcio 2 (CDR = 20,2%) e do consórcio 1 que teve o menor desvio em relação à macroporosidade da testemunha, com um CDR de 17,1%.

No teor de água do solo, destaca-se o tratamento aveia, cujo desvio médio foi de 5,9% em relação aos teores de água do solo na testemunha. Os valores da produtividade da soja tiveram desvios médios de 8,0 a 17,7%, nos tratamentos aveia e consórcio 1, respectivamente. Já o consórcio 2 e o trigo obtiveram um CDR de 10,7 e 11,5%, respectivamente.

Por meio do CDR, evidenciaram-se as variáveis que apresentaram desvios considerados significativos em relação à testemunha, tida como referência por ter sido deixada em pousio durante o inverno. No entanto, o CDR é um valor calculado em módulo, ou seja, não é possível estabelecer se essa diferença ocorrida entre os tratamentos foi negativa ou positiva. Por essa razão, o desvio relativo de cada ponto interpolado foi calculado, sem considerar o módulo. Assim, foi possível calcular os locais em que houve diferença negativa ou positiva em relação aos valores da testemunha, bem como a porcentagem da área em que ocorreram desvios negativos, positivos, ou onde não ocorreu qualquer desvio (zero) (Tabela 13).

Nota-se que para a macroporosidade do solo, em todos os tratamentos, ocorreram maiores áreas com essa variável diminuída em relação à testemunha. Tal informação discorda das encontradas por alguns autores que observaram aumento desse atributo com uso de plantas de cobertura (NICOLOSO et al., 2008; KUBOTA et al., 2005; COSTA et al., 2009). Atenção deve ser dada ao fato de que tais autores trabalharam com testes de médias e, pela Tabela 8, pode-se constatar que as médias dos tratamentos consórcio 1 e consórcio 2 não diferiram da macroporosidade média da testemunha. Pois, apesar da maioria da área ter tido menores valores de macroporosidade em relação à testemunha, 42,4% (consórcio 1) e 32,7% (consórcio 2) da área tiveram maiores valores de macroporosidade com a utilização de plantas de cobertura.

A densidade, juntamente com a macroporosidade do solo, é um atributo relacionado à compactação do solo, e para essa variável, 80,3% da área tiveram valores maiores de densidade em relação à testemunha quando utilizado o trigo no inverno. Já com a utilização da aveia preta (aveia), houve diminuição da densidade para 49,9% da área. Costa et al. (2009) também encontraram menores densidades do solo na rotação de culturas quando comparados com sucessão de culturas trigo/soja/milho.

Resultados adversos encontrados referentes à densidade do solo, principalmente para o consórcio 2, se assemelham aos encontrados por Kubota et al. (2005) e Nicoloso et al. (2008) que atribuíram o aumento de densidade na camada mais superficial do solo à pressão lateral exercida pelas raízes do nabo forrageiro, devido ao grande diâmetro de sua

raiz pivotante principal. Nicoloso et al. (2008) ainda explicaram que alguns agricultores têm aumentado a densidade de semeadura do nabo forrageiro visando diminuir o diâmetro e aumentar o número de raízes pivotantes por unidade de área. Teoricamente, a pressão lateral da raiz do nabo forrageiro sobre o solo seria reduzida e o número de bioporos formados pelas raízes após sua decomposição aumentado. No entanto, a eficiência dessa estratégia de manejo sobre a melhoria dos atributos físicos do solo ainda não está comprovada por trabalhos científicos.

Tabela 13 Porcentagem da área correspondente aos valores de desvios relativos instantâneos

Tratamento	Porcentagem da área correspondente aos desvios relativos		
	Negativos	Positivos	Zero
MACROPOROSIDADE			
Aveia	86,4	13,4	0,2
Consórcio 1	57,2	42,4	0,4
Consórcio 2	67,1	32,7	0,2
Trigo	76,7	23,1	0,2
MICROPOROSIDADE			
Aveia	22,4	76,4	1,2
Consórcio 1	49,1	50,0	0,9
Consórcio 2	96,4	3,5	0,1
Trigo	53,7	45,6	0,7
POROSIDADE TOTAL			
Aveia	85,7	14,0	0,3
Consórcio 1	68,4	31,4	0,2
Consórcio 2	87,8	12,1	0,1
Trigo	79,8	20,1	0,1
DENSIDADE			
Aveia	49,8	50,1	0,1
Consórcio 1	47,7	52,1	0,2
Consórcio 2	40,6	59,0	0,4
Trigo	19,6	80,3	0,1
TEOR DE ÁGUA			
Aveia	0,1	99,9	0,0
Consórcio 1	17,6	82,1	0,4
Consórcio 2	7,3	92,4	0,3
Trigo	3,2	96,7	0,1
PRODUTIVIDADE			
Aveia	89,9%	10,1%	0,0%
Consórcio 1	95,5%	4,5%	0,0%
Consórcio 2	70,9%	29,1%	0,0%
Trigo	40,2%	59,8%	0,0%

Obs. Células destacadas representam a maior área por tratamento.

Em relação à porosidade total, todos os tratamentos obtiveram maiores áreas com desvios negativos em relação à testemunha, discordando de Lopes et al. (2007b) que

obtiveram melhoria na porosidade do solo com o cultivo de aveia preta e nabo forrageiro em rotação com soja e milho.

Já para o teor de água, 82,1 (consórcio 1) a 99,9% (aveia) da área tiveram aumento no teor de água quando comparados com a testemunha. O aumento do teor de água deveu-se provavelmente aos restos vegetais das plantas de cobertura utilizadas, a fim de proteger e manter a umidade do solo. Destacou-se o tratamento aveia, no qual o teor de água foi maior em 99,9% da área, quando comparado à testemunha que estava com o solo bastante exposto na época da coleta, contando apenas com a cobertura das plantas espontâneas que ali se desenvolveram. O trigo também manteve o teor de água maior em 96,7% da área, posto que a palhada remanescente da colheita ainda cobria perfeitamente o solo no momento da coleta (Tabela 1E, Anexo E).

Kubo et al. (2007) também observaram maior produção de matéria seca das culturas de inverno (trigo, aveia branca e aveia preta) em relação ao pousio. A matéria seca na superfície do solo pode ter atenuado os efeitos da variação da temperatura do solo e conseqüentemente mantido uma maior umidade no solo.

A persistência da cobertura vegetal sobre o solo depende da taxa de decomposição, que varia em função da espécie e sua composição química, de parâmetros climáticos, da forma de manejo da cobertura, da biomassa inicial e da idade do vegetal na época do manejo (ARAÚJO; RODRIGUES, 2000). O consórcio 1 e consórcio 2 eram compostos por nabo forrageiro e possivelmente tiveram uma decomposição mais rápida devido à menor relação C/N da palhada (RIZZARDI; SILVA, 2006). Assim, o solo ficou mais exposto, quando comparado com a aveia e o trigo (alta relação C/N), como observado em campo.

Os menores valores de produtividade da soja ocorreram nos tratamentos aveia, consórcio 1 e consórcio 2, com cerca de 89, 95 e 71% da área, com valores menores de produtividade em relação à testemunha, respectivamente. No entanto, os resultados com plantas de cobertura utilizadas em rotação de culturas, que não influenciaram nem mesmo aumentaram a produtividade das culturas comerciais, foram encontrados por diversos pesquisadores (KUBO et al., 2007; ROSA et al., 2009; CARVALHO et al., 2004; LOPES et al. 2007a; NUNES et al., 2006).

