

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

**VARIABILIDADE ESPACIAL E ESTIMATIVA DA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE UMA
MICROBACIA HIDROGRÁFICA RURAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Leandro Dalbianco

Santa Maria, RS, Brasil

2009

**VARIABILIDADE ESPACIAL E ESTIMATIVA DA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E CARACTERIZAÇÃO
FÍSICO-HÍDRICA DE UMA MICROBACIA HIDROGRÁFICA
RURAL**

por

Leandro Dalbianco

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo.**

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2009

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

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

**VARIABILIDADE ESPACIAL E ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE UMA
MICROBACIA HIDROGRÁFICA RURAL**

elaborada por
Leandro Dalbianco

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

COMISSÃO EXAMINADORA

José Miguel Reichert, PhD.
(Presidente/Orientador)

Gustavo Henrique Merten, Dr. (UFRGS)

Flávio Luiz Foletto Eltz, PhD. (UFSM)

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2009.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador, professor José Miguel Reichert, pela amizade, orientação e ensinamentos.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, representada pelo professor Gustavo Henrique Merten, pela disponibilização da área de estudo e transporte.

Ao professor Dalvan Reinert, que sempre esteve disposto a ajudar no que fosse necessário.

Aos amigos Jean Paolo Gomes Minela, Michele Moro e Ademir Giongo pela prestatividade e incondicional auxílio nos trabalhos de campo.

Ao grupo de colegas do laboratório de física do solo, pela ajuda nos trabalhos de laboratório e intensa convivência: Miriam, Charlote, Kaiser, Paulo, Braga, Marcelo Kunz, Eracilda, Juliana, Suzana, Maurício Kunz, Eduardo, Tiago, Cláudia, Davi, Mayra, Neiva, André, Streck, Brandt, Adão, Vinícius, David e Vanderléia, em especial ao Paulo, pela amizade e constante auxílio na elaboração dessa dissertação.

Aos meus pais, Pedro e Leonira Dalbianco, pelo incentivo e auxílio nos estudos e compreensão pelos longos períodos de ausência.

Aos meus irmãos, Fabiano e Alessandro, pelos momentos de descontração e trocas de experiências.

À minha namorada, Carina Rejane Pivetta, pelos belos momentos vivenciados em comunhão.

Àqueles que sempre disponibilizaram carona para jogos de futebol: Boneco, Ceretta, Danilo, Dalvan, Julianinho, Schenatto.

E por último, mas não menos importante, aos velhos e novos moradores (e frequentadores) do apartamento 3115, os quais considero como segunda família: Bandinelli, Gice, Keep, Nadi, Luana, Pitty, Tchuk, Fernando, Isis, Susana e Naia.

A todos, meu MUITO OBRIGADO!

RESUMO

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

VARIABILIDADE ESPACIAL E ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE UMA MICROBACIA HIDROGRÁFICA RURAL

AUTOR: LEANDRO DALBIANCO

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Local e data da defesa: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2009.

Os sistemas de manejo do solo implicam em mudanças nas suas propriedades físico-hídricas. O objetivo do estudo foi (i) caracterizar as propriedades físico-hídricas do solo na camada 0-5 cm para diferentes sistemas de manejo da microbacia hidrográfica Cândido Brum, (ii) construir um mapa com a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), (iii) estimar a K_s a partir de outras propriedades físico-hídricas do solo e (iv) testar a confiabilidade de funções de pedotransferência para a K_s encontradas na literatura. O estudo foi conduzido na microbacia Cândido Brum, em Arvorezinha-RS, em que predominam os sistemas de manejo campo nativo, mata nativa, preparo convencional, plantio direto e preparo mínimo. Foram realizados contrastes ortogonais entre grupos de sistemas de manejo do solo, em que se comparou o efeito do cultivo, do tipo de vegetação natural e pisoteio animal, das práticas conservacionistas e da cobertura permanente do solo. Foram realizadas determinações de densidade do solo, porosidade, granulometria, carbono orgânico, grau de floculação, estabilidade de agregados, K_s , permeabilidade ao ar, retenção e disponibilidade de água e tensão de cisalhamento do solo. As propriedades físico-hídricas serviram também como variáveis de entrada para a elaboração de funções de pedotransferência para a K_s e para testes de confiabilidade de funções de pedotransferência encontradas na literatura. O mapa de variabilidade espacial da K_s foi construído a partir da interpolação dos dados com o método da krigagem. Os solos cultivados da microbacia apresentaram estrutura degradada, com pouca matéria orgânica e baixa estabilidade de agregados. O uso com campo nativo reduziu a macroporosidade, a K_s e a permeabilidade ao ar em relação aos outros sistemas de manejo do solo. As práticas conservacionistas foram eficientes em aumentar a retenção e a disponibilidade de água no solo em relação ao preparo convencional. As variáveis que representam a estrutura do solo foram mais precisas em estimar a K_s que as variáveis granulométricas. As funções de pedotransferência encontradas na literatura, geralmente elaboradas para solos de clima temperado, não foram confiáveis na estimativa da K_s da microbacia. O alcance da dependência espacial dos valores de K_s foi de 141 m. O mapa de variabilidade espacial possibilitou a visualização de áreas que necessitam de práticas de manejo e conservação do solo e da água.

Palavras-chave: estrutura do solo; funções de pedotransferência; geoestatística.

ABSTRACT

Master Dissertation
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

SPACIAL VARIABILITY AND ESTIMATIVE OF THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND PHYSICAL-HIDRICS CHARACTERIZATION OF A RURAL WATERSHED

AUTHOR: LEANDRO DALBIANCO

ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Place and date of the defense: Santa Maria, fevereiro 27, 2009.

The soil management systems involve changes in soil physico-hydrical properties. The objective of this study was (i) characterize the soil physico-hydrical properties in the layer 0-5 cm for different soil management systems in the Cândido Brum watershed, (ii) build a map with the spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity (Ks), (iii) estimate the Ks from other soil physico-hydrical properties and (iv) test the reliability of others pedotransfer functions for Ks found in the literature. The study was conducted in the watershed Cândido Brum, Brazil, which predominate the soil management systems native pasture, native forest, conventional tillage, minimum tillage and no-tillage. Orthogonal contrasts were performed between groups of soil management systems, which compared the effect of soil cultivation, the type of vegetation and bovine trampling, conservation practice and permanent soil cover. Determinations of soil bulk density, porosity, size particles, organic carbon, degree of flocculation, aggregate stability, Ks, air permeability, retention and availability of water and shear stress of the soil were made. Besides being used for the comparison of management systems, the water-physical properties used as input variables for the development of pedotransfer functions for Ks, which used the stepwise method in the selection of variables, and to test the reliability of pedotransfer functions found in the literature. The map of spatial variability of Ks was constructed from data interpolation using kriging. The soils of the watershed under crops had degraded structure, with low organic matter and low aggregates stability. Soil with native pasture had reduced the macroporosity, the Ks and air permeability in relation to other soil management systems. Conservation practices were effective in increasing the retention and availability of soil water in relation to conventional tillage. The variables that represent the structure of the soil were more accurate in estimating the Ks that the size particle variables. The pedotransfer functions found in the literature, usually developed for soils of temperate climate, were not reliable in the estimation of Ks of soils watershed. The range of spatial dependence of the values of Ks was 141 m. The map of spatial variability allowed the visualization of areas that need management practices and conservation of soil and water.

Key-words: soil structure; pedotransfer functions; geostatistics.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Número de amostras de solo coletadas para cada sistema de manejo da microbacia.....	34
TABELA 2 – Equações encontradas na literatura para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado.....	45
TABELA 3 – Composição granulométrica do solo ⁽¹⁾ para os sistemas de manejo da microbacia.....	48
TABELA 4 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis físico-hídricas do solo e o teor de cascalho (C_{ASC}), areia total (A_T), areia grossa (A_G), areia fina (A_F), silte (S_i) e argila (A_{RG}).....	49
TABELA 5 – Densidade do solo (D_s), porosidade total (PT), macroporosidade (MA), microporosidade (MI), condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), carbono orgânico do solo (CO) e grau de flocculação (GF) para os sistemas de manejo do solo da microbacia ⁽¹⁾	52
TABELA 6 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre propriedades físico-hídricas do solo e densidade do solo (D_s), porosidade total (P_T), macroporosidade (M_A), microporosidade (M_i) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) ⁽¹⁾	53
TABELA 7 – Umidade volumétrica do solo nas tensões de 0 kPa (θ_{sat}), 1 kPa (θ_1), 6 kPa (θ_6), 10 kPa (θ_{10}), 500 kPa (θ_{500}), 1000 kPa (θ_{1000}), 1500 kPa (θ_{1500}) e água disponível (AD) para os sistemas de manejo do solo da microbacia ⁽¹⁾	59
TABELA 8 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as propriedades físico-hídricas do solo e a umidade volumétrica nas tensões 0 kPa (θ_{sat}), 1 kPa (θ_1), 6 kPa (θ_6), 10 kPa (θ_{10}), 500 kPa (θ_{500}), 1000 kPa (θ_{1000}), 1500 kPa (θ_{1500}) e água disponível (AD).....	60

TABELA 9 – Permeabilidade do solo ao ar nas tensões de 1 (Ka ₁), 6 (Ka ₆) e 10 kPa (Ka ₁₀) para os sistemas de manejo do solo da microbacia ⁽¹⁾	62
TABELA 10 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as propriedades físico-hídricas e a permeabilidade do solo ao ar nas tensões de 1 (Ka ₁), 6 (Ka ₆), 10 kPa (Ka ₁₀), grau de flocculação (GF) e estabilidade de agregados (EA).	63
TABELA 11 – Composição granulométrica do solo na fração de 1,0-2,0 mm de diâmetro para os sistemas de manejo do solo da microbacia ⁽¹⁾	65
TABELA 12 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre variáveis físico-hídricas do solo na fração 1,0-2,0 mm de diâmetro e estabilidade de agregados (EA), carbono orgânico (CO ₁₋₂), grau de flocculação (GF ₁₋₂) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ks).	65
TABELA 13 – Estabilidade de agregados (EA), carbono orgânico (CO) e grau de flocculação (GF) da fração 1,0-2,0 mm para os sistemas de manejo do solo da microbacia ⁽¹⁾	66
TABELA 14 – Tensão de cisalhamento do solo e umidade gravimétrica nos diferentes sistemas de manejo do solo da microbacia ⁽¹⁾	69
TABELA 15 – Estatística descritiva da condutividade hidráulica do solo saturado (Ks, mm h ⁻¹).	72
TABELA 16 – Análise descritiva das variáveis físico-hídricas do solo da microbacia.	75
TABELA 17 – Análise de correlação linear de Pearson entre variáveis físico-hídricas e a condutividade hidráulica do solo saturado do solo da microbacia.....	76
TABELA 18 – Funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica do solo saturado (Ks).....	77
TABELA 19 – Outras funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica do solo saturado (Ks).	80

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Localização do município de Arvorezinha no Estado do Rio Grande do Sul (Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Arvorezinha), modelo numérico de elevação e solos da microbacia Cândido Brum (Fonte: MINELLA, 2007).	30
FIGURA 2 – Disposição dos pontos amostrais na microbacia e a respectiva época de coleta.....	33
FIGURA 3 – Equipamento utilizado nas medidas de condutividade do solo ao ar em amostras com estrutura preservada. Fonte: VOSSBRINK (2005) e modificado por BRANDT, 2008 (comunicação pessoal).....	36
FIGURA 4 – Esquema do permeâmetro utilizado na determinação da condutividade hidráulica de solo saturado. Fonte: Gubiani et al., 2008.	37
FIGURA 5 – (a) medidor e aplicador de torção; (b) mola responsável pela torção; (c) discos, com aletas cisalhantes, em três tamanhos diferentes; e (d) visualização de como é realizada a determinação a campo.....	41
FIGURA 6 – Classe textural para cada ponto amostrado na microbacia e triângulo textural de referência.....	48
FIGURA 7 – Histogramas para o teste de normalidade da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s). (a) variável K_s não transformada; (b) variável K_s transformada em raiz quadrada.	73
FIGURA 8 – Modelo de semivariograma (esférico) ajustado para os dados coletados no solo da microbacia. C_0 = efeito pepita; $C_0 + C$ = patamar; A_0 = alcance; r^2 (R^2) = coeficiente de determinação; RSS = soma de quadrados de resíduos.....	73
FIGURA 9 – Relação 1:1 (validação cruzada) dos dados de K_s observados e os estimados pelo semivariograma.....	74

FIGURA 10 – Mapa da distribuição espacial dos valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_s , mm h^{-1}) estimados pelo método da krigagem.....	74
FIGURA 11 – Relação 1:1 dos valores observados e estimados de condutividade hidráulica do solo saturado (K_s).....	79
FIGURA 12 – Relação 1:1 dos valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) observados nos pontos amostrados da microbacia e os estimados pelas funções de pedotransferência encontradas na literatura.....	82