Como já explicado, em virtude do manejo realizado em época inadequada, as plantas de cobertura, nas áreas onde foram implantadas como tratamento de inverno, tornaram-se plantas invasoras e competiram com as plantas de soja no início do estabelecimento da cultura, afetando a produtividade da soja. Entre os tratamentos, então, destaca-se o trigo, com maior área onde ocorreram os desvios relativos positivos para produtividade da soja.

Entretanto, Kubota et al. (2005), ao estudarem os efeitos da substituição do trigo pela adubação verde com nabo forrageiro, detectaram efeitos positivos no crescimento e produtividade da soja plantada em seguida do nabo forrageiro, em um ano muito seco. Os

autores também destacaram que aproximadamente 75% do N absorvido pelo trigo foram removidos do solo por ocasião da colheita, enquanto a maioria dos nutrientes do resíduo do nabo retornou ao solo antes do plantio da soja, com efeitos positivos em relação à fertilidade do solo.

As estatísticas descritivas referentes aos valores de desvio relativos (Tabela 2F, anexo F) foram utilizadas para elaboração de uma única legenda para cada variável nos quatro tratamentos comparados com a testemunha, utilizando o valor geral mínimo e máximo dos desvios relativos.

Nos mapas elaborados com os desvios relativos (Figura 16), pode-se observar a distribuição espacial dos desvios relativos dos valores interpolados de macroporosidade para cada tratamento em relação aos valores interpolados de macroporosidade da testemunha. Nota-se que os valores de desvios relativos para macroporosidade variaram de -82 a 559%, com a maior parte da área com desvio e variação de -55 a 0%. Destaca-se o nordeste do mapa como o local em que a implantação da aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo influenciaram positivamente aumentando a macroporosidade do solo em relação ao solo deixado em pousio durante o inverno. Como discutido anteriormente, vários pesquisadores tiveram resultados positivos com o uso de plantas de cobertura sobre a macroporosidade do solo, entretanto, utilizando-se teste de médias para obterem-se tais conclusões. Com a elaboração dos mapas temáticos dos desvios relativos, pode-se observar que, apesar da maior parte da área ter tido uma diminuição da macroporosidade em relação à testemunha (Tabela 13), observaram-se grandes áreas onde os macroporos tiveram um aumento de até 186% em relação à testemunha.

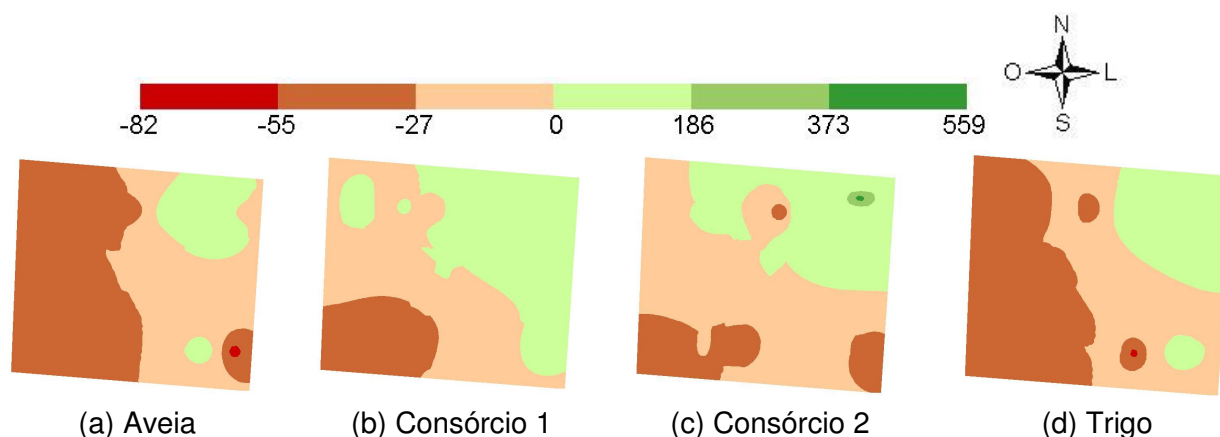


Figura 16 Mapas temáticos dos desvios relativos (%) para macroporosidade do solo dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.

Nos mapas referentes aos desvios relativos da microporosidade (Figura 17), destaca-se o consórcio 2 (Figura 17c) com 96,4% da área tendo valores menores de microporosidade quando comparados com os valores encontrados na testemunha. Isto também pode ser evidenciado na Tabela 13.

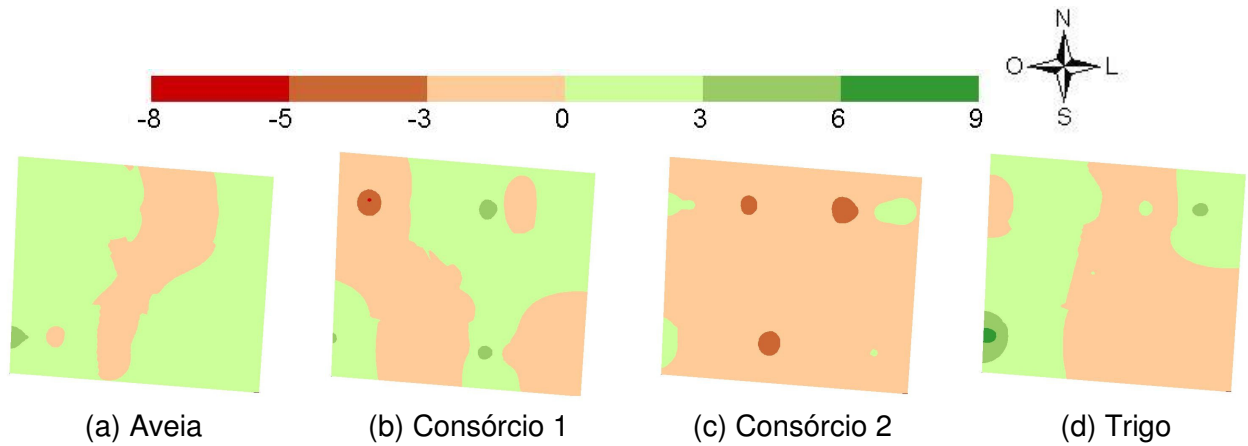


Figura 17 Mapas temáticos dos desvios relativos (%) para microporosidade do solo dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.

As regiões nas quais houve menores e maiores valores de poros totais ficaram bem evidenciadas na Figura 18. Destaca-se a região sudoeste na qual os valores de porosidade total foram menores para os quatro tratamentos em relação à testemunha. Apesar de todos os tratamentos terem maiores áreas com desvios relativos negativos em relação à testemunha (Tabela 13), foram observadas algumas áreas, na região nordeste do mapa, em que se encontraram os maiores valores de poros totais com a utilização das coberturas de inverno. Dados esses que coincidiram com a região onde se encontraram os maiores valores de macroporosidade em relação à testemunha (Figura 16).