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Variável	Descrição	Unidade
Sistemas de manejo		
CN	Campo nativo	-
MN	Mata nativa	-
PC	Preparo convencional	-
PD	Plantio direto	-
PM	Preparo mínimo	-
Variáveis físico-hídricas		
Ks	Condutividade hidráulica do solo saturado	mm h ⁻¹
Ka	Permeabilidade ao ar	mm h ⁻¹
θ_{sat}	Umidade de saturação	m ³ m ⁻³
θ_1	Umidade volumétrica na tensão de 1 kPa	m ³ m ⁻³
θ_6	Umidade volumétrica na tensão de 6 kPa	m ³ m ⁻³
θ_{10}	Umidade volumétrica na tensão de 10 kPa	m ³ m ⁻³
θ_{33}	Umidade volumétrica na tensão de 33 kPa	m ³ m ⁻³
θ_{500}	Umidade volumétrica na tensão de 500 kPa	m ³ m ⁻³
θ_{1000}	Umidade volumétrica na tensão de 1000 kPa	m ³ m ⁻³
θ_{1500}	Umidade volumétrica na tensão de 1500 kPa	m ³ m ⁻³
CC	Capacidade de campo	m ³ m ⁻³
PMP	Ponto de murcha permanente	m ³ m ⁻³
AD	Água disponível	m ³ m ⁻³
Ds	Densidade do solo	g cm ⁻³
C _{ASC}	Cascalho	g kg ⁻¹
A _T	Areia total	g kg ⁻¹
A _G	Areia grossa	g kg ⁻¹
A _F	Areia fina	g kg ⁻¹
S _I	Silte	g kg ⁻¹
A _{RG}	Argila	g kg ⁻¹
P _T	Porosidade total	m ³ m ⁻³
M _A	Macroporosidade	m ³ m ⁻³
M _I	Microporosidade	m ³ m ⁻³
CO	Carbono orgânico	g kg ⁻¹
CO ₁₋₂	Carbono orgânico da fração 1,0-2,0 mm	g kg ⁻¹
MO	Matéria orgânica	%
GF	Grau de flocculação	%
GF ₁₋₂	Grau de flocculação da fração 1,0-2,0 mm	%
GD	Grau de dispersão	%
EA	Estabilidade de agregados	%
τ	Tensão de cisalhamento	kPa
Coefficientes estatísticos		
CV	Coefficiente de variação	%
R ²	Coefficiente de determinação	adimensional
S _{yx}	Erro padrão da estimativa	adimensional
r	Coefficiente de correlação	adimensional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Hipóteses	15
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivos específicos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Sistemas de manejo e as propriedades físico-hídricas dos solos	17
2.1.1 Densidade e porosidade do solo	17
2.1.2 Carbono orgânico, estabilidade estrutural e grau de flocculação do solo.....	19
2.1.3 Retenção e disponibilidade de água.....	20
2.1.4 Condutividade hidráulica do solo saturado	22
2.1.5 Permeabilidade do solo ao ar	23
2.1.6 Resistência do solo ao cisalhamento.....	24
2.2 Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado	24
2.3 Estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Local de estudo	29
3.2 Sistemas de manejo.....	31
3.3 Coleta das amostras	32
3.4 Determinações.....	35
3.4.1 Retenção e disponibilidade de água no solo	35

3.4.2	Permeabilidade do solo ao ar	36
3.4.3	Condutividade hidráulica do solo saturado, densidade do solo e porosidade	37
3.4.4	Composição granulométrica, argila dispersa em água e grau de flocculação	38
3.4.5	Carbono orgânico do solo	39
3.4.6	Estabilidade de agregados	39
3.4.7	Tensão de cisalhamento	40
3.5	Análise estatística dos dados	42
3.5.1	Contrastes entre sistemas de manejo do solo	42
3.5.2	Análise espacial da condutividade hidráulica do solo saturado	42
3.5.3	Funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica do solo saturado	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Propriedades físico-hídricas do solo	47
4.1.1	Granulometria	47
4.1.2	Densidade do solo	50
4.1.3	Porosidade total, macro e microporosidade	53
4.1.4	Condutividade hidráulica do solo saturado	55
4.1.5	Carbono orgânico e grau de flocculação	56
4.1.6	Retenção de água no solo	58
4.1.7	Disponibilidade de água	61
4.1.8	Permeabilidade ao ar	61
4.1.9	Estabilidade de agregados e propriedades da fração 1,0-2,0 mm de solo	64
4.1.10	Tensão de cisalhamento	69
4.2	Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado	71
4.3	Elaboração das funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica do solo saturado	75
4.4	Avaliação de funções de pedotransferência da literatura	80
5	CONCLUSÕES	84
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
7	ANEXOS	105

1 INTRODUÇÃO

A agricultura vem sendo praticada em locais não recomendados sob o ponto de vista da sustentabilidade do agroecossistema. Cada vez mais áreas altamente declivosas vêm sendo desmatadas para o cultivo de espécies anuais, com a utilização de práticas de cultivo divergentes com a preservação dos recursos naturais.

No município de Arvorezinha, Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, a microbacia hidrográfica Cândido Brum vem sendo estudada desde o ano de 2001. A área é ocupada por famílias pequenas de agricultores que tiram seu sustento, na maioria das vezes, única e exclusivamente do cultivo do fumo, que proporciona altos rendimentos por área e se adapta a pequenas unidades de produção.

Por outro lado, pode-se observar que as áreas de cultivo da microbacia estão bastante degradadas. A vegetação original está quase que totalmente alterada, por ter sido substituída pelo cultivo do fumo. A fumicultura é considerada prejudicial à saúde das pessoas e à sustentabilidade agrícola, pois são utilizadas altas doses de fertilizantes e agrotóxicos para a obtenção de altas produtividades. Além disso, os solos ocupados pela cultura são, predominantemente, pedregosos, rasos e declivosos. A fraca estabilidade da estrutura do solo possibilita o transporte de contaminantes aos cursos d'água e ao lençol freático, podendo comprometer a saúde das pessoas que fazem uso dessa água.

A fragilidade desse sistema de cultivo é decorrência da união de vários fatores. Primeiro, a atividade é praticada em áreas altamente declivosas; segundo, ocorre intenso revolvimento do solo; e, por último, as precipitações com maior potencial erosivo ocorrem no momento em que o solo se encontra descoberto e revolvido.

A associação entre a fragilidade pedogenética do solo e o intenso revolvimento, torna o solo altamente suscetível à erosão hídrica, pois a rápida saturação do perfil favorece o escoamento superficial da água, que não infiltra no solo, arrastando partículas de solo e contaminantes à jusante. A intensa degradação das propriedades físicas e químicas do solo obriga os produtores a abandonarem essas áreas, que são deixadas em pousio para o incremento de matéria orgânica e,

aos poucos, o retorno da capacidade produtiva. Em outros casos, as áreas são destinadas para o cultivo de eucalipto.

A avaliação dos sistemas de cultivo é necessária para se ter uma visão da eficiência das práticas conservacionistas na manutenção e/ou recuperação da estrutura do solo, já que áreas altamente declivosas não são recomendadas para o uso agrícola e necessitam de grande proteção vegetal para se manterem produtivas, o que não é atendido com o cultivo do fumo. O ideal seria a elaboração de programas governamentais que incentivassem a revegetação dessas áreas, com práticas de manejo e conservação do solo, e a introdução de outras atividades agrícolas com menor degradação do solo.

A elaboração de programas de manejo, conservação do solo e planejamento agrícola é baseada nas características físico-hídricas do solo. Dentre essas, podemos citar a condutividade hidráulica do solo saturado, responsável por vários fenômenos hídricos que ocorrem no solo. Na maioria dos levantamentos de solos realizados no Brasil não estão disponíveis dados de propriedades hídricas dos solos. Assim, para caracterizações físico-hídricas dessas áreas, podem ser utilizadas ferramentas estatísticas para prever certas propriedades do solo, como por exemplo, a condutividade hidráulica.

A difícil caracterização da condutividade hidráulica do solo saturado, tanto no campo como em laboratório, torna dificultada sua determinação. Além de ser muito trabalhosa, as determinações apresentam grande variabilidade para um mesmo tipo de solo. A condutividade hidráulica, a priori, pode ser estimada com base em outras variáveis facilmente disponíveis ou de mais fácil determinação, como é o caso de dados granulométricos e de densidade do solo. Além dessas, podem ser usadas propriedades como porosidade do solo, carbono orgânico, grau de flocculação, entre outras. O estudo com funções de pedotransferências no Brasil aumentou a partir da década de noventa, mas ainda carece de pesquisas e banco de dados maior, o que possibilita gerar equações mais confiáveis.

A construção de mapas com a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado também é muito importante, pois possibilita a visualização espacial de áreas que requerem maiores cuidados de conservação do solo, ou então que não devam ser cultivadas. Valores de condutividade hidráulica do solo saturado também são requeridos em modelos matemáticos que estimam as perdas de solo pelo processo erosivo. Para a construção de mapas com distribuição

espacial de determinada propriedade física, podemos utilizar técnicas geoestatísticas de interpolação de dados. Entre os métodos de interpolação estão a krigagem, inverso da potência da distância, mínimos quadrados ordinários, mínimos quadrados ponderados e máxima verossimilhança. A krigagem é o método mais utilizado e, quando existe dependência espacial entre pontos de solo amostrados, pode-se estimar os dados para o restante da área e construir o mapa de distribuição espacial.

1.1 Hipóteses

O cultivo degrada a estrutura do solo, principalmente quando o preparo é feito de maneira convencional. O uso de práticas conservacionistas proporciona maior incremento de carbono orgânico que o preparo convencional, o que aumenta a estabilidade dos agregados e reflete em melhoria da qualidade do espaço poroso.

Áreas com diferentes sistemas de manejo implicam em valores de condutividade hidráulica do solo saturado diferentes e esses valores podem ser estimados satisfatoriamente por funções de pedotransferência.

A condutividade hidráulica do solo saturado possui dependência espacial, e essa pode ser estimada por um semivariograma, possibilitando a elaboração e visualização de áreas que merecem maiores cuidados quanto à degradação do solo.

1.2 Objetivos

Avaliar as propriedades físico-hídricas do solo na camada 0-5 cm para os sistemas de manejo aplicados na microbacia hidrográfica Cândido Brum em Arvorezinha-RS.

Determinar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) com o uso do método da krigagem para interpolação dos dados.

Elaborar funções de pedotransferência para a estimativa da K_s baseado em atributos físico-hídricos do solo e testar a confiabilidade de outras funções de pedotransferência encontradas na literatura.

1.2.1 Objetivos específicos

1 - Comparar sistemas de manejo quanto ao seu efeito nas propriedades físico-hídricas do solo.

2 - Construir um mapa com a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado por meio da interpolação dos dados pelo método da krigagem.

3 - Estimar a condutividade hidráulica do solo saturado com base em dados granulométricos e estruturais do solo.

4 - Usar os dados determinados na microbacia para testar funções de pedotransferências para a condutividade hidráulica do solo saturado encontradas na literatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas de manejo e as propriedades físico-hídricas dos solos

As propriedades físico-hídricas fornecem informações importantes para a estimativa da suscetibilidade do solo à erosão, modelagem hidrológica, projetos de irrigação e também para o estabelecimento de sistemas de manejo do solo e da água. O entendimento da dinâmica dos sistemas de manejo é necessário, tendo em vista que alteram a composição e o arranjo dos constituintes do solo e podem, em alguns casos, prejudicar a conservação desse recurso natural e reduzir a produtividade das culturas (REINERT, 1998).

As propriedades físico-hídricas do solo têm sido sensíveis em detectar alterações provocadas pelo uso agrícola no pedoambiente, e servem como um bom indicador da qualidade do solo (D'ANDRÉA et al., 2002). A magnitude das alterações depende do tipo de solo, condições climáticas, tempo de uso e sistemas de manejo adotado (KAY, 1990).

2.1.1 Densidade e porosidade do solo

A qualidade estrutural do solo tem sido comumente analisada por parâmetros como a densidade e a porosidade. Essas propriedades são de fácil determinação e possibilitam a verificação do efeito de sistemas de manejo sobre a estrutura do solo.

Com a utilização de práticas conservacionistas, como o plantio direto e o preparo mínimo, geralmente se observa um aumento da densidade do solo e diminuição da macroporosidade em relação ao preparo convencional. Essa alteração é provocada pelo adensamento natural da estrutura do solo decorrente da ausência total ou parcial do revolvimento (MARCOLAN et al., 2007; VEIGA et al., 2008), bem como pela compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas (DE MARIA et al., 1999; STRECK et al., 2004) ou pisoteio animal (ALBUQUERQUE et

al., 2001; LANZANOVA et al., 2007; FLORES et al., 2007). Apesar da maior densidade, a estabilidade de agregados dos sistemas conservacionistas é maior, o que lhes confere melhor qualidade do solo em relação ao preparo convencional e campo nativo (D'ANDRÉA et al., 2002). Além do manejo, a proporção de sólidos minerais e orgânicos altera a densidade dos solos. A maior quantidade de matéria orgânica diminui a densidade em solos de mata nativa devido à baixa densidade específica dos compostos orgânicos (SILVA; KAY, 1997).

Para um mesmo solo, a porosidade é inversamente proporcional à densidade do solo. Segundo Hillel (1980), a porosidade total expressa o volume poroso do solo, mas não demonstra a distribuição dos poros. Assim, para melhor caracterização da porosidade do solo realiza-se uma divisão conforme o tamanho. A forma mais usual de classificação é a divisão em macroporos e microporos. Os macroporos são poros esvaziados à tensão de 6 kPa, e possuem diâmetro maior que 0,05 mm. Estão situados nos espaços interagregados e são responsáveis pela infiltração de água, trocas gasosas com a atmosfera e é onde ocorre o desenvolvimento radicular das plantas. Os microporos são capilares intra-agregados com diâmetro menor que 0,05 mm, responsáveis pela retenção da água no solo. Quanto menor o diâmetro dos poros, maior é a força de retenção da água (HILLEL, 1980).

O fluxo de gases e o movimento de água no solo dependem não somente da quantidade de macroporos, mas também da continuidade em profundidade e da abertura à superfície. Portanto, a porosidade é um parâmetro de maior significado que a densidade para avaliar a qualidade estrutural do solo porque descreve a proporção do volume de solo disponível às raízes das plantas, à água e ao ar que elas requerem (MANTOVANI, 1987).

Solos com camadas compactadas apresentam redução da porosidade total e da macroporosidade, e aumento da microporosidade e da densidade dos solos (KLEIN; LIBARDI, 2002). Nesses casos, o aumento da microporosidade favorece a retenção de água no solo (OLIVEIRA et al., 2004), porém compromete o transporte de ar e água (CAVENAGE et al., 1999).

2.1.2 Carbono orgânico, estabilidade estrutural e grau de floculação do solo

A matéria orgânica é considerada o principal fator de manutenção da qualidade e da produtividade dos solos agrícolas, devido à sua influência nas propriedades químicas e físicas do solo. Dela dependem a capacidade de infiltração, o armazenamento de água e a estabilidade da estrutura. Como o solo é um sistema aberto, a quantidade de matéria orgânica é resultado do balanço entre adições e perdas de carbono orgânico no sistema. A adição ocorre por meio das plantas (parte aérea e raízes) e as perdas ocorrem por decomposição microbiana da matéria orgânica, lixiviação de compostos orgânicos e erosão hídrica (VEZZANI, 2001).

A magnitude das perdas de carbono orgânico depende, principalmente, do tipo de solo, das condições climáticas e do sistema de manejo utilizado (DEBARBA, 2002). O revolvimento do solo aumenta a taxa de perda de matéria orgânica (BAYER et al., 2000) pelo fracionamento e incorporação de resíduos vegetais, menor proteção física intra-agregados e maiores temperaturas na superfície do solo. Por sua vez, sistemas conservacionistas favorecem a agregação do solo, contribuindo para o acúmulo de matéria orgânica (BAYER et al., 2000) e melhoria da qualidade, sustentabilidade e capacidade produtiva dos solos agrícolas (CAMPOS et al., 1995; AMADO et al. 2001). Segundo Reinert (1990), a recuperação do teor de carbono orgânico pode levar décadas para se aproximar da condição inicial.