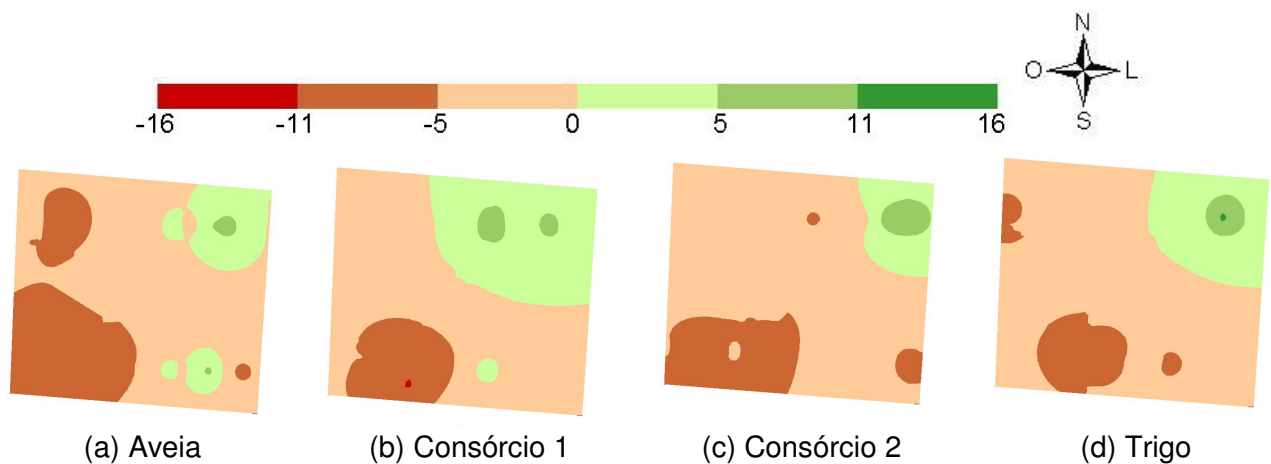


Figura 18 Mapas temáticos dos desvios relativos (%) para porosidade total do solo dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.

Os desvios relativos aos valores referentes à densidade do solo (Figura 19) foram de até -4%, principalmente, em toda região leste nos tratamentos aveia (Figura 19a) consórcio 1 (Figura 19b) e consórcio 2 (Figura 19c), evidenciando essa região como a que teve as menores densidades quando comparada à testemunha.

As áreas nas quais houve aumento da densidade (desvio positivo) corresponderam à da região central até o oeste do mapa para os quatro tratamentos, com destaque para o tratamento trigo como o único tratamento que aumentou a densidade na ordem de 9 a 13% em relação à testemunha. Portanto, evidenciaram-se os benefícios da inclusão de plantas de cobertura de inverno na rotação de culturas, em substituição ao sistema de sucessão de cultura trigo/soja.

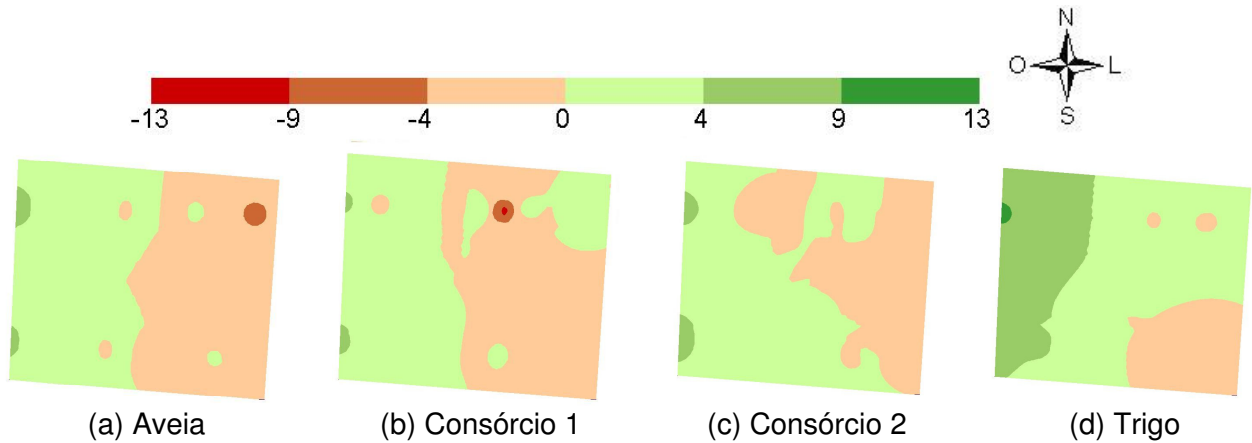


Figura 19 Mapas temáticos dos desvios relativos (%) para densidade do solo dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.

Em relação ao teor de água do solo (Figura 20), a maioria da área obteve maiores teores de água em todos os tratamentos. É importante destacar a aveia (Figura 20a), com aumento de 6 a 13% no teor de água quando comparada com a testemunha em grande parte da área. A aveia contribui para manutenção do teor de água do solo, pois apresenta lenta decomposição da palha devido à alta relação C/N e aos elevados teores de lignina que aumentam com o desenvolvimento da cultura (RIZZARDI; SILVA, 2006).

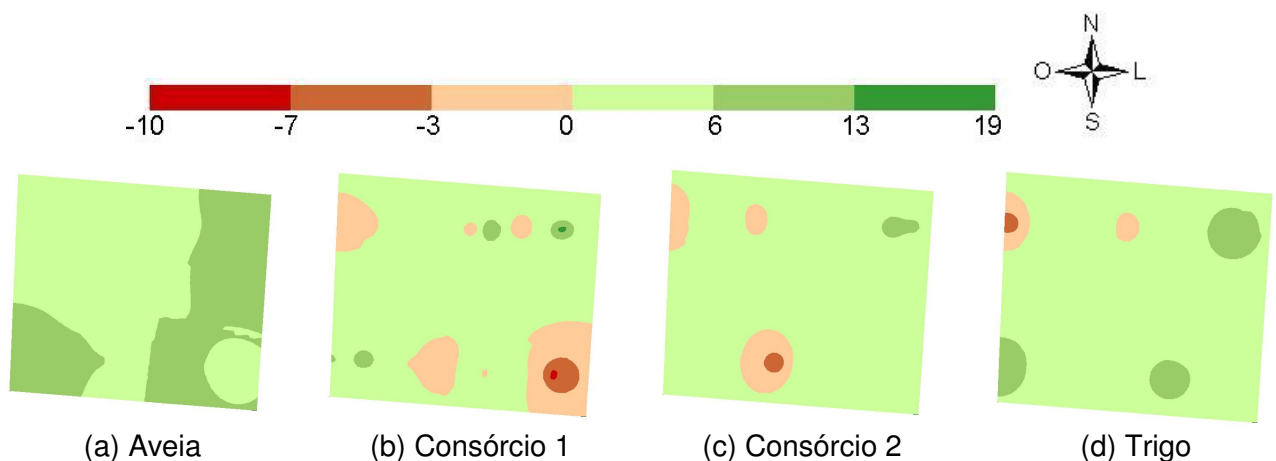


Figura 20 Mapas temáticos dos desvios relativos (%) para teor de água do solo dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.

A produtividade da soja teve os maiores desvios relativos no tratamento trigo (Figura 21d), com as áreas no noroeste do mapa, que aumentaram de 23 a 68% da produtividade em relação à produtividade obtida na testemunha. O tratamento consórcio 1 (Figura 21b) destacou-se por ter a maior área onde os desvios apresentaram-se negativos (95,5% da área), com variação de -15 a -31%, preferencialmente.

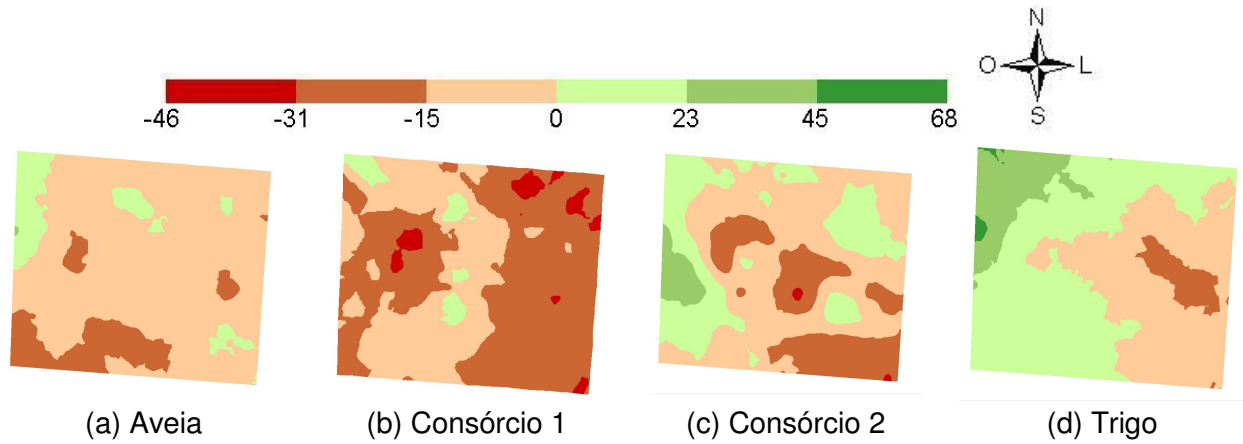


Figura 21 Mapas temáticos dos valores CDR (%) para produtividade da soja dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo em relação ao tratamento testemunha.

6 CONCLUSÃO

- Nas condições em que foram manejados os tratamentos de inverno estudados, somente o trigo proporcionou aumento de produtividade em relação à testemunha para maioria da área, em um ano de manejo;
- As plantas de cobertura utilizadas melhoraram a macroporosidade e a porosidade total em algumas regiões na área em estudo;
- O uso da aveia como planta de cobertura foi mais eficiente para manter mais elevado o teor de água do solo e por ter demonstrado maior potencial em diminuir a densidade do solo no sistema plantio direto e pode ser recomendada para rotação com a cultura da soja;
- Todas as variáveis apresentaram dependência espacial quando amostradas em uma grade com pelo menos 20 pontos amostrais.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O número de amostras coletadas em cada tratamento pode ter sido uma limitação no estudo da dependência espacial dos atributos físicos do solo. Sugere-se que novos trabalhos sejam realizados e se utilize uma grade amostral mais adensada, para que a análise geoestatística e a elaboração de mapas como forma de comparar tratamentos possa ser mais eficiente.

As plantas de coberturas, quando utilizadas em consórcio, devem ser manejadas respeitando exclusivamente a época do início do florescimento da espécie que estiver com o desenvolvimento mais adiantado. Isto pode ocorrer bem antes dos 100 dias após sementeira (período recomendado em algumas literaturas).

Apesar de a ervilhaca poder apresentar dormência de sementes. Para sementeira de aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca comum, em consórcio, recomenda-se o aumento da quantidade de sementes de ervilhaca comum e a diminuição das quantidades de sementes de aveia preta e nabo forrageiro utilizadas, pois nas quantidades utilizadas nesse trabalho, a ervilhaca comum teve seu desenvolvimento comprometido pela alta densidade de aveia e principalmente de nabo forrageiro que tem um desenvolvimento inicial muito rápido, suprimindo dessa forma, a germinação e desenvolvimento da ervilhaca comum.

Este trabalho utilizou os dados do primeiro ano da pesquisa e com amostras coletadas no perfil superficial do solo, o que possivelmente limitou a exploração de resultados mais consistentes. Dessa forma, sugere-se que trabalhos utilizando plantas de cobertura como melhoradoras das características físicas do solo sejam realizados por períodos maiores de tempo, além de se considerarem as maiores profundidades do perfil do solo na análise das características físicas do solo.

Em geral, os poucos produtores rurais da região, com histórico de uso das plantas de coberturas, relataram experiências positivas ao longo de anos de rotação. Sendo assim, apesar de alguns resultados obtidos virem de encontro às expectativas criadas antes da análise dos dados, pode-se observar em campo o grande potencial das plantas de cobertura na proteção do solo, com a formação de grande quantidade de massa vegetal, e sistemas radiculares vigorosos. Fica a ressalva de que os resultados de um ano agrícola isolado não devem desmotivar a inclusão de plantas de cobertura no sistema de rotação de culturas das propriedades agrícolas, tendo em vista os relatos e pesquisas que apontam efeitos favoráveis ao longo do tempo, no complexo agrícola.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADO, T.J.C.; PONTELLI, C.B.; SANTI, A.L.; VIANA, J.H.M.; SULZBACH, L.A.S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.8, p.1101-1110, 2007.

ALAKUKKU, L.; NUUTINEN, V.; KETOJA, E.; KOIVUSALO H.; PAASONEN-KIVEKAS, M. Soil macroporosity in relation to subsurface drain location on a sloping clay field in humid climatic conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, doi:10.1016/j.still.2009.11.002, 2009.

ARAÚJO, A.G.; RODRIGUES, B.N. Manejo mecânico e químico da aveia-preta e sua influência sobre a taxa de decomposição e o controle de plantas daninhas em semeadura direta de milho. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 18, n.1, p.151-160, 2000.

ASSUMPÇÃO, R.A.B.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G.; JOHANN, J.A. Uso da krigagem indicatriz na avaliação da probabilidade de produtividade da soja segundo os padrões Regional, Estadual e Nacional. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.29, n.2, p. 165-171, 2007.

BALBINOT JR., A.A.; BACKES, R.L.; TÔRRES, A.N.L. Desempenho de plantas invernais na produção de massa e cobertura do solo sob cultivos isolado e em consórcios. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.3, n.1, p. 38-42, 2004.

BAZZI, C.L.; SOUZA, E.G.; URIBE-OPAZO, M.A.; SANTOS, D. Uso da validação cruzada na seleção de modelos de semivariogramas. In: XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2009, PETROLINA/JUAZEIRO. **Anais do XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. JABOTICABAL: SBEA, 2009. v.1. p. 1-4.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p. 1501-1511, 1994.

CALEGARI, A.; ALCÂNTARA, P.B.; MIYASAKA, S.; AMADO, T.J.C. Caracterização das principais espécies de adubo verde. Parte III. In: COSTA, M.B.B. **Adubação verde no sul do Brasil**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1992.

CALEGARI, A. Plantas de cobertura. Cap. 5. In: CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R.; MEHTA, Y. R.; PASSINI, J.J. **Plantio direto com qualidade**. Londrina: IAPAR; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006.

CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em vitória Brasil (sp). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.27, n.4, p. 695-703, 2003.