O maior aporte de resíduos vegetais na superfície do solo e a mínima degradação da estrutura podem melhorar o meio poroso do solo. A adição de resíduos favorece os mecanismos biológicos envolvidos na estabilidade de agregados (CAMPOS et al., 1999), especialmente na camada superficial do solo. A interação entre a agregação e matéria orgânica foi caracterizada por Six et al. (1999) como sendo uma relação de causa-efeito, onde a maior quantidade de matéria orgânica no solo determina maior estabilidade de agregados, e esta, por sua vez, maior proteção física da matéria orgânica.

A formação de agregados do solo depende da aproximação e cimentação das partículas por diversas substâncias de natureza mineral e orgânica, em que são envolvidos mecanismos físicos, químicos e biológicos (SILVA; MIELNICZUK, 1998). A estrutura exerce influência direta sobre a movimentação de água, transferência de

calor, aeração, densidade do solo e porosidade, fatores esses responsáveis pelo crescimento e desenvolvimento vegetal (LETEY, 1985).

O revolvimento mecânico do solo e a modificação do ambiente edáfico alteram a estabilidade dos agregados e favorece a degradação da estrutura do solo (LIMA et al., 2003). A erosão hídrica do solo é favorecida quando ocorre redução da estabilidade de agregados, do teor de matéria orgânica e a exposição do solo à ação erosiva da gota da chuva (ALEGRE et al., 1991).

As partículas de argila são facilmente transportadas pela enxurrada devido ao pequeno tamanho. A agregação às outras partículas ou microagregados, processo chamado de floculação, se torna necessária para evitar o transporte de argila para partes mais baixas do terreno ou para cursos d'água. A matéria orgânica tem influência direta na floculação das partículas de argila (OADES, 1988), estando relacionada com o balanço de cargas elétricas no solo e o desenvolvimento da estrutura (GOMES et al., 1994). Sistemas de manejo que degradam a estrutura do solo diminuem o teor de matéria orgânica e aumentam a dispersão das partículas de argila. Partículas dispersas, ou seja, não floculadas, são transportadas para camadas inferiores do solo quando sofrem o impacto das gotas de chuva, podendo entupir poros e diminuir a capacidade de infiltração do solo (REICHERT; NORTON, 1995), tornando-o ainda mais suscetível à erosão hídrica.

2.1.3 Retenção e disponibilidade de água

A curva de retenção de água é de suma importância para o entendimento do movimento de água no solo, pois expressa o volume de água retido no solo em diferentes tensões. As modificações pelo preparo do solo na estrutura, distribuição do tamanho de poros e teor de carbono orgânico, provocam alterações nas forças de retenção e disponibilidade de água às plantas. O efeito do manejo na estrutura pode ser verificado quando o solo contém grande volume de água, ou seja, quando a água está retida a baixas tensões. Nesse caso, a retenção decorre da estrutura e da distribuição dos tamanhos de poros (BEUTLER et al., 2002), associados ao efeito da matéria orgânica na formação e estabilização de agregados. Em tensões maiores, a retenção não depende da estrutura do solo, mas da composição

granulométrica e da mineralogia do solo, devido à área superficial específica, que é onde ocorre a adsorção de água (GUPTA; LARSON, 1979).

A água é o principal fator de crescimento das plantas e sua disponibilidade tem relação com as oscilações de produtividade. O cálculo de água disponível no solo considera a faixa de umidade compreendida entre o limite superior de disponibilidade de água às plantas, chamada de capacidade de campo (CC), e o limite inferior de disponibilidade, conhecido como ponto de murcha permanente (PMP) (HILLEL, 1980). Existem várias maneiras de se determinar essas duas variáveis, sendo possível encontrar métodos de campo e de laboratório. Em laboratório, a capacidade de campo tem sido comumente considerada como sendo o volume de água retido no solo nas tensões de 10 e 33 kPa, respectivamente para solos arenosos e argilosos, enquanto que para o ponto de murcha permanente é considerada a tensão de 1500 kPa, independente da classe textural do solo (REICHARDT; TIMM, 2004).

Os sistemas de manejo alteram a estrutura do solo, afetando a quantidade de água disponível às plantas. Como a retenção de água no limite inferior de disponibilidade de água é controlada pela área superficial específica das partículas sólidas (minerais e orgânicas), a disponibilidade de água às plantas vai depender da retenção de água no limite superior de disponibilidade, que é dependente do manejo do solo. Em estudo desenvolvido por Salton; Mielniczuk (1995), a condição físico-hídrica do solo foi melhorada nos sistemas de semeadura direta e preparo mínimo em relação ao preparo convencional, sendo que esses sistemas evitaram a formação da crosta superficial, aumentaram a estabilidade de agregados e a continuidade de poros, que por sua vez podem contribuir para um maior volume de água disponível. Em experimento de longa duração, Costa et al. (2003) chegaram à conclusão que um solo sob sistema plantio direto reteve mais água do que em preparo convencional após 21 anos. A redução da macroporosidade, associada ao aumento de microporos, possibilita maior armazenamento de água na capacidade de campo e maior quantidade de água disponível às plantas (BERTOL; SANTOS, 1995).

2.1.4 Condutividade hidráulica do solo saturado

Apesar de a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) ser uma propriedade de grande variabilidade amostral, dificultando a diferenciação entre manejos, ela tem sido usada para caracterizar a qualidade estrutural do solo, sendo analisada juntamente com outras propriedades físico-hídricas. Essa propriedade representa o volume de um fluido que passa por um corpo sólido em um determinado tempo (LIBARDI, 2000). No caso do sistema solo, o fluido é a solução – tratada aqui simplesmente como água do solo – e o corpo sólido são as partículas minerais e orgânicas. Portanto, uma vez alterada a distribuição e o arranjo dos poros do solo, as propriedades de condutividade hidráulica também variam (BAGARELLO, 1997).

A forte associação entre a macroporosidade e a K_s faz com que pequenas mudanças no valor daquela alterem consideravelmente os valores dessa, tendo em vista que a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional à quarta potência de seu diâmetro (REICHERT et al., 2007). Segundo Mesquita; Moraes (2004), a geometria e a continuidade dos poros preenchidos com água são fatores determinantes da K_s , o que caracteriza sua maior dependência da estrutura do que da textura do solo. As práticas culturais que alteram a estrutura do solo influenciam diretamente na K_s , mais até do que nos processos de gênese e formação da estrutura desses solos.

Em um Latossolo Vermelho-Amarelo, Silva; Kato (1997) constataram diferenças importantes na camada de 2,0 a 8,0 cm para a K_s quando o solo foi manejado sob plantio direto e preparo convencional. Foi verificado pelos autores que pequenas diferenças na macroporosidade foram acompanhadas por elevadas diferenças de valores de K_s , cujos valores foram de 127 mm h^{-1} na área de plantio direto e de 227 mm h^{-1} na área de preparo convencional. Segundo Tavares-Filho et al. (2006), a K_s do solo escarificado foi 1,67 vezes maior que a do solo sob plantio direto, indicando que, após a escarificação, ocorreu uma elevação de 52 mm h^{-1} na condutividade hidráulica em relação ao solo sob plantio direto há 20 anos. Porém, esse ganho foi reduzido para 17 mm h^{-1} apenas um ano após a realização dessa escarificação, indicando que ocorre uma rápida reconsolidação do solo.

Por outro lado, Vieira; Muzilli (1984) obtiveram menores valores de K_s para o sistema de preparo convencional do solo em relação ao plantio direto, estando essa redução relacionada ao comprometimento da continuidade dos poros e a menor eficiência na transmissão de água em preparo convencional.

2.1.5 Permeabilidade do solo ao ar

O suprimento de oxigênio ao sistema radicular é muito importante e reflete a qualidade do espaço poroso quanto ao processo de fluxo de ar. Como o ar e a água ocupam o mesmo espaço no solo, quando o volume de um aumenta, ocorre decréscimo no volume do outro. Portanto, a permeabilidade do solo ao ar (K_a) tem relação direta com a retenção de água. Seu valor é máximo quando o solo está seco, e diminui progressivamente com o umedecimento, atingindo valor zero quando o solo está saturado.

A K_a também é dependente da distribuição do tamanho de poros, da porosidade total, da geometria e forma do sistema de poros e da continuidade dos poros (COREY, 1986; REICHERT et al., 2003). Os sistemas de manejo alteram a proporção do espaço poroso ocupado pelo ar e pela água, bem como a funcionalidade dos poros. De maneira geral, os sistemas conservacionistas provocam adensamento do solo, com aumento na quantidade de poros menores e do armazenamento de água. A descontinuidade dos poros provocada pela compactação diminui a K_a (BEUTLER et al., 2001). O revolvimento do solo atua no sentido contrário, alterando o arranjo dos poros e, conseqüentemente, a retenção de água e o fluxo de gases (KLEIN; CAMARA, 2007). A maior permeabilidade do solo ao ar se deve ao aumento da macroporosidade, responsável pela aeração, e diminuição da capacidade de armazenamento de água.

Para garantir a difusão do ar no solo e, conseqüentemente, aeração adequada para o desenvolvimento das plantas, o volume de macroporos (poros com diâmetro maior que 0,05 mm) não deve ser inferior a 10% do volume total do solo (TAYLOR, 1950). No entanto, esse valor é apenas uma referência, pois a taxa de difusão gasosa no solo depende também da profundidade e densidade do sistema

radicular das plantas, temperatura do solo, tortuosidade do espaço poroso, dentre outros (HILLEL, 1980).

2.1.6 Resistência do solo ao cisalhamento

A resistência do solo ao cisalhamento (τ) é uma importante propriedade dinâmica do solo. Ela representa a resistência que o solo oferece a uma força externa de deformação da sua estrutura. Na agricultura, esse parâmetro é essencial para a avaliação da capacidade de suporte do solo, da resistência à tração (BALASTREIRE, 1987) e do estado de compactação (SCHJONNING, 1991), bem como da resistência à erosão hídrica.

A τ é dependente da distribuição, forma e tamanho das partículas sólidas, estrutura, densidade do solo, argilominerais, tipo e quantidade de cátions trocáveis e forças de atração e repulsão entre as partículas (McCORMACK; WILDING, 1979). Assim, solos com maior quantidade de partículas finas apresentam maior resistência ao cisalhamento (LEBERT; HORN, 1991).

A τ pode ser avaliada com o uso de um aparelho de bolso chamado *torvane*. Esse aparelho realiza leituras rápidas, fazendo com que o solo se deforme sem drenagem, ou seja, não há tempo para expulsar a água dos poros. Nesse caso, é chamado de resistência ao cisalhamento sem drenagem, numericamente igual à coesão do solo, independentemente do ângulo de atrito (SMITH; SMITH, 1998).

Como vantagens desse aparelho destacam-se a possibilidade de medir a resistência ao cisalhamento do solo *in situ*, bem como análise rápida da compactação do solo e menores custos com análise física do solo em laboratórios (McKYES, 1989).

2.2 Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado

O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo pode auxiliar na definição das melhores estratégias para o manejo sustentável do

solo. A variabilidade espacial configura a maioria dos fenômenos naturais, e entre eles, os parâmetros relacionados com o movimento de água no solo (QUEIROZ, 1995). A variabilidade espacial é dependente de vários fatores, tais como: variação do material de origem, clima, relevo, organismos vivos do solo, forma de manejo e uso do solo e, também, a escala de tempo transcorrida desde a sua formação. Em outras palavras, a variabilidade espacial depende de processos genéticos de formação do solo e/ou de técnicas de manejo decorrentes de seu uso agrícola (REICHARDT; TIMM, 2004).

A alta variabilidade da K_s pode chegar ao ponto de não permanecer constante no mesmo solo, em consequência das variações contínuas dos processos físicos, químicos e biológicos. Este é o principal problema que dificulta a obtenção de valores médios, que sejam representativos de grandes áreas agrícolas e que a partir de amostragens podem ser usados com segurança nos estudos da dinâmica da água no solo (CADIMA et al., 1980).

Quando o grau de variação destes parâmetros é corretamente identificado, pode-se caracterizar uma determinada região e gerar estimativas confiáveis para o planejamento mais eficaz na implantação das malhas de amostragem (MULLA et al., 1992; ORTIZ, 2002; ROQUE, 2003). Souza et al. (1997) também relatam que o conhecimento do alcance da dependência espacial dos atributos do solo pode ser um critério para definir o intervalo dessas amostragens. Em Latossolos, nas áreas de formas côncavas e convexas, independente do histórico de manejo, há mais variabilidade de atributos químicos e físicos do que em áreas de formas lineares (SOUZA et al., 2003; SOUZA et al., 2004). Nas bacias hidrográficas, a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo também é importante para a caracterização do comportamento espacial e tem sido objeto de alguns estudos nos últimos anos (VIEIRA, 1998).

Referências na literatura mostram que os valores de K_s em uma área específica podem ser muito distintos, assumindo grande amplitude total e elevados coeficientes de variação (BREJDA et al., 2000; COOLEY, 1999; MESQUITA, 2001; MESQUITA et al., 2002; SILVA et al., 2008). Essa tendência de variação pode ser devido à dependência da K_s em relação ao volume de macroporos, da distribuição de partículas e da densidade do solo, além da existência de infiltrações preferenciais ao longo da distribuição do sistema radicular. Barreto et al. (2001), em um solo aluvial, constataram grandes variações espaciais, horizontal e vertical, na K_s , e em

parte, atribuíram essa variação à gênese e a evolução do solo local, pelo processo de sedimentação aluvial. A dispersão e a variabilidade dos dados de K_s são confirmadas por Fiorin (2008), onde foi observada correlação significativa ($P > 0,05$) com os valores de densidade do solo e de partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, argila, silte, areia, conteúdo volumétrico de água na saturação e conteúdo volumétrico de água a tensão de 1 kPa.

Devido ao grande efeito do diâmetro dos poros, a variabilidade da K_s em locais próximos pode alcançar várias ordens de grandeza (MESQUITA; MORAES, 2004). Esses mesmos autores comentam que a determinação de um valor de K_s que caracterize certa área pode ser uma tarefa muito complicada, em decorrência das variações e correlações com as demais variáveis no ambiente do solo. Por isso, a determinação da K_s para uma determinada área pode ser muito trabalhosa e extremamente dependente das interações entre tais variáveis e o solo, sendo necessário haver mais discussão e verificar o efeito na área considerada (REYNOLDS et al., 1992; SILVA; KATO, 1997; MOURA et al., 1999; MESQUITA, 2001).