CARVALHO, M.A.C.; ATHAYDE, M.L.F.; SORATTO, R.P.; ALVES, M.C.; ARF, O. Soja em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional em solo de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1141-1148, 2004.

CASTRIGNANÒ, A.; GIUGLIARINI, L.; RISALITI, R.; MARTINELLI, N. Study of spatial relationships among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics. **Geoderma**, Amsterdam, v.97, n.1-2, p. 39-60, 2000.

CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p. 1329-1339, 2007.

CLARK, I. **Practical geostatistics**. London, Applied science publishers Ltda, 1979. 123p.

COELHO, E.C.; SOUZA, E.G.; URIBE-OPAZO, M.A.; PINHEIRO NETO, R. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.1, p. 165-174, 2009.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Soja em números (safra 2008/2009)**. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/index.php?op_page=294&cod_pai=16> Acesso em: 04 de Janeiro de 2010.

COODECTEC - COOPERATIVA CENTRAL DE PESQUISA AGRÍCOLA. **Cultivares de trigo**. Disponível em: <<http://www3.coodetec.com.br/Coodetec/produto.action?culturald=4&produtold=4>> Acesso em: 02 de Junho de 2008.

COSTA, M.S.S.M.; PIVETTA, L.A.; COSTA, L.A.M.; CASTOLDI, G.; PIVETTA, L.G.; STEINER, F. Atributos físicos do solo sob sistemas de manejo e adubações. Suelos, Agua y Manejo del Medio Ambiente. *In*: DI LEO, N.; MONTICO, S.; NARDÓN, G. **Avances en ingeniería rural 2007-2009**. Rosario: UNR Editora, 2009. p. 767-773.

CRESSIE, N.A. **Statistics for spatial data**. Wiley Series in probability and mathematical statistics, New York: John Wiley & Sons, 1993. 900 p.

DENT, B.D. **Principles of thematic map design**. Reading: Addison-Wesley, 1985. 398 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de produção de soja – Paraná – 2007**. Sistemas de Produção / Embrapa Soja, ISSN 1677-8499, n.10, Londrina, 2006a. 217 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, CNPS, 2006b. 306p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Trigo**. Disponível em <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/trigo/index.htm>> Acesso em: 07 de Maio de 2009.

ESTEIO – ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS. **Mapas temáticos**. Disponível em: <<http://www.esteio.com.br/produtos/paginas/Prod-Mapa.htm>> Acesso em: 03 Jun. 2009.

FARACO, M.A.; URIBE-OPAZO, M.A.; SILVA, E.A.A.; JOHANN, J.A.; BORSSOI, J.A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.463-476, 2008.

FIGUEIREDO, F.C.; DOMINGOS, D.Q.; MATEUS, M.A.F.; FAVERO, J.M.D. Plantas indicadoras da condição de solo. *In*: VIII CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 2007, Caxambu. **Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil**, Caxambu: SEB, 2007, v.1, p. 1-2.

- FRANCHINI, J.C.; TORRES, E.; GONÇALVES, S.L.; SARAIVA, O.F. Manejo do solo para produção sustentável da soja. **Circular Técnica**, **46**. Embrapa – Soja, Londrina – PR. 2007.
- GIACOMINI, S.J.; AITA, C.; CHIAPINOTTO, I.C.; HÜBNER, A.P.; MARQUES, M.G.; CADORE, F. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto: II - Nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 751-762, 2004.
- GIMENEZ, L.M.; MOLIN, J.P. Mapeamento da produtividade. *In*: MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; SILVA, C.A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. cap.4.
- GOEDERT, W.J.; SCHERMACK, M.J.; FREITAS, F.C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 223-227, fev. 2002.
- GOMES, F.P.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**, Piracicaba, FEALQ, v.11, 2002. 305p.
- GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; MATA, J.D.V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um argissolo vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.23, n.5, p. 1149-1157, 2001.
- GOOGLE EARTH. **Google Earth 5.0**. Disponível em: <<http://earth.google.com.br/>> Acesso em: 13 Maio 2009.
- GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, Amsterdam, v.89, n.1-2, p. 1-45, 1999.
- GRIBOV, A.; KRIVORUCHKO, K.; HOEF, J.M. Modified weighted least squares semivariogram and covariance model fitting algorithm. **Stochastic Modeling and Geostatistics**, American Association of Petroleum Geologists (AAPG), Houston, v.2, 2010.
- GUEDES, L.P.C.; URIBE-OPAZO, M.A.; JOHANN, J.A.; SOUZA, E.G. Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, p. 2217-2226, 2008.
- GUERRA, P.A.G. **Geoestatística operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1988, 145p.
- HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n.2, p.121-145, 2005.
- IAPAR/ EMATER-PR. **Características geográficas**. Disponível em: <<http://www.cafelandia.pr.gov.br/cafelandia/>> acesso em: 04 Jun. de 2008.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA; R.M. **Applied geostatistics**. 1 ed. Oxford: Oxford University Press, 1989. 561p.
- JOHANN, J.A.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G.; ROCHA, J.V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.2-3, p. 212-219, 2004.
- JONES, T.A. Skewness and kurtosis as criteria of normality in observed frequency distributions. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v.39, n.4, p. 1622-1627, 1969.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.H.J. **Mining geostatistics**. New York: Academic Press Inc., 1978. 600p.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. 1. ed. Piracicaba, Agronômica Ceres, 1979. 264p.

KILIÇ, K.; ÖZGÖZ, E.; AKBA, F. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.76, n.1, p. 1-11. 2004.

KUBO, C.T.; MATA, J.D.V.; SILVA, M.A.G.; SENGIK, E.; MUNIZ, A.S.; NEIRO, E.S. Produtividade de soja em plantio direto em sucessão ao trigo, aveia branca, aveia preta com e sem adubação nitrogenada. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.29, n.2, p. 235-240, 2007.

KUBOTA, A.; HOSHIBA, K.; BORDON, J. Green-manure turnip for soybean based no-tillage farming systems in eastern Paraguay. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.62, n.2, p. 150-158, 2005.

LAMPARELLI, A.C.; ROCHA, J.V.; BORGHI, R. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Guaíba (Agropecuária), 2001. 118 p.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, St. Louis, v.33, n.1, p.159-174, 1977.

LIMA J.S.S.; SATTler, M.A.; PASSOS, R.R.; OLIVEIRA II, P.C.; SOUZA, G.S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo vermelho amarelo sob pastagem e vegetação secundária em regeneração natural. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.2, p.185-195, 2009.

LOPES, R.A.P.; PINHEIRO NETO, R.; BRACCINI, A.L.; SOUZA, E.G. Efeito de diferentes coberturas vegetais e sistemas de preparo do solo na produção da cultura da soja. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 4, p. 507-515, 2007a.

LOPES, R.A.P.; NÓBREGA, L.H.P.; URIBE-OPAZO, M.A.; PRIOR, M.; PEREIRA, J.O. Propriedades físicas de Latossolo Vermelho distroférrico típico sob sistema de manejo na sucessão soja-milho no período de três anos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.29, n.5, p. 721-727, 2007b.

MANFRON, P.A.; LAZZAROTTO C.; MEDEIROS, S.L.P. Trigo – aspectos agrometeorológicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.23, n.2, p. 233-239, 1993.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Littleton, v.58, n.8, p.1246-1266, 1963.

McBRATNEY, A.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sample estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.37, n.4, p.617-639, 1986.

MEDEIROS, G.B.; CALEGARI, A. Rotação de culturas. Cap. 9. *In*: CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R.; MEHTA, Y. R.; PASSINI, J.J. **Plantio direto com qualidade**. Londrina: IAPAR; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006.

MEGDA, M.M.; CARVALHO, M.P.; VIEIRA, M.X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E.C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo

- Vermelho de Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p. 781-788, 2008.
- MELLO, G.; BUENO, C.R.P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p. 294-305, 2006.
- MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p. 1149-1159, 2003.
- MIRANDA, J.I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Embrapa, Brasília, 2005. 425p.
- MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão: O gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba, SP, 2001. 83p.
- MOLIN, J.P. **Fatores restritivos à adoção da agricultura de precisão**. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/ler/download/TEC%202002.09.PDF>> Acesso em: 19 de Junho de 2008.
- MUZILLI, O. Manejo do solo em sistema de plantio direto. Cap. 2. *In*: CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R.; MEHTA, Y. R.; PASSINI, J.J. **Plantio direto com qualidade**. Londrina: IAPAR; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006.
- NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E.; GIRARDELLO, V.C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p. 1723-1734, 2008.
- NUNES, U.R.; ANDRADE JÚNIOR, V. C.; SILVA, E.B.; SANTOS, N.F.; COSTA, H.A.O.; FERREIRA, C.A. Produção de palhada de plantas de cobertura e rendimento do feijão em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.6, p. 943-948, 2006.
- PANOSSO, A.R.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JUNIOR, J.; LA SCALA JUNIOR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.2, p. 227-236, 2008.
- PENTEADO, S.R. **Adubação Verde e Produção de Biomassa: Melhoria e Recuperação dos Solos**. Campinas - SP, Fraga & Penteado: Livros Via Orgânica, 2007, 164p.
- RAMIREZ-LOPEZ, L.; REINA-SANCHEZ, A.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colômbia. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p. 55-63, 2008.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.102, n.2, p. 242-254, 2009.
- RIZZARDI, M.A.; SILVA, L.F. Influência das coberturas vegetais antecessoras de aveia-preta e nabo forrageiro na época de controle de plantas daninhas em milho. **Planta Daninha**, Viçosa, v.24, n.4, p.669-675, 2006.

ROESSING, A.C.; DALL'AGNOL, A.; LAZZAROTTO, J.J.; HIRAKURI, M.H.; OLIVEIRA, A.B. O complexo agroindustrial da soja brasileira. **Circular Técnica**, 43. Embrapa soja. Londrina. 2007.

ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F.F.S.; GIOIA, M.T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p. 283-293, 2009.

ROSA, D.M.; NÓBREGA, L.H.P.; LIMA, G.P.; MAULI, M.M.; TONINI, M.; PACHECO, F.P. Cultura do milho implantada sobre resíduos culturais de leguminosas de verão em sistema plantio direto. Suelos, Agua y Manejo del Medio Ambiente. *In*: DI LEO, N.; MONTICO, S.; NARDÓN, G. **Avances en ingeniería rural 2007-2009**. Rosario: UNR Editora, 2009. p. 415-421.

SCHAFFRATH, V.R.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A.; FIDALSKI, J. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p. 1369-1377, 2008.

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5, p. 797-804, 2004.

SECCO, D.; DA ROS, C.O.; SECCO, J.K.; FIORIN, J.E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.3, p. 407-414, 2005.

SEVERINO, F.J.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Weed supression by smother crops and selective herbicides. **Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 61, n.1, p. 21-26, 2004.

SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; STRIEDER, M.L.; SILVA, A.A. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p. 1011-1020, 2006.

SILVA, R.M. **Introdução ao geoprocessamento: conceitos, técnicas e aplicações**. Novo Hamburgo: Feevale, 2007, 176 p.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F.; Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um Latossolo vermelho Eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.751-759, 2009.

SIMEPAR – INSTITUTO TECNOLÓGICO SIMEPAR. **Dados meteorológicos**. Disponível em < <http://www.simepar.br/>> Acesso em: 20 de Janeiro de 2010.

SOUZA, E.G.; JOHANN, J.A.; ROCHA, J.V.; RIBEIRO, S.R.A.; SILVA, M.S.; URIBE-OPAZO, M.A.; MOLIN, J.P.; OLIVEIRA, E.F.; NÓBREGA, L.H.P. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em um latossolo roxo distrófico da região de Cascavel-PR. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.3, p. 80-92, 1999.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BENTO, M.J.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.1, p. 51-58, 2004.

- SOUZA, Z.M.; MARQUES, J.J.; COOPER, M.; PEREIRA G.T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p. 487-492, 2006.
- STRUDLEY, M.W.; GREEN, T.R.; ASCOUGH, J.C.; Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.99, n.1, p. 4-48, 2008.
- SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R.; Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.8, p.1159-1167, 2007.
- THIMÓTEO, C.M.S.; BENINNI, E.R.Y.; MURATA, I.M.; TAVARES, J.F. Alterações da porosidade e da densidade de um Latossolo Vermelho Distrófico em dois sistemas de manejo de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.23, n. 1, p. 1299-1303, 2001.
- TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n.4, p. 795-801, 2002.
- TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa/Soja, 1999. (Circular técnica, n. 23).
- TSCHIEDEL M.; FERREIRA M.F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.159-163, 2002.
- VALENCIA, L.I.O.; MEIRELLES, M.S.P.; BETTINI, C. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. *In*: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. cap.4.
- VENDRUSCULO, L.G.; MAGALHAES, P.S.G.; VIEIRA, S.R.; CARVALHO, J.R.P. Computational system for geostatistical analysis. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.61, n.1, p. 100-107, 2004.
- VIEIRA, S.R.; GONZALEZ, A.P. Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.1, p. 127-138, 2003.
- VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p. 1271-1280, 2007.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. Oxford: Oxford University Press, 1990. 316p
- WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.43, n.1, p. 177-192, 1992.
- WERNER, V. **Utilização de recursos de agricultura de precisão na geração de mapas de atributos, mapas de produtividade e aplicação de insumos a taxas variáveis**. 2004. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2004.
- WOLLENHAUPT, N.C.; MULLA, D.J.; CRAWFORD, G. Soil sampling and interpolation techniques for mapping special variability of soil properties. *In*: Pierce, F.J., Sadler, E.J. (ed). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1997. p.19-53.

YASREBI, J.; SAFFARI, M.; FATHI, H.; KARIMIAN, N.; MOAZALLAHI, M.; GAZNI, R. Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for prediction of spatial variability of some soil chemical parameters. **Research Journal of Biological Sciences**, Faisalabad, v.4, n.1, p. 93-102, 2009.

ZOU, K.H.; TUNCALI, K.; SILVERMAN, S.G. Correlation and Simple Linear Regression. **Radiology**, Oak Brook, v.227, n.3, p. 617–622, 2003.