A análise geoestatística, que permite detectar a existência da variabilidade e distribuição espacial das medidas em estudo, constitui importante ferramenta na análise e descrição detalhada da variabilidade das propriedades do solo (VIEIRA, 2000; CARVALHO et al., 2002; VIEIRA et al., 2002). Conhecendo-se as coordenadas geográficas dos pontos amostrados, pode-se efetuar uma análise espacial, possibilitando, segundo Vendrusculo (2001), representar a área com maior detalhamento. O tamanho da área a ser amostrada, a propriedade que se pretende analisar e a escala de trabalho irão definir o espaçamento entre as amostragens e, conseqüentemente, o grau de detalhamento (GREGO; VIEIRA, 2005).

As ferramentas da geoestatística possibilitam a análise de dependência espacial, como também a estimativa de dados para locais não amostrados. Um requisito básico para aplicação desses métodos é a necessidade de referenciamento das amostras, seja com relação às coordenadas geográficas ou ao tempo (ANGELICO; SILVA, 2006). O ajuste teórico dos dados analisados a modelos matemáticos denomina-se semivariograma, que é um dos aspectos mais importantes da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas. Por meio do semivariograma, pode-se verificar e modelar a dependência espacial de uma variável e estimar dados para um possível mapeamento (ANGELICO; SILVA, 2006).

Conhecido o semivariograma da variável em estudo e havendo dependência espacial, pode-se interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo, pelo método da krigagem, baseando-se na função da dependência espacial (VIEIRA, 1995; BRUNSDON et al., 1996). A krigagem é uma técnica indicada para a espacialização de propriedades físicas dos solos, que naturalmente apresentam uma variação gradual no terreno (FONSECA, 2002; ANDRADE et al., 2005). A krigagem é o melhor método de interpolação, porque está baseado na metodologia de melhor estimador linear não-tendencioso (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989, apud GONÇALVES et al., 2001). Além da krigagem, existem outros métodos de ajuste de semivariogramas, destacando-se os métodos dos mínimos quadrados ordinários, dos mínimos quadrados ponderados e máxima verossimilhança (MELLO et al., 2005).

Na literatura é possível encontrar alguns estudos com Ks e variabilidade espacial utilizando krigagem. Em dois solos arenosos, Bosch; West (1998) encontraram grande variabilidade nos dados de Ks, concluindo que houve maior correlação nos horizontes mais profundos e que a krigagem foi uma ferramenta eficiente para estimativa em locais não amostrados. Analisando espacialmente variáveis do solo, exceto a Ks, Angelico; Silva (2006) definiram a krigagem como um método estatístico confiável para interpolação, obtendo melhor desempenho que a estatística clássica na caracterização dos solos. Em Latossolo de uma sub-bacia hidrográfica, o método da máxima verossimilhança obteve os melhores resultados de ajuste de semivariogramas para a Ks (JUNQUEIRA JUNIOR et al., 2008). Também, Hosseini et al. (1993) ajustaram um modelo de semivariograma para a Ks, com alcance de 4,5 km, com efeito pepita e respondendo por 67% da variabilidade total dos dados, demonstrando a grande dispersão aleatória para esse atributo. Esses mesmos autores ainda relatam que comparando várias técnicas de interpolação, para o mapeamento da condutividade hidráulica no solo, a krigagem ordinária foi o método mais apropriado.

2.3 Estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado

A dinâmica da água no solo está diretamente relacionada com o desenvolvimento e produtividade das culturas. Planejamentos de uso da terra e proteção ambiental necessitam de informações globais sobre a qualidade da terra, bem como do risco de poluição dos aquíferos, capacidade de retenção de nutrientes ou degradação do solo em diferentes escalas. Algumas características são imprescindíveis, mas rotineiramente não são determinadas pela pesquisa de solo, como a retenção de água e condutividade hidráulica do solo saturado.

A K_s é uma das propriedades físico-hídricas de maior relevância para estudos de movimento de água e solutos no solo (MESQUITA; MORAES, 2004). Conforme Klute (1965), a K_s pode fornecer informações indiretas sobre a estrutura e estabilidade estrutural de agregados do solo, pois é influenciada por atributos físicos que controlam a proporção entre as fases sólida, líquida e gasosa do solo. Segundo Scherpinski (2003), a K_s está diretamente ligada ao tamanho, volume e distribuição dos poros do solo e varia para os diferentes tipos de solo existentes.

A estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado por meio de equações matemáticas de regressão pode ser uma alternativa viável, rápida e econômica. Essas equações foram chamadas de funções de pedotransferência (FPT) por Bouma (1989) apud Pachepsky; Rawls (1999), e são usadas para descrever a dependência da retenção de água e da condutividade hidráulica do solo em relação a parâmetros disponíveis nos estudos de solos. Segundo Budiman et al. (2003), são funções preditivas de certas propriedades dos solos baseadas em outras facilmente medidas e rotineiramente obtidas a custos mais baixos.

No Brasil, esse assunto ganhou destaque a partir da década de noventa. Atenção especial deve ser dada na estimativa de propriedades físico-hídricas do solo, pois os dados independentes apresentam uma determinada incerteza e os dados estimados um mínimo de inexatidão (BUDIMAN et al., 2003). A elaboração de funções de pedotransferência deve seguir dois princípios: o primeiro é que as funções devem ser eficientes, não estimar algo que é mais fácil ou mais barato determinar; e o segundo é que a incerteza de seu uso deve ser quantificada.

A precisão das funções de pedotransferência tende a ser melhor quanto mais homogêneos forem os solos que compõem a base de dados e quanto mais próximos

estiverem os solos que terão seus dados estimados. Um dos problemas mais comuns na elaboração de FPT é a diferença nos métodos analíticos empregados para obtenção das variáveis dependentes e independentes (OLIVEIRA et al., 2002).

A construção de funções de pedotransferência para a K_s se embasa naquelas propriedades físico-hídricas do solo que apresentam alguma relação com a K_s . Dados de levantamentos de solos prontamente disponíveis podem ser usados, tais como distribuição de tamanho de partículas, densidade do solo e conteúdo de matéria orgânica (RAWLS; BRAKENSIEK, 1983; VEREECKEN et al., 1989, 1990; van GENUCHTEN et al., 1992).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local de estudo

O estudo foi conduzido na microbacia experimental 'Cândido Brum', localizada no município de Arvorezinha, região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), a 240 km de Porto Alegre. A microbacia possui área total de 119 ha, a altitude varia de 560 a 740 metros e a geologia é caracterizada por derramamentos vulcânicos da formação Serra Geral. No terço superior da microbacia, onde estão situadas as nascentes d'água, a área apresenta topografia plana, pedregosidade moderada e solos com perfis profundos com presença de horizonte B textural, onde são encontrados os Argissolos Vermelhos (Figura 1). No restante da área, a topografia é acidentada, com pedregosidade moderada a forte e solo pouco profundo, ocorrendo associações entre Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico (STRECK et al., 2008) no terço inferior. Na transição entre o terço superior e inferior da microbacia, encontram-se associações entre Argissolos, Neossolos e Cambissolos.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cfb, subtropical superúmido, mesotérmico, com verões frescos e geadas severas demasiadamente frequentes, sem estação seca. A temperatura média diária do mês

mais quente é inferior a 22°C e a do mês mais frio superior a 3°C (MORENO, 1961). A precipitação média anual varia de 1.250 a 2.000 mm.

A produção de fumo (*Nicotiana tabacum* L.) se destaca como a principal atividade econômica nas propriedades agrícolas. Essa atividade caracteriza-se pela mão-de-obra exclusivamente familiar, aplicação excessiva de adubos, uso de tração animal e intenso revolvimento do solo em época que coincide com altas precipitações.

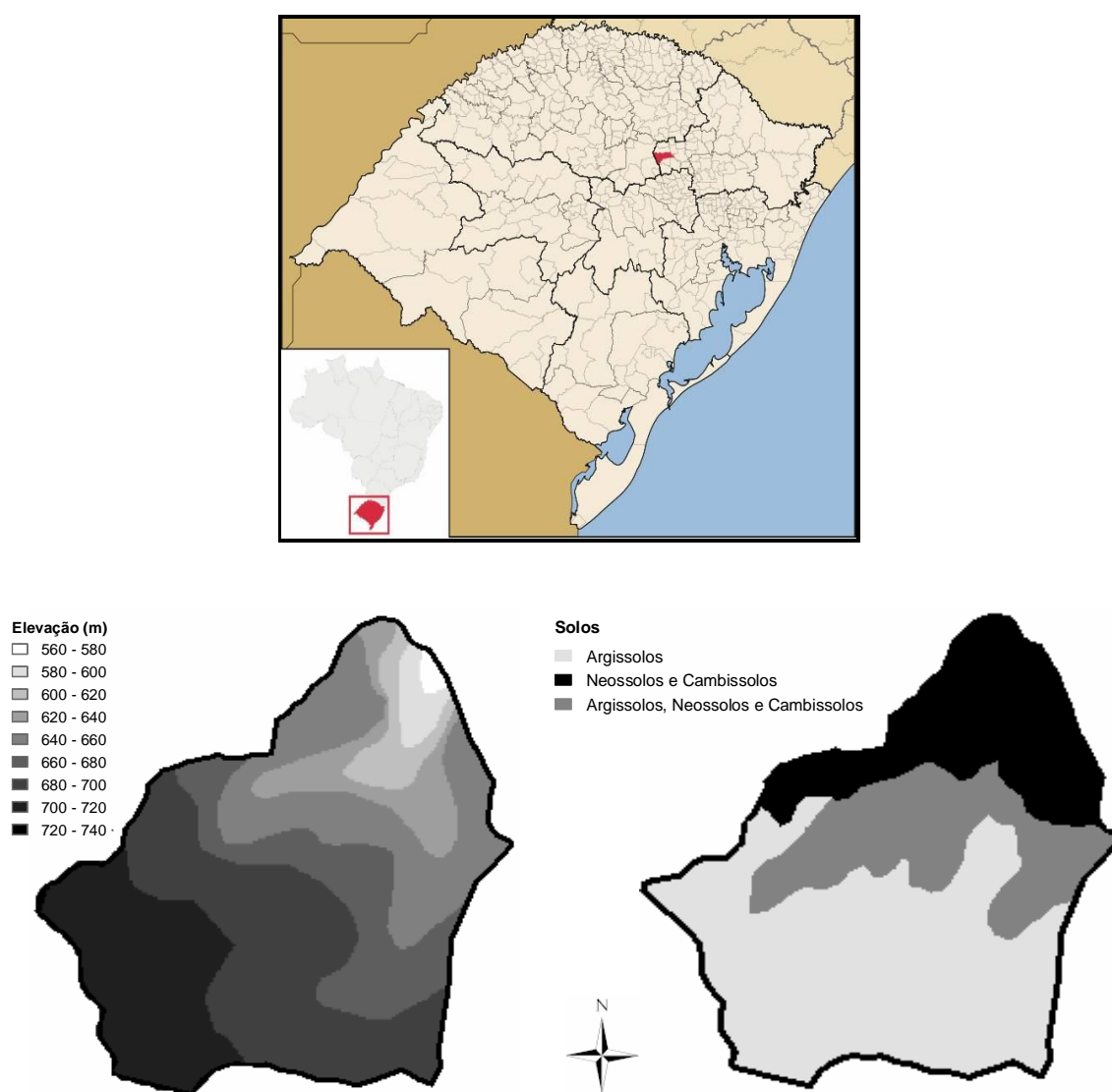


Figura 1 – Localização do município de Arvorezinha no Estado do Rio Grande do Sul (Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Arvorezinha>), modelo numérico de elevação e solos da microbacia Cândido Brum (Fonte: MINELLA, 2007).

3.2 Sistemas de manejo

O estudo na microbacia foi efetuado com os sistemas de uso e manejo predominantes na área: campo nativo, mata nativa, preparo convencional, plantio direto e preparo mínimo do solo. As práticas agrícolas são realizadas exclusivamente com o uso de tração animal. Até 2003, as áreas agrícolas eram cultivadas com preparo convencional do solo. A partir desse ano, foi implementado um programa de conservação do solo, em que os sistemas de plantio direto e preparo mínimo foram adotados em 70% da área cultivada com fumo na microbacia. Com o passar dos anos, alguns produtores retornaram ao sistema convencional e outros introduziram os sistemas de práticas conservacionistas. Portanto, quando nos referimos a um determinado sistema de manejo, devemos ter em mente que esse pode ter sido adotado em época distinta que outro de mesmo nome, podendo ter propriedades físico-hídricas mesclada com o sistema de manejo anterior. Esse fato faz com que o coeficiente de variação de uma propriedade do solo seja elevado, dificultando a diferenciação entre sistemas de manejo do solo.

Os sistemas de manejo praticados na microbacia são descritos a seguir.

a) Campo nativo (CN): áreas conhecidas como poteiros e são destinadas ao pastoreio animal. A vegetação é composta por gramíneas e leguminosas nativas da região. Devido à necessidade de água aos animais, essas áreas estão situadas geralmente próximas à rede de drenagem.

b) Mata nativa (MN): vegetação nativa composta por floresta ombrófila mista e floresta ombrófila aberta, pertencentes à Mata Atlântica. São áreas altamente declivosas e pedregosas, onde a agricultura é impraticável.

c) Preparo convencional (PC): áreas onde geralmente se cultiva aveia (*Avena strigosa*) no inverno e fumo no verão. Para a implantação dessas duas culturas o solo é revolvido com aração (arado de aiveca) seguida de gradagem (grade de dentes). Para o plantio do fumo, além dessas práticas é efetuada uma verga no solo para a aplicação da adubação de base. Em seguida, a verga é fechada e remontada na forma de um camalhão, sobre o qual é plantada a muda de fumo. Os camalhões apresentam uma seção de base de 0,30 m e altura de 0,30 m e são construídos seguindo o nível aproximado das curvas de nível. A distância entre camalhões é de 1,20 m e o plantio de mudas na linha possui espaçamento de 0,40 m. A construção

dos camalhões pode ser realizada em dois momentos: antes ou depois da implantação da cultura de inverno. No segundo caso, o revolvimento do solo nas linhas dos camalhões expõe parte da superfície do solo.

d) Plantio direto (PD): áreas em que as culturas de inverno são semeadas manualmente e a palha é dessecada para a implantação do fumo. A prática de construção dos camalhões não é efetuada, pois esses existem de anos anteriores. O plantio das mudas é realizado após a abertura de uma cova no camalhão e aplicação da adubação de base na superfície com o uso de um regador.

e) Preparo mínimo (PM): a cultura de inverno é implantada com a realização de uma aração e uma gradagem, com semeadura manual e sem incorporação das sementes. Para o plantio do fumo, a aração é realizada apenas nas linhas que receberão as mudas, abrindo-se uma verga na qual é aplicada a adubação de base. Na sequência, é feita uma nova passagem do arado apenas na linha, de maneira que a verga é fechada, formando-se o camalhão, sobre o qual é plantada a muda de fumo.

Grande parte das áreas cultivadas com fumo também é cultivada com milho em safrinha, seguindo o sistema de manejo adotado para a área. As áreas sob cultivo de eucalipto foram enquadradas em PM ou PD quando implantadas recentemente, dependendo do manejo adotado nas entrelinhas (cultivada ou não com fumo) e da cobertura do solo (plantas forrageiras). Em cultivos com tempo prolongado, essas áreas foram enquadradas como MN.

3.3 Coleta das amostras

Para a caracterização físico-hídrica da microbacia, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e não preservada na camada 0-5 cm, em uma malha irregular de 69 pontos distribuídos por toda a área de estudo (Figura 2). Cada ponto de coleta representa em torno de 1,7 ha.

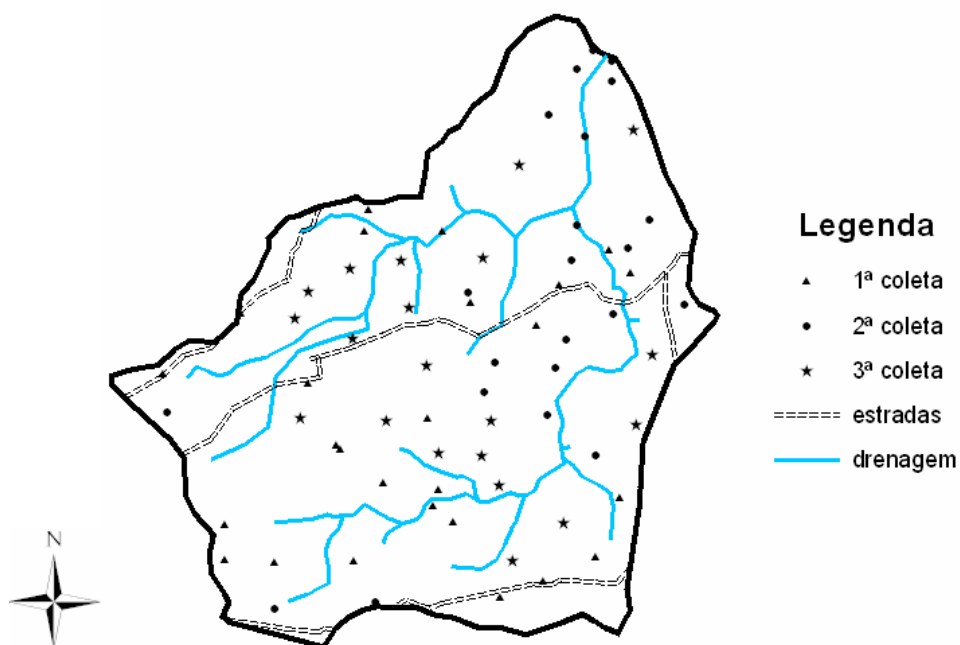


Figura 2 – Disposição dos pontos amostrais na microbacia e a respectiva época de coleta.

A coleta das amostras no campo foi realizada em três momentos devido à limitação de materiais de trabalho (Figura 2). Assim, a primeira e segunda coleta foram realizadas nos meses de fevereiro e maio de 2008, respectivamente. A primeira coleta foi realizada na metade inferior da microbacia e a segunda na metade superior. A terceira coleta, em setembro de 2008, foi realizada com o objetivo de obter amostras de solo em áreas que haviam sido pouco amostradas ou onde os pontos amostrais estavam muito distantes entre si.

Nas áreas agrícolas, a primeira e segunda coletas coincidiram, respectivamente, com a fase de pós-colheita da cultura do fumo e de emergência das plantas de cobertura de inverno. Na terceira coleta, em algumas áreas as plantas de cobertura de inverno estavam no final do ciclo, enquanto que outras áreas já estavam sendo submetidas à mobilização para implantação da cultura do fumo. Porém, as áreas que estavam sendo mobilizadas já tinham sido amostradas.

Em função da malha amostral, o número de amostras coletadas para cada sistema de manejo do solo foi consequência da área ocupada por esses na microbacia (Tabela 1). Sendo assim, o sistema de preparo convencional, representativo da microbacia, foi o que mais teve amostras coletadas, enquanto que a mata nativa e campo nativo tiveram número reduzido de amostras de solo.

Tabela 1 – Número de amostras de solo coletadas para cada sistema de manejo da microbacia.

Manejo	Pontos amostrados
Campo nativo	7
Mata nativa	11
Preparo convencional	28
Plantio direto	16
Preparo mínimo	7
Total	69

As amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas com o auxílio de anéis metálicos (4,0 cm de altura e 5,7 cm de diâmetro interno). Cada ponto de coleta foi composto por seis anéis coletados dentro de um raio de 5 m, amostrando-se o topo e a base dos camalhões. Sendo assim, o número total de anéis coletados foi de 414, tendo em vista que foram amostrados 69 pontos.

Em laboratório, as amostras foram preparadas retirando-se cuidadosamente o excesso de solo da face superior e inferior dos anéis. Para evitar perdas de solo durante o processo de saturação e manuseio das amostras, vedou-se a parte inferior com tecido permeável à água.

Na primeira amostragem de solo, houve quantidade grande de amostras descartadas em laboratório no momento da limpeza. A partir de então, essa tarefa foi realizada diretamente no campo, possibilitando que as amostras descartadas fossem substituídas por outras, até a obtenção de seis amostras por ponto de coleta. Verificou-se que essa prática reduziu expressivamente a quantidade de amostras de solo descartadas no laboratório.

Nas amostras com estrutura preservada, foram determinadas a K_s , a permeabilidade ao ar, as porosidades (total, macro e microporosidade), a densidade do solo e a umidade volumétrica nas tensões de 1, 6 e 10 kPa.

As amostras de solo com estrutura não preservada (1,5 kg) foram coletadas no mesmo local das amostras coletadas com anéis. A amostra principal foi composta por dez subamostras coletadas na camada de solo de 0-5 cm, em um raio de dois metros. No laboratório, as amostras foram colocadas em caixas de madeira para secar ao ar. Após secas, as amostras foram destorroadas e passadas por peneira de malha com 2,0 mm de abertura (TFSA). Com a TFSA foram determinadas a granulometria, o carbono orgânico do solo, a argila dispersa em água, a estabilidade

de agregados e a umidade volumétrica nas tensões 500, 1000 e 1500 kPa. Foram usadas duas repetições de laboratório.

3.4 Determinações

3.4.1 Retenção e disponibilidade de água no solo

A retenção de água no solo foi medida nas tensões 1, 6 e 10 kPa. Para isso, as amostras de solo com estrutura preservada, previamente preparadas, foram saturadas por elevação capilar durante 24 horas e levadas à mesa de tensão para aplicação das tensões de 1 e 6 kPa (EMBRAPA, 1997). A umidade na tensão de 10 kPa foi medida em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006). Após o equilíbrio da tensão (48 e 36 horas para a mesa de tensão e coluna de areia, respectivamente) as amostras foram pesadas e submetidas à determinação de permeabilidade ao ar, retornando novamente à mesa de tensão ou coluna de areia. Após aplicadas as tensões 1, 6 e 10 kPa, as amostras foram submetidas à determinação da K_s .

A retenção de umidade nas tensões de 500, 1000 e 1500 kPa foi medida pela técnica da psicrometria, com a utilização do aparelho WP4 (*dew point potentiometer*) (DECAGON, 2000), conforme Klein et al. (2006). Foram utilizadas em torno de seis repetições, com ampla faixa de umidade, para a construção de uma curva (potencial matricial vs umidade volumétrica), da qual foram extraídos os valores estimados de umidade volumétrica nas tensões de 500, 1000 e 1500 kPa.

A quantidade de água disponível foi representada pela diferença de umidade entre as tensões de 10 kPa e 1500 kPa, considerados como o limite superior e inferior, respectivamente, de disponibilidade de água à maioria das plantas.

3.4.2 Permeabilidade do solo ao ar

A condutividade do solo ao ar foi medida concomitantemente à determinação da umidade do solo nas tensões de 1, 6 e 10 kPa. Foi usado um permeâmetro de ar (HORN et al., 2004), como mostra a **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** O equipamento consiste na aplicação de fluxo de ar na amostra de solo à pressão baixa (0,1 kPa) e constante (para evitar fluxo turbulento) por meio de fluxímetros com diferentes vazões. O manômetro de água mede o gradiente de pressão entre o ambiente e o ar que flui pela amostra de solo.

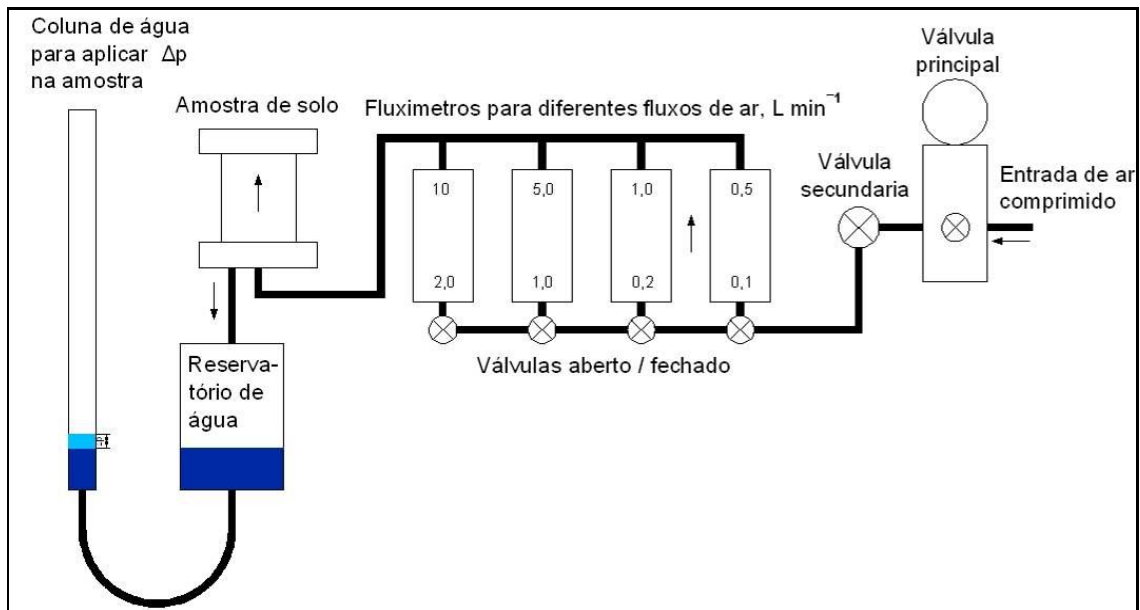


Figura 3 – Equipamento utilizado nas medidas de condutividade do solo ao ar em amostras com estrutura preservada. Fonte: VOSSBRINK (2005) e modificado por BRANDT, 2008 (comunicação pessoal).

A condutividade ao ar (K_l , cm s^{-1}) foi determinada pela equação:

$$K_l = \rho_l g \frac{\Delta V L}{\Delta t \Delta p A}$$

e a permeabilidade ao ar (K_a , μm^2) foi calculada a partir da condutividade ao ar:

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g}$$

sendo: ρ_l a densidade do ar na medição (kg m^{-3}); g a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$); ΔV o volume de ar (m^3) que passa pela amostra durante o tempo Δt (min); L a altura da amostra (m); Δp a pressão de ar aplicada (hPa); A , a área superficial da amostra (m^2); e η a viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

O cálculo da densidade do ar, usado na fórmula acima, é dado por:

$$\rho_l = \rho_n \times \left(\frac{T_n \times p}{p_n \times T} \right)$$

em que ρ_l é a densidade do ar no momento da medição (kg m^{-3}), ρ_n é a densidade padrão do ar (1293 kg m^{-3}), T_n é a temperatura padrão ($^\circ\text{K}$), p é a pressão atmosférica no momento da medição (mbar), p_n é a pressão atmosférica padrão (1013 mbar) e T é a temperatura do ar no momento da medição ($^\circ\text{K}$).

3.4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado, densidade do solo e porosidade

Após encerrada a determinação da umidade volumétrica e da permeabilidade ao ar, as amostras foram ressaturadas e submetidas à determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) com o auxílio de um permeâmetro de carga decrescente (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), conforme descrito em HARTGE; HORN (1992).

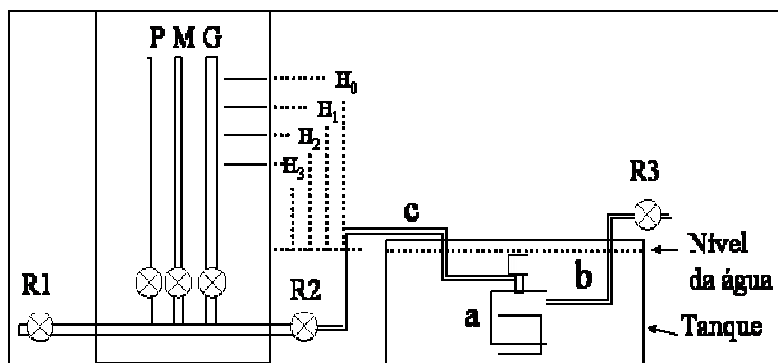


Figura 4 – Esquema do permeâmetro utilizado na determinação da condutividade hidráulica de solo saturado. Fonte: Gubiani et al., 2008.