9 ANEXOS

9.1 Anexo A

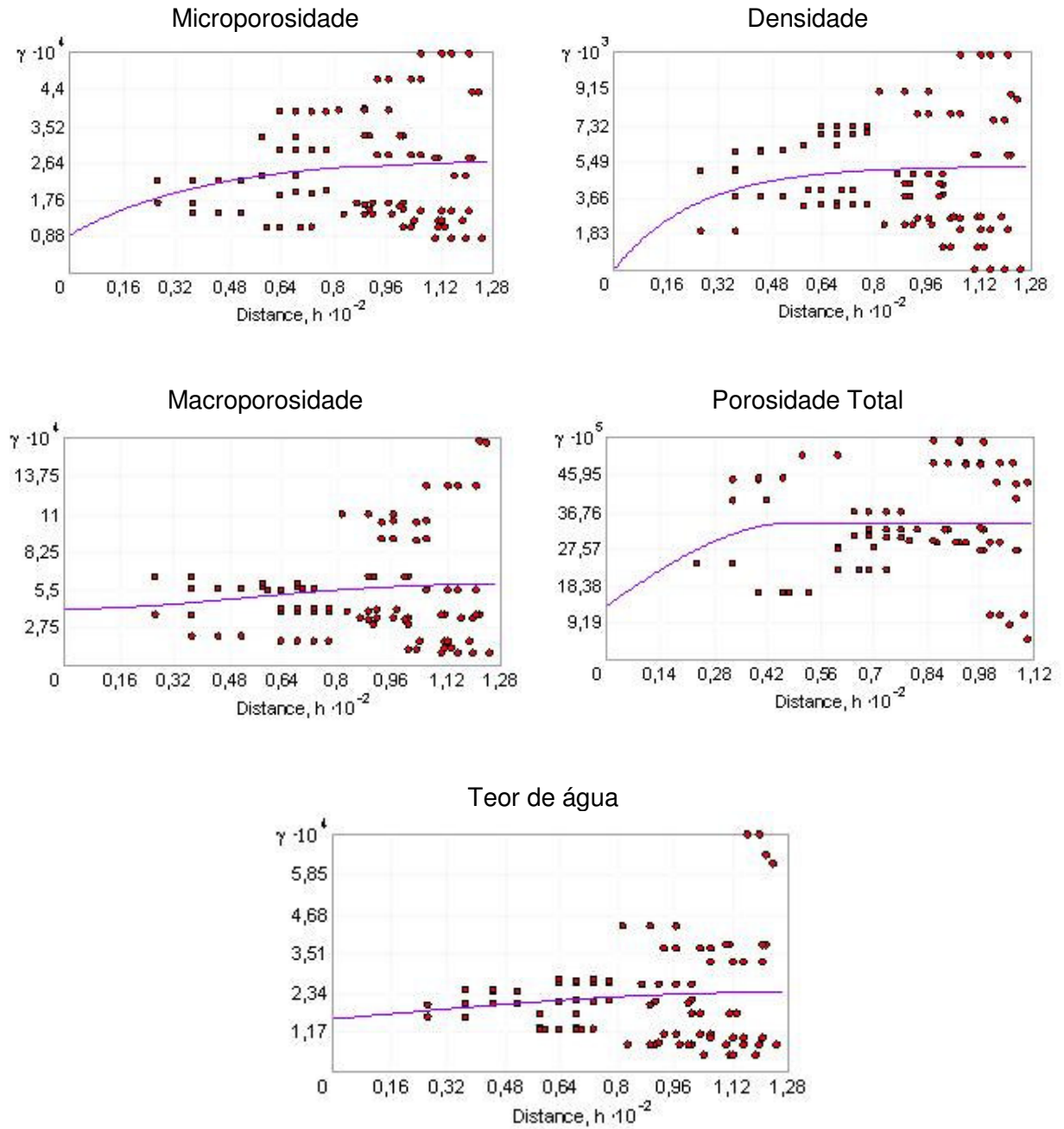


Figura 1A Semivariogramas ajustados para cada atributo da análise física do solo antes da implantação dos tratamentos no inverno.

9.2 Anexo B

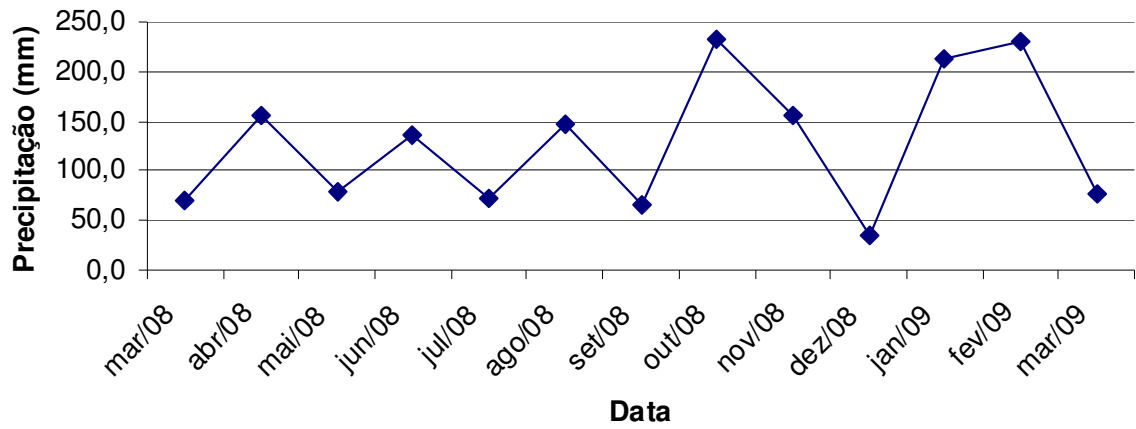


Figura 2B Precipitação média mensal para o município de Cascavel-PR.
Fonte: SIMEMAR (2010).

9.3 Anexo C

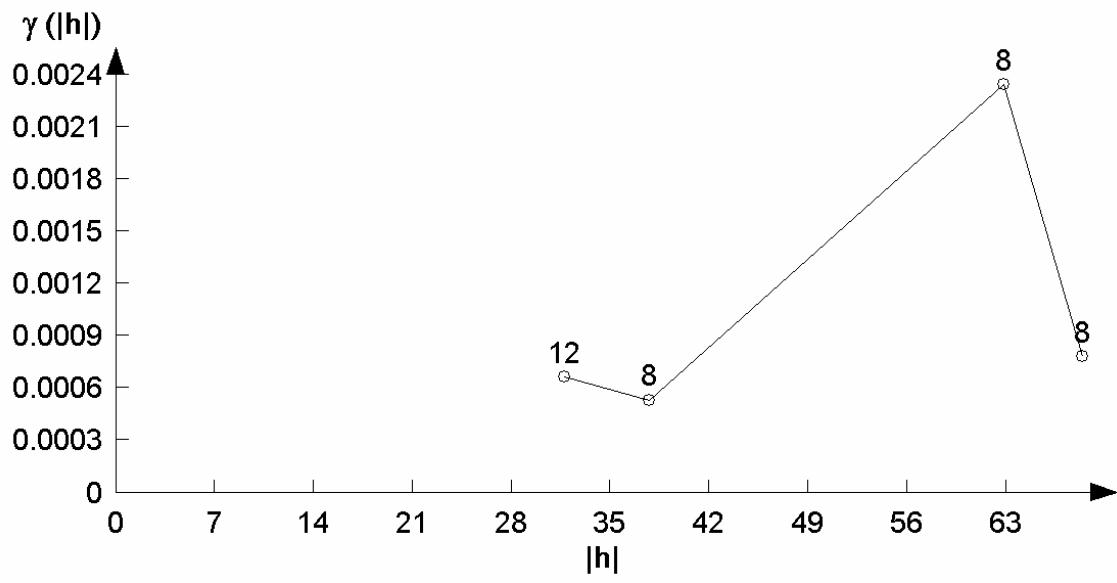


Figura 3C Semivariograma construído com a grade de 12 pontos amostrais e o número de pares utilizado nos cálculos das semivariâncias.