Para cada amostra foram realizadas três leituras e a tomada de dados foi realizada por meio do programa computacional *KSAT* (GUBIANI et al., 2008), o qual utiliza a equação proposta por Hillel (1998):

$$K_s = 2,3 \frac{aL}{A\Delta t} (\log H_n - \log H_{n+1})$$

onde:

K_s : condutividade hidráulica do solo saturado (cm h^{-1});

a : área da seção transversal do tubo contendo a coluna de água (cm^2);

A : área de seção transversal da amostra de solo (cm^2);

L : comprimento da amostra de solo (cm);

Δt : intervalo de tempo de deslocamento da coluna (h);

H_n : carga hidráulica inicial (cm);

H_{n+1} : carga hidráulica final (cm).

Depois da determinação da K_s as amostras foram secas em estufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$ para a determinação da densidade do solo (D_s , Mg m^{-3}) pela fórmula (EMBRAPA, 1997):

$$D_s = \frac{M_s}{V}$$

onde M_s é a massa de solo seco (Mg) e V é o volume da amostras de solo (m^3).

A porosidade total corresponde ao volume de água contida na amostra de solo saturada, enquanto que a microporosidade corresponde à umidade volumétrica quando a amostra está sob tensão de 6 kPa. A macroporosidade é obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade (EMBRAPA, 1997).

3.4.4 Composição granulométrica, argila dispersa em água e grau de flocculação

A análise granulométrica consistiu da quantificação do teor de cascalho (20,0-2,0mm), areia (2,0-0,05 mm), silte (0,05-0,002 mm) e argila (<0,002 mm) pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997). O teor de areia total foi composto pela soma dos teores de areia grossa (2,0-0,2 mm) e areia fina (0,2-0,05 mm). O processo de dispersão das amostras foi modificado em relação ao proposto pela EMBRAPA

(1997). As amostras de solo com estrutura alterada foram submetidas à dispersão em agitador horizontal com 120 rpm durante 4 horas. Para isso, foram utilizados vidros de 100 ml contendo 20 g de solo, 50 ml de água destilada, 10 ml de NaOH 6% (dispersante químico) e duas esferas de *nylon* (dispersante físico) com peso de 3,04 g, diâmetro de 1,71 cm e densidade de 1,11 g cm⁻³ (SUZUKI et al., 2004a, b). Não foi realizada a oxidação da matéria orgânica.

Para a determinação da argila dispersa em água seguiu-se a mesma metodologia utilizada para a determinação granulométrica, porém, sem a utilização de dispersante químico.

O grau de floculação foi determinado pela equação:

$$GF = \frac{A_T - ADA}{A_T} * 100$$

sendo: GF = grau de floculação (%); ADA = argila dispersa em água (g kg⁻¹); A_T = argila total (g kg⁻¹).

3.4.5 Carbono orgânico do solo

O teor de carbono orgânico no solo foi determinado em amostras de solo com diâmetro menor que 2,0 mm pelo método da combustão úmida descrita em EMBRAPA (1999) e modificada por Rheinheimer et al. (2008). A metodologia consiste na redução do dicromato (Cr₂O₇⁻²) por compostos de C orgânico e subsequente determinação do dicromato não reduzido por titulação de oxirredução com Fe²⁺, que nesse caso foi o sulfato ferroso amoniacal [Fe(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O].

3.4.6 Estabilidade de agregados

A agregação do solo foi avaliada por meio da estabilidade de agregados, calculada com agregados de diâmetro entre 1,0 e 2,0 mm secos ao ar (KEMPER, 1965). Foram pesadas três subamostras com quatro gramas de solo. Uma foi levada à estufa a 105 °C para determinação da umidade, e as outras duas foram colocadas

em peneira de 0,25 mm e cuidadosamente introduzidas no aparelho de oscilação vertical (YODER, 1936). O equipamento foi preparado previamente ajustando-se o nível da água 1 cm acima do fundo das peneiras, que estavam na posição superior de deslocamento vertical. Isso garantiu que as amostras ficassem sempre submersas durante a agitação. Os agregados permaneceram estáticos por 10 minutos para umedecimento por capilaridade e, em seguida, sofreram agitação por 5 minutos, a uma velocidade de oscilação de 36 ciclos por minuto e curso de oscilação vertical de 1,3 cm. O solo que permaneceu na peneira foi colocado em lata e levado à estufa para secagem a 105°C durante 24 horas. Após seco, a amostra foi pesada e exposta à solução dispersante (1/3 de NaOH e 2/3 de água) durante 1 minuto e novamente passada em peneira de 0,25 mm. O processo de secagem e pesagem foi repetido.

A estabilidade de agregados foi calculada pela seguinte equação:

$$EA = \frac{(Magr + Ma) - Ma}{(4g - Ma - Mar)} * 100$$

onde: EA é a estabilidade de agregados (%); Magr é a massa de agregados (g); Ma é a massa de areia (g); e Mar é a massa de água residual contida nas 4 gramas da amostra (g).

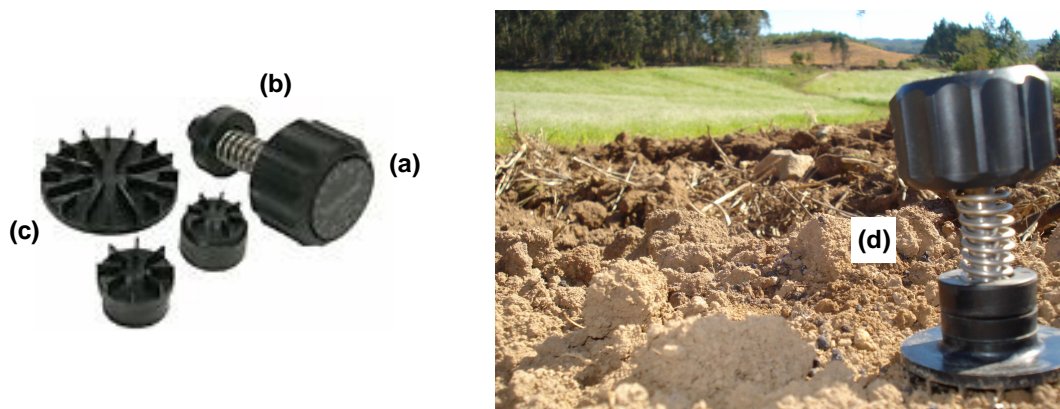
Para facilitar a diferenciação entre tratamentos, efetuou-se também a caracterização física da fração 1,0-2,0 mm com a determinação de granulometria, carbono orgânico, argila dispersa em água e grau de floculação.

3.4.7 Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento (τ) foi medida diretamente no campo com o uso de um aparelho denominado *torvane* (HOLTZ; KOVACS, 1981) (Figura 5). As medições de τ foram realizadas simultaneamente à terceira coleta de amostras de solo. Procurou-se fazer as medições em locais próximos aos pontos onde foram coletadas as amostras para caracterização físico-hídrica de solo (1ª, 2ª e 3ª coletas). Ao total, foram obtidos valores de τ em 71 pontos, cada um composto por 10 leituras em um raio de dois metros.

O *torvane* é constituído de três dispositivos simples: um botão graduado (responsável pela medição da resistência) acoplado a uma haste com mola (responsável pela torção) e, na parte inferior, são acoplados discos perpendiculares à haste. Existem três discos para medir a τ dentro de uma determinada faixa de esforços (Figura 5c). Seleciona-se o mais adequado para a resistência esperada do tipo de solo (o disco maior é para solos menos resistentes). Para a leitura, os discos são inseridos no solo com o auxílio da haste (Figura 5d), o leitor de tensão é zerado e então girado no sentido horário até que a energia elástica acumulada na mola de torção exceda a resistência do solo ao cisalhamento. O torque é aplicado suavemente em um intervalo de 5 a 10 segundos e, após o cisalhamento, faz-se a leitura no medidor multiplicando o valor pela constante característica do disco (2,5, 1 ou 0,2). Como o teste é realizado em poucos segundos, a τ é obtida sem drenagem do solo, correspondendo ao valor de coesão do solo (RODRÍGUEZ-TOVAR; DELGADO, 2006).

Para os solos da microbacia, que são pouco coesos, utilizou-se o disco maior que realiza leituras em tensões menores (0 a 20 kPa). Para algumas áreas não foi possível a utilização desse disco, que foi trocado por um de tamanho médio.



Fonte: <http://www.humboldtmg.com/c-1-p-43-id-1.html>

Fonte: Dalbianco (arquivo pessoal).

Figura 5 – (a) medidor e aplicador de torção; (b) mola responsável pela torção; (c) discos, com aletas cisalhantes, em três tamanhos diferentes; e (d) visualização de como é realizada a determinação a campo.

3.5 Análise estatística dos dados

3.5.1 Contrastes entre sistemas de manejo do solo

A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste Shapiro-Wilk (SAS Institute, 1990) e visualizada em histogramas. As variáveis com distribuição não-normal foram transformadas para atender ao pressuposto estatístico de normalidade.

Como o experimento não apresenta um delineamento experimental convencional, os tratamentos foram avaliados por meio de contrastes ortogonais entre os sistemas de manejo do solo. Os contrastes foram organizados da seguinte maneira: contraste entre áreas não cultivadas e cultivadas (CN-MN vs PC-PD-PM); efeito do tipo de vegetação natural e pisoteio animal (CN vs MN); efeito das práticas conservacionistas (PC vs PD-PM); e efeito da cobertura permanente do solo (PD vs PM).

A significância dos contrastes foi testada pelo teste F ($P < 0,05$) e foi realizado com base nas médias dos tratamentos. Nas tabelas, abaixo das médias, é apresentado o valor da mediana para aquele conjunto de dados, como forma de melhor representar os valores obtidos quando a variável não possui distribuição normal. O sinal da estimativa do contraste informou qual das duas opções do contraste foi mais favorável.

As análises estatísticas foram efetuadas com os procedimentos 'PROC UNIVARIATE' e 'PROC GLM' do módulo de estatística do programa Statistical Analysis System (SAS Institute, 1997).

3.5.2 Análise espacial da condutividade hidráulica do solo saturado

Procedeu-se uma análise estatística descritiva da K_s para verificação do comportamento quanto às médias estatísticas de posição e de variabilidade, bem como a aderência à distribuição normal.

A dependência espacial foi avaliada por meio de recursos geoestatísticos, com a utilização do programa GS⁺ versão 5.1.1 (ROBERTSON, 1998). A estimativa das semivariâncias para a construção do semivariograma foi obtida pela equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

onde $\gamma(h)$ é o valor estimado da semivariância dos dados experimentais, $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são os valores observados da variável regionalizada e $N(h)$ é o número de pares de valores medidos, separados por uma distância h (GUERRA, 1988).

A modelagem do semivariograma criou um modelo que explica a dependência espacial dos dados, servindo para a estimativa da K_s , pelo método da krigagem, em áreas onde não se tem observações. Existem vários modelos e o programa indica o melhor em função dos parâmetros do semivariograma, ou seja, o maior coeficiente de determinação (R^2), a menor soma de quadrados do resíduo e o menor erro de predição da auto-validação (cross-validation). O grau de dependência espacial é expresso pela equação $C/(C_0+C)$, e é classificado como fraco quando $<0,25$, moderado entre $0,25$ e $0,75$ e forte quando $>0,75$.

Após o ajuste dos semivariogramas utilizou-se a interpolação dos dados pela krigagem ordinária para espacializar a variável K_s e construir o mapa da distribuição espacial da variável K_s .

3.5.3 Funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica do solo saturado

O banco de dados usado para a elaboração das funções de pedotransferência foi composto por determinações de campo e de laboratório, realizadas na área que compreende a microbacia Cândido Brum, em Arvorezinha, RS, conforme descrito anteriormente.

Os parâmetros físicos que foram utilizados como variáveis independentes para estimativa da condutividade hidráulica foram: cascalho, areia total, areia grossa, areia fina, silte, argila, grau de floculação da argila, carbono orgânico,

densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, umidade volumétrica na saturação e nas tensões de 1, 6 e 10 kPa e água disponível.

Como a análise estatística pressupõe que os dados tenham distribuição normal, os parâmetros físicos foram submetidos à análise de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk para inclusão no modelo. As variáveis que não atenderam à suposição de normalidade foram transformadas para normalização.

O conjunto de dados foi submetido à análise de correlação simples para identificar as variáveis que possuíam maior efeito na condutividade hidráulica do solo saturado. Após a observação e seleção dos parâmetros mais significativos, realizou-se análise de regressão múltipla com o procedimento *stepwise* do programa Statistical Analysis System (SAS Institute, 1997), o qual parte da variável independente que mais se correlaciona com a variável dependente, para no passo seguinte, adicionar outra variável de maior correlação parcial com o modelo pré-selecionado e, posteriormente, testar pelo teste F. Quando o valor do F calculado ultrapassar 0,5, o procedimento de inserção de variáveis é encerrado.

As análises de regressão linear múltiplas foram elaboradas a partir de quatro conjuntos de variáveis independentes. Para o cálculo da equação 1 foram usadas como variáveis preditoras somente classes de tamanho de partículas; para a equação 2, além dessas variáveis texturais, usou-se densidade do solo e carbono orgânico; na equação 3 foram acrescentadas as variáveis relativas à porosidade e grau de dispersão; e na equação 4, as variáveis referentes à retenção e disponibilidade de água.

Portanto, a organização das variáveis independentes para seleção e inserção nas equações foi da seguinte maneira:

$$\text{Equação 1: } K_s = f\{C_{ASC}, A_T, A_G, A_F, S_I, A_{RG}\}$$

$$\text{Equação 2: } K_s = f\{C_{ASC}, A_T, A_G, A_F, S_I, A_{RG}, D_s, CO\}$$

$$\text{Equação 3: } K_s = f\{C_{ASC}, A_T, A_G, A_F, S_I, A_{RG}, D_s, CO, M_A, M_I, P_T, GF\}$$

$$\text{Equação 4: } K_s = f\{C_{ASC}, A_T, A_G, A_F, S_I, A_{RG}, D_s, CO, M_A, M_I, P_T, GF, \theta_1, \theta_6, \theta_{10}, AD\}$$

O poder preditivo das equações foi analisado primeiramente pelo coeficiente de determinação (R^2) e, posteriormente, pelo erro padrão da estimativa ($S_{y,x}$, %). Um ótimo modelo é aquele que, para um dado número de variáveis, produz a mínima soma de quadrados do erro (SSE), ou, equivalentemente, o máximo coeficiente de determinação múltipla (R^2). Esse coeficiente é obtido do quociente SSR/SST, em

que SSR é a soma de quadrados da regressão, que mede a variabilidade em resposta a uma variável atribuída ao modelo, e SST, a soma de quadrados total corrigida para a média da variável resposta. A diferença entre SSR e SST é a soma de quadrados do erro. Para melhor visualização, a qualidade da estimativa das equações foi representada em gráficos de relação 1:1.

Na Tabela 2 estão apresentados os modelos que foram selecionados da literatura para avaliação da confiabilidade das estimativas, testadas com o banco de dados físico-hídricos da microbacia de Arvorezinha.

Tabela 2 – Equações encontradas na literatura para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado.

Autores	Equações ⁽¹⁾
1) Saxton; Rawls (2006)	$K_s = 1930 (\theta_s - \theta_{33})^{(3-1/B)}$ onde: $B = \log(1500) - \log(33) / \log(\theta_{33}) - \log(\theta_{1500})$
2) Cosby et al. (1984)	$K_s = 25,410^{(-0,6 + 0,0126 A_T - 0,0064 A_{RG})}$
3) Brakensiek et al. (1984)	$K_s = 10 \exp(x)$, onde: $x = 19,52348 P_T - 8,96847 - 0,028212 A_{RG} + 0,00018107 A_T^2 - 0,0094125 A_{RG}^2 - 8,395215 P_T^2 + 0,077718 A_T P_T - 0,00298 A_T^2 P_T^2 - 0,019492 A_{RG}^2 P_T^2 + 0,0000173 A_T^2 A_{RG} + 0,02733 A_{RG}^2 P_T + 0,0011434 A_T^2 P_T - 0,0000035 A_{RG}^2 A_T$
4) Vereecken et al. (1990)	$K_s = 0,417 \exp(20,62 - 0,96 \log A_{RG} - 0,66 \log A_T - 0,46 \log MO - 8,43 D_s)$
5) Saxton et al. (1986)	$K_s = 10 \exp(12,012 - 0,0755 A_T + (-3,895 + 0,03671 A_T - 0,1103 A_{RG} + 0,00087546 (A_{RG}^2)) / (0,332 - 0,000751 A_T + 0,1276 \log_{10}(A_{RG})))$
6) Campbell; Shiozawa (1994)	$K_s = 54 \exp(-0,07 A_T - 0,167 A_{RG})$
7) Dane; Puckett (1994)	$K_s = 303,84 \exp(-0,144 A_{RG})$
8) Pucket et al. (1985)	$K_s = 156,96 \exp(-0,1975 A_{RG})$

⁽¹⁾ K_s = condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); θ_s = umidade de saturação (%); θ_{33} = umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (%); θ_{1500} = umidade volumétrica na tensão de 1500 kPa (%); B = coeficiente de umidade-tensão (adimensional); A_T = areia total (%); A_{RG} = argila (%); P_T = porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s = densidade do solo (g cm^{-3}); e MO = matéria orgânica do solo (%).

A equação de Saxton; Rawls (2006) estima K_s com o uso de um programa gráfico computacional e as equações foram elaboradas com base no banco de dados de solos do *United States Department of Agriculture* (USDA), contendo medidas para uma vasta gama de solos. Com a entrada de dados no programa, como granulometria, matéria orgânica e condição estrutural do solo (cinco níveis de

compactação) é possível obter rapidamente o valor de condutividade hidráulica do solo saturado em mm h^{-1} . Os cálculos levam em conta valores de umidade nas tensões de 33 e 1500 kPa, que o próprio programa estima.

Na equação original publicada por Brakensiek et al. (1984), a porosidade total é usada como variável independente. Assumindo uma densidade de partícula constante de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, o dado requerido pode ser calculado a partir da densidade do solo, a qual é usada como variável de entrada para este estudo. O valor de K_s para essa equação foi obtido com volume de medida maior que 6000 cm^3 .

Saxton et al. (1986) disponibilizaram duas equações para estimar K_s : a primeira está baseada em três variáveis independentes que incluem o conteúdo de umidade medido na saturação, a outra estima também o conteúdo de umidade na saturação a partir do conteúdo de areia e silte. Para nosso estudo é usada a segunda aproximação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades físico-hídricas do solo

4.1.1 Granulometria

A composição granulométrica e os contrastes para os diferentes sistemas de manejo do solo estão apresentados na Tabela 3. Os contrastes entre sistemas de manejo não foram significativos para todas as frações granulométricas.

A área da microbacia apresenta grande quantidade de cascalho, com teores variando de 138 g kg^{-1} em áreas sob PD a 238 g kg^{-1} em áreas sob PC. Na fração terra fina ($<2,0 \text{ mm}$), a quantidade de argila variou de 236 a 311 g kg^{-1} , a areia total variou de 250 a 296 g kg^{-1} , enquanto que a fração silte, em maior quantidade, variou de 438 a 467 g kg^{-1} .

A classificação da classe textural para cada amostra coletada está apresentada na Figura 6. A maioria das amostras foi enquadrada nas classes franca, franco-argilosa e franco-siltosa. Considerando os valores médios de areia, silte e argila, a classe textural dos solos da microbacia é franco-argilosa. A subdivisão em sistemas de manejo possibilita pequena diferenciação dos solos em termos de classe textural. Para o sistema de manejo campo nativo, mata nativa e preparo convencional, o solo é classificado como franco, e para os sistemas plantio direto e preparo mínimo, como franco-argiloso. Deve-se levar em consideração que esses valores representam uma média das amostras coletadas nas áreas que compõem um sistema de manejo, nos quais é possível encontrar solos com classe textural diferente da indicada.

Tabela 3 – Composição granulométrica do solo⁽¹⁾ para os sistemas de manejo da microbacia.

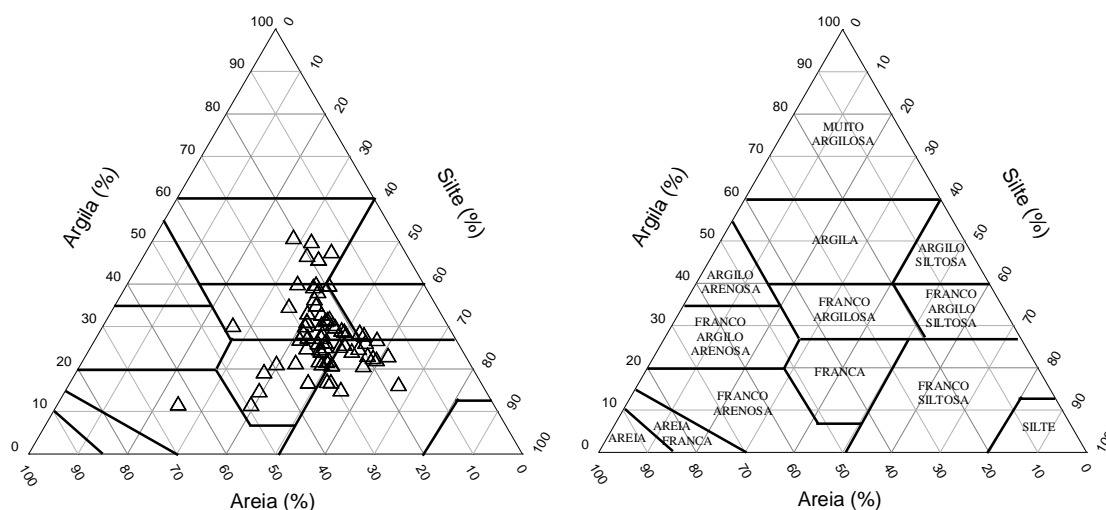
Sistemas ⁽²⁾	C _{ASC} ⁽³⁾	Terra fina	Fração terra fina				
			A _T	A _G	A _F	S _I	A _{RG}
-----g kg ⁻¹ -----							
CN	126 (94)	874 (906)	276 (291)	109 (86)	167 (183)	488 (480)	236 (252)
MN	186 (126)	814 (874)	276 (229)	132 (121)	144 (116)	445 (471)	279 (265)
PC	239 (253)	762 (747)	269 (269)	99 (109)	170 (148)	458 (454)	273 (259)
PD	138 (148)	862 (852)	251 (254)	116 (109)	135 (119)	438 (443)	312 (289)
PM	182 (190)	818 (810)	251 (219)	114 (123)	137 (127)	454 (433)	295 (271)
CV (%)	37,4	14,6	26,5	52,0	8,1	18,5	30,6
Contrastes		Significância das médias dos contrastes ⁽⁴⁾					
CN-MN x PC-PD-PM		ns	ns	ns	ns	ns	ns
CN x MN		ns	ns	ns	ns	ns	ns
PC x PD-PM		ns	ns	ns	ns	ns	ns
PD x PM		ns	ns	ns	ns	ns	ns

⁽¹⁾Valores entre parênteses representam a mediana dos valores obtidos.

⁽²⁾CN = campo nativo; MN = mata nativa; PC = preparo convencional; PD = plantio direto e PM = preparo mínimo; e CV = coeficiente de variação.

⁽³⁾C_{ASC} = cascalho (20-2,0 mm); A_T = areia total (2,0-0,05 mm); A_G = areia grossa (2,0-0,2 mm); A_F = areia fina (0,2-0,05 mm); S_I = silte (0,05-0,002 mm); e A_{RG} = argila (<0,002 mm).

⁽⁴⁾ns não significativo.


Figura 6 – Classe textural para cada ponto amostrado na microbacia e triângulo textural de referência.

A fração grosseira do solo, representada pelo cascalho, pode ter influenciado as propriedades hidráulicas do solo. Sua relação com as demais propriedades físico-

hídricas pode ser visualizada pela correlação linear de Pearson (Tabela 4). A correlação é positiva e significativa entre cascalho e macroporosidade (0,28), permeabilidade ao ar nas tensões de 1, 6 e 10 kPa (0,31, 0,37 e 0,37, respectivamente) e condutividade hidráulica do solo saturado (0,28). Por outro lado, a presença de cascalho diminuiu a densidade do solo (-0,28) e a retenção de água a 10 kPa, ou seja, na capacidade de campo (-0,26).

Tabela 4 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis físico-hídricas do solo e o teor de cascalho (C_{ASC}), areia total (A_T), areia grossa (A_G), areia fina (A_F), silte (S_I) e argila (A_{RG}).

Variável	C_{ASC}	A_T	A_G	A_F	S_I	A_{RG}
Densidade do solo	-0,28 ⁽¹⁾	0,09	0,18	-0,13	-0,26*	0,22
Porosidade total	0,19	-0,08	-0,13	0,02	0,19	-0,11
Macroporosidade	0,28*	-0,08	-0,05	-0,01	0,08	-0,06
Microporosidade	-0,18	0,05	-0,03	0,03	-0,06	-0,03
Umidade de saturação	0,17	-0,07	-0,18	0,04	0,23	-0,14
Umidade a 1 kPa	-0,18	0,14	-0,08	0,17	0,17	-0,24*
Umidade a 6 kPa	-0,20	0,04	-0,09	0,05	0,09	-0,04
Umidade a 10 kPa	-0,26*	-0,03	-0,09	-0,04	0,04	0,07
Umidade a 500 kPa	0,08	-0,12	-0,09	-0,07	0,12	-0,01
Umidade a 1000 kPa	-0,06	-0,15	-0,02	-0,15	0,00	0,13
Umidade a 1500 kPa	-0,18	-0,15	0,05	-0,19	-0,11	0,23
Água disponível	-0,13	0,05	-0,11	0,07	0,08	-0,05
Permeabilidade ao ar em 1 kPa	0,31*	-0,10	-0,04	-0,04	0,09	-0,02
Permeabilidade ao ar em 6 kPa	0,37**	-0,04	-0,06	0,01	0,08	-0,05
Permeabilidade ao ar em 10 kPa	0,37**	-0,02	-0,04	0,02	0,09	-0,08
Condutividade hidráulica do solo saturado	0,28*	-0,17	0,01	-0,19	0,07	0,10
Carbono orgânico	-0,05	-0,23	0,04	-0,39**	0,06	0,26*
Grau de flocculação	-0,02	-0,24*	-0,31*	0,05	0,33**	-0,17
Estabilidade de agregados	-0,13	-0,18	0,04	-0,33**	-0,11	0,35**

(1) * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade.

Solos pedregosos modificam a organização da fração terra fina, proporcionando elevada macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado, o que favorece a infiltração de água no solo.

A pequena dimensão dos anéis de coleta dificultou a boa amostragem das frações granulométricas do solo, especialmente do cascalho, devido aos cuidados necessários para não entortar os anéis. Em outras palavras, em solos com maior quantidade de cascalho as amostras coletadas tiveram menor densidade, pois o solo

é bastante poroso onde se tem grande quantidade de cascalho, que não cabe no anel. Além da redução da densidade na fração terra fina, a presença de cascalho reduz o volume de solo aproveitável pelas raízes das plantas, bem como o armazenamento de água, especialmente na tensão de 100 kPa (capacidade de campo).

A proporção do tamanho das partículas de solo tem relação direta com a suscetibilidade à erosão. Partículas de areia são resistentes ao transporte pela água devido ao seu peso, e as partículas de argila, quando floculadas, também resistem à enxurrada. A grande quantidade de silte na fração terra fina pode representar um problema, tendo em vista que a erodibilidade do solo tende a aumentar (WISCHMEIER; SMITH, 1958). O silte apresenta comportamento intermediário entre as partículas de areia e argila, pois seu tamanho é menor que a areia, mas não o suficiente para ter atividade eletro-química na superfície e se agregar a outras partículas como ocorre com a argila. O menor peso e a não agregação fazem com que as partículas de silte sejam facilmente transportadas quando desagregadas e expostas a agentes erosivos. Porém, neste estudo verificou-se efeito contrário, ou seja, a correlação do silte com o grau de floculação do solo foi positiva ($r=0,33$). O grau de floculação foi afetado negativamente pelo teor de areia grossa ($r=-0,31$) (Tabela 4), enquanto que o teor de areia fina diminuiu a estabilidade de agregados ($r= -0,33$) e a argila a aumentou ($r=0,35$). Mesmo assim, ressalta-se a importância de manter o solo coberto e com grande quantidade de matéria orgânica. A agregação representa maior resistência do solo à erosão hídrica e evita a predisposição das partículas ao transporte pelo escoamento. Na Tabela 4 verifica-se, ainda, a dependência da estabilidade de agregados em relação ao teor de areia fina e argila, sendo que o primeiro tem efeito negativo e o segundo positivo.