9.4 Anexo D

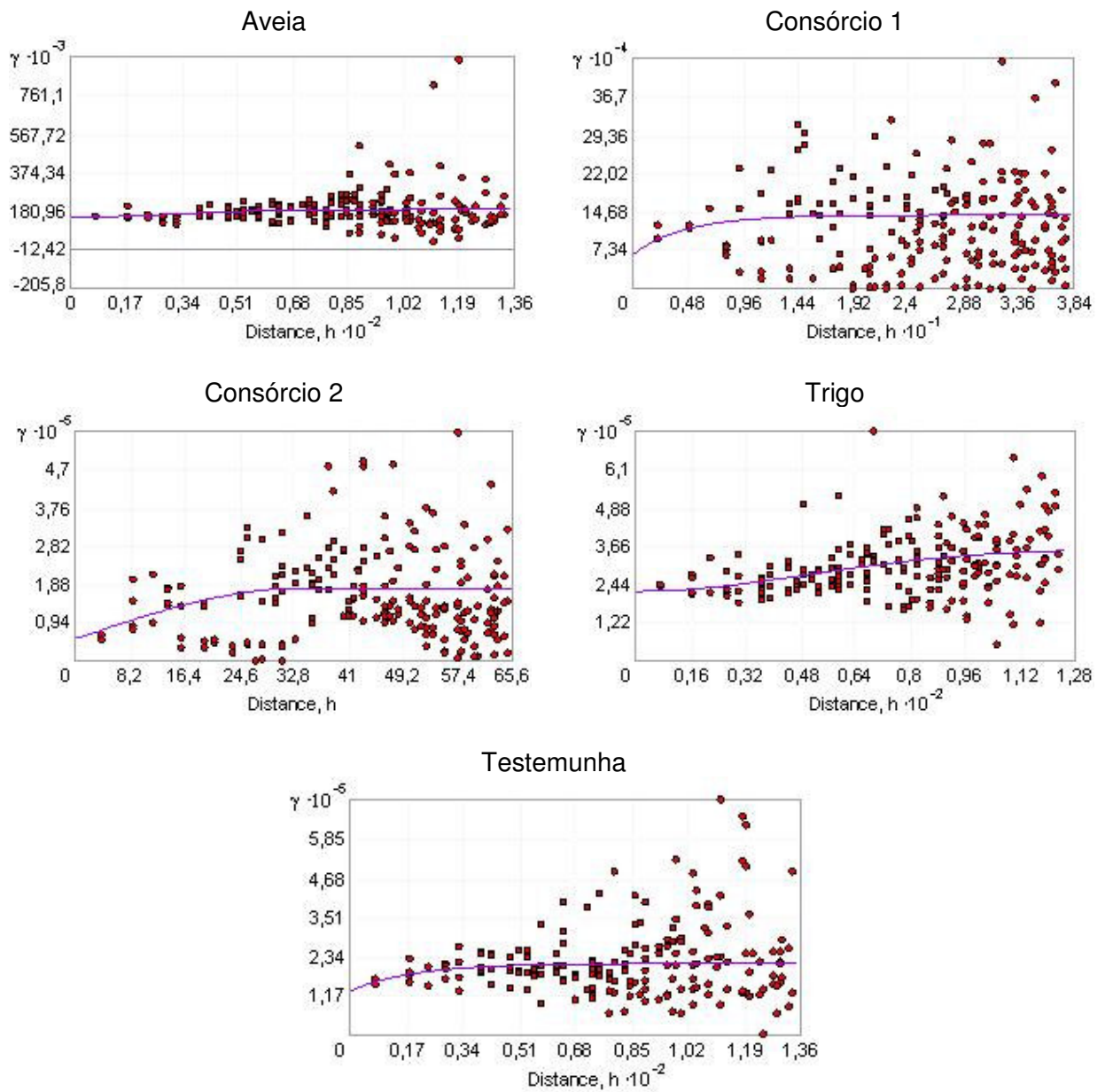


Figura 4D Semivariogramas ajustados para a produtividade da soja em cada tratamento.

9.5 Anexo E

Tabela 1E Massa seca na primeira (quando as coberturas foram manejadas; MS1) e segunda (quando o solo foi coletado, MS2) amostragem dos tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2, trigo e testemunha ⁽¹⁾

Tratamento	MS1 (kg ha⁻¹)	MS2 (kg ha⁻¹)
Aveia	8162 a	5337 a
Consórcio 1	7432 a	5083 a
Consórcio 2	7709 a	4969 a
Trigo	6449 a	5937 a
Testemunha	2128 b	3463 b
Média	6376	4958
CV (%)	26	21

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

9.6 Anexo F

Tabela 2F Estatística descritiva básica dos valores dos desvios relativos para a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, teor de água do solo e produtividade da soja para os tratamentos aveia, consórcio 1, consórcio 2 e trigo

Tratamento	Mínimo (%)	Media (%)	Máximo (%)	Desvio Padrão (%)
MACROPOROSIDADE				
Aveia	-81,8	-21,3	435,4	22,514
Consórcio 1	-77,9	-2,2	358,4	23,476
Consórcio 2	-81,4	-3,9	558,3	27,621
Trigo	-81,3	-13,6	503,9	25,297
GERAL	-81,4	-10,3	558,3	
MICROPOROSIDADE				
Aveia	-4,6	0,4	5,3	0,643
Consórcio 1	-7,7	-0,1	8,9	1,035
Consórcio 2	-6,4	-1,3	3,0	0,737
Trigo	-4,7	0,1	8,2	1,097
GERAL	-7,7	-0,2	8,9	
POROSIDADE TOTAL				
Aveia	-11,8	-2,9	12,1	2,659
Consórcio 1	-15,4	-1,3	14,0	3,197
Consórcio 2	-12,0	-2,5	13,5	2,705
Trigo	-10,7	-2,1	15,9	2,853
GERAL	-15,4	-2,2	15,9	
DENSIDADE				
Aveia	-6,9	0,3	8,2	1,728
Consórcio 1	-12,8	0,2	8,2	1,422
Consórcio 2	-4,0	0,7	9,4	1,403
Trigo	-4,4	2,1	12,4	2,491
GERAL	-12,8	0,8	12,4	
TEOR DE ÁGUA				
Aveia	-3,2	5,9	15,3	1,586
Consórcio 1	-9,9	1,3	18,9	1,903
Consórcio 2	-8,2	1,8	9,9	1,578
Trigo	-6,3	3,6	13,4	1,900
GERAL	-9,9	3,1	18,9	
PRODUTIVIDADE				
Aveia	-31,3	-7,0	31,2	6,895
Consórcio 1	-45,1	-17,4	13,9	9,735
Consórcio 2	-35,0	-5,2	39,3	12,508
Trigo	-25,4	5,3	67,1	14,321
GERAL	-45,1	-6,1	67,1	