4.1.2 Densidade do solo

A densidade do solo foi baixa para todos os sistemas de manejo. O valor mínimo ($0,85 \text{ Mg m}^{-3}$) foi verificado nas áreas sob MN e o valor máximo ($1,14 \text{ Mg m}^{-3}$) nas áreas sob PD (Tabela 5). Esses valores são menores que os limites considerados críticos para o desenvolvimento de plantas, conforme apresentado por

Reichert et al. (2007, 2009). Esses autores propuseram valores críticos de densidade do solo em função do teor de argila. Para os solos da microbacia, que possuem valor médio de 278 g kg^{-1} de argila, o valor de densidade crítica seria em torno de $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$. Portanto, para os solos deste estudo, a densidade do solo está bem abaixo do limite considerado restritivo ao crescimento radicular das plantas.

Os sistemas de manejo com cultivo do solo (PC, PD e PM) apresentaram valores superiores de densidade em relação ao campo nativo e mata nativa (Tabela 5). A maior densidade do solo em áreas cultivadas corrobora os resultados encontrados por Ferreira (2008), onde solos cultivados sob PC e PD apresentam maior densidade que aqueles mantidos sob mata natural. Isso demonstra que o uso do solo para fins agrícolas, independentemente do sistema de manejo utilizado, promove alterações na densidade do solo (COSTA et al., 2003), enquanto que áreas não cultivadas proporcionam a formação de uma estrutura estável, com rede de poros contínua e incremento de matéria orgânica, diminuindo a densidade. Segundo Hamza; Anderson (2005), o aumento da densidade do solo pelo uso agrícola se deve ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas, pisoteio animal, cultivo intensivo e sistema de manejo inadequado. Além disso, o aumento da densidade em solos cultivados pode estar relacionado com o menor teor de matéria orgânica (ARAUJO et al., 2004).

A densidade do solo foi maior em campo nativo que em áreas sob mata nativa (Tabela 5), estando relacionado com o pisoteio animal existente naquelas áreas. O aumento da densidade também foi verificado nas áreas com práticas conservacionistas (PD e PM) em relação àquelas áreas com preparo convencional (Tabela 5). A ausência total ou parcial do revolvimento do solo possibilita um adensamento natural da massa sólida (DAM et al., 2005) e, em outros casos, se deve à compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas (DE MARIA et al., 1999). Em estudo desenvolvido por Bertol et al. (2004), a redução da macroporosidade e da porosidade total na camada 0-10 cm, com aumento dos microporos, foram responsáveis pelo aumento da densidade em sistema de manejo plantio direto em relação a preparo convencional e campo nativo. No entanto, nem sempre são verificadas diferenças de densidade na camada superficial entre sistemas de manejo conservacionista e convencional, como averiguado nos estudos de Albuquerque et al. (1995) e Flores et al. (2008).

Tabela 5 – Densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (MA), microporosidade (MI), condutividade hidráulica do solo saturado (Ks), carbono orgânico do solo (CO) e grau de floculação (GF) para os sistemas de manejo do solo da microbacia⁽¹⁾.

Sistemas ⁽²⁾	Ds Mg m ⁻³	P _T -----m ³ m ⁻³ -----	M _A m ³ m ⁻³	M _I	Ks mm h ⁻¹	CO g kg ⁻¹	GF %
CN	1,06 (1,08)	0,57 (0,55)	0,09 (0,07)	0,48 (0,48)	128 (96)	30,6 (30,7)	45,3 (50,9)
MN	0,85 (0,89)	0,60 (0,61)	0,21 (0,20)	0,39 (0,39)	410 (390)	51,7 (54,7)	45,7 (48,0)
PC	1,01 (0,99)	0,58 (0,58)	0,22 (0,22)	0,36 (0,36)	301 (272)	19,7 (19,3)	38,5 (36,8)
PD	1,14 (1,16)	0,55 (0,56)	0,18 (0,16)	0,37 (0,36)	263 (251)	21,6 (21,6)	33,6 (34,9)
PM	1,11 (1,13)	0,55 (0,54)	0,16 (0,15)	0,39 (0,39)	274 (351)	19,5 (20,5)	32,2 (33,6)
CV (%)	11,8	7,7	29,0	9,9	52,9	34,7	27,3
Contrastes	Significância das médias dos contrastes ⁽³⁾						
CN-MN x PC-PD-PM	*	ns	**	**	ns	**	**
CN x MN	**	ns	**	**	**	**	ns
PC x PD-PM	**	*	**	ns	ns	ns	ns
PD x PM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

⁽¹⁾Valores entre parênteses representam a mediana dos valores obtidos.

⁽²⁾CN = campo nativo; MN = mata nativa; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; PM = preparo mínimo; e CV = coeficiente de variação.

⁽³⁾* e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade; ns não significativo.

Na Tabela 6 estão apresentados os coeficientes de correlação da densidade do solo com as demais propriedades físico-hídricas do solo. O aumento da densidade do solo aumentou a retenção de água na capacidade de campo ($r=0,31$) e no ponto de murcha permanente ($r=0,25$). A relação da densidade do solo com o PMP não tem muito sentido, tendo em vista que a retenção de água é realizada em amostras de solo com estrutura não preservada.

O aumento da densidade afetou negativamente a porosidade total, a macroporosidade, o teor de carbono orgânico, o grau de floculação, a permeabilidade ao ar e a condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 6). Esses resultados concordam com os de Hakansson et al. (1988), em que os efeitos da compactação do solo foram notados na densidade, na porosidade total e no tamanho e continuidade dos poros. O mesmo autor ainda cita que a compactação comprometeu o movimento e o armazenamento de água, ar e calor, exercendo efeito sobre o crescimento e a produtividade das culturas.

Tabela 6 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre propriedades físico-hídricas do solo e densidade do solo (D_s), porosidade total (P_T), macroporosidade (M_A), microporosidade (M_I) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_s).

Variável	D_s	P_T	M_A	M_I	K_s	CO
Umidade de saturação	-0,68** ⁽¹⁾	0,95**	0,58**	0,17	0,45**	0,21
Umidade a 1 kPa	0,07	0,25*	-0,41**	0,77**	-0,49**	0,04
Umidade a 6 kPa	0,19	0,02	-0,75**	0,96**	-0,54**	0,21
Umidade a 10 kPa	0,31*	-0,04	-0,74**	0,90**	-0,56**	0,17
Umidade a 500 kPa	0,09	-0,16	-0,09	0,00	-0,05	0,04
Umidade a 1000 kPa	0,24	-0,28*	-0,22	0,07	-0,13	0,08
Umidade a 1500 kPa	0,25*	-0,26*	-0,22	0,08	-0,13	0,12
Água disponível	0,12	0,12	-0,49**	0,71**	-0,40**	0,09
Permeabilidade ao ar em 1 kPa	-0,67**	0,54**	0,73**	-0,44**	0,88*	0,22
Permeabilidade ao ar em 6 kPa	-0,66**	0,56**	0,85**	-0,56**	0,85**	0,09
Permeabilidade ao ar em 10 kPa	-0,67**	0,57**	0,82**	-0,52**	0,84**	0,08
Carbono orgânico	-0,38**	0,33**	-0,02	0,32*	0,35**	1,00
Grau de dispersão	0,33**	-0,22	-0,05	-0,12	0,01	-0,06
Grau de floculação	-0,33**	0,32*	0,07	0,19	0,10	0,37**
Estabilidade de agregados	-0,19	0,23	-0,02	0,21	0,30*	0,74**
Porosidade total	-0,81**	1,00	0,63**	0,13	0,52**	0,33**
Macroporosidade	-0,62**	0,63**	1,00	-0,68**	0,74**	-0,02
Microporosidade	0,06	0,13	-0,68**	1,00	-0,45**	0,32*
Condutividade hidráulica do solo saturado	-0,62**	0,52**	0,74**	-0,45**	1,00	0,35**

⁽¹⁾ * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade.

4.1.3 Porosidade total, macro e microporosidade

Com os valores apresentados na Tabela 5, observa-se que as áreas sob PD e PM não apresentaram diferenças significativas quanto à porosidade total, macroporosidade e microporosidade. A não diferenciação dessas propriedades para os sistemas PD e PM pode estar relacionada à densidade do solo, que também não apresentou diferenças significativas.

Os solos sob campo nativo tiveram menor macroporosidade e maior microporosidade em relação aos solos sob mata nativa, enquanto que a porosidade total foi semelhante (Tabela 5). O valor de macroporosidade nas áreas de campo nativo é inferior ao limite crítico de 10% proposto por Reynolds et al. (1992). O valor

restritivo de macroporosidade pode ser consequência do pisoteio animal, o qual causa compactação em camadas superficiais do solo e degrada a estrutura.

A porosidade total foi semelhante para as áreas cultivadas e não cultivadas (Tabela 5). Apesar de as áreas sob mata nativa terem macro e microporosidade semelhante às áreas sob PC, PD e PM, o contraste entre áreas cultivadas e não cultivadas foi significativo para essas variáveis, indicando que os sistemas cultivados favoreceram o aumento da macroporosidade. Porém, a significância do contraste se deve à baixa macroporosidade dos solos sob campo nativo, comparada à do solo sob mata nativa. O que se espera é que áreas não cultivadas apresentem maior volume de macroporos que áreas cultivadas, como é o caso de estudo desenvolvido por Albuquerque et al. (2001). Com exceção das áreas sob campo nativo, os demais sistemas de manejo não apresentam limitações às plantas quanto à macroporosidade, o que possibilita boa entrada de ar no perfil do solo.

Deve-se ressaltar que o fluxo de gases e o movimento de água no solo estão intimamente relacionados ao volume de macroporos. Em outras palavras, a oxigenação radicular e a capacidade de infiltração e redistribuição de água no perfil dependem da capacidade do solo em conduzir ar e água, o que está ligado à macroporosidade. Sua contribuição efetiva nesses processos, nesses casos, depende, além da quantidade, da sua continuidade em profundidade e da abertura à superfície.

Em decorrência da maior densidade, as áreas sob manejo conservacionista tiveram diminuição da porosidade total e da macroporosidade, enquanto que a microporosidade foi semelhante (Tabela 5). Na Tabela 6, verifica-se a forte correlação da densidade do solo com a porosidade total ($r=-0,81$) e com a macroporosidade ($-0,62$).

Na mesma tabela, verifica-se ainda o efeito positivo da macroporosidade e da porosidade total no fluxo de água (K_s) e ar (K_a) do solo, enquanto que o efeito da microporosidade foi contrário. O volume de microporos esteve altamente correlacionado com a disponibilidade e a retenção de água nas tensões de 1, 6 e 10 kPa, além do teor de carbono orgânico (Tabela 6).

4.1.4 Condutividade hidráulica do solo saturado

A variabilidade da condutividade hidráulica do solo saturado, avaliada pelo coeficiente de variação, foi alta (53%) (Tabela 5). A alta variabilidade dos dados de K_s não possibilita, muitas vezes, a diferenciação estatística entre tratamentos (LAL, 1999). Em determinações de laboratório, Lima et al. (2006) verificaram coeficiente de variação entre 112 e 248%; Genro Junior (2002) e Abreu et al. (2004) obtiveram, respectivamente, um coeficiente de variação de 104% e 53% para a K_s obtida no campo; Queiroz (1995) verificou coeficiente de variação para K_s de 100 a 200%; Azevedo (2004), em solo sob pastagem, encontrou 226%; e, em alguns casos, o coeficiente de variação pode chegar a 300% em solos argilosos (ELRICK; REYNOLDS, 1992). Souza; Alves (2003) atribuíram os altos valores de coeficientes de variação de K_s ao efeito local, em consequência da alta variabilidade espacial dos solos, típica das propriedades de movimentação tridimensional da água.

Os elevados valores de porosidade total e macroporosidade aumentaram a K_s para todos os sistemas de manejo, exceto para o campo nativo, que obteve o menor valor de K_s (140 mm h^{-1}), provavelmente pelo menor volume de macroporos. A K_s foi superior em áreas de mata nativa em relação ao campo nativo. Para os demais contrastes não houve diferenças.

O meio poroso determinou valores maiores de K_s para as áreas sob PD, PM, PC e MN, comparadas àquelas sob CN. Em CN, a redução da macroporosidade pode explicar os menores valores da condutividade hidráulica para esse sistema de manejo, tendo em vista que a correlação entre essas duas variáveis é altamente significativa ($r=0,74$) (Tabela 6). A diminuição da macroporosidade, provocada pela compactação dos agregados na camada 0-10 cm, foi verificada por Roth et al. (1991) nos sistemas de preparo convencional e direto, em relação à mata nativa. Em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto, Albuquerque et al. (2001) também verificaram associação da macroporosidade com a condutividade hidráulica do solo saturado, em um Nitossolo com 55 g kg^{-1} de argila. Esses autores verificaram valores de K_s , avaliada em laboratório, 38 vezes menor no CN que em área de mata. A relação entre K_s e macroporosidade na camada superficial do solo foi verificada também por Ribeiro et al. (2007), Silva et al. (2005) e Kaiser (2006).

Como pode ser visualizado na Tabela 6, a K_s tem relação com o espaço poroso do solo (P_T , M_A e M_I). A microporosidade e a densidade do solo afetaram negativamente a K_s , enquanto que a macroporosidade e a porosidade total têm relação positiva com a K_s . Ainda, a melhoria na estabilidade de agregados decorrente da maior quantidade de carbono orgânico, proporcionou maiores valores de K_s .

A relação das variáveis macroporosidade, microporosidade e densidade do solo com a K_s também foi verificada em estudo desenvolvido por Sampaio et al. (2006). Estudando Latossolo e Argissolo, Suzuki et al. (2007) observaram relações entre espaço poroso e K_s . Segundo esses autores, o aumento do grau de compactação do solo provoca redução da macroporosidade e decréscimo linear nos valores de condutividade hidráulica do solo saturado. Segundo Boone; Veen (1994), os macroporos são os principais responsáveis pelo fluxo de água no solo.

A infiltração de água no solo, bem como a redistribuição e troca gasosa, dependem da condutividade hidráulica do solo saturado (HILLEL, 1998). Os problemas às plantas podem aparecer em períodos de chuvas intensas, onde os solos com estrutura compactada podem ter dificuldades em proporcionar trocas gasosas entre o solo e a atmosfera e, em períodos secos, em que a penetração de raízes é dificultada (BRAIDA, 2004). Lanzasova (2007) verificou que a compactação na camada superficial do solo (0-10 cm) causada pelo pisoteio animal, diminuiu a infiltração de água.

4.1.5 Carbono orgânico e grau de floculação

O CO foi semelhante para os tratamentos em área cultivada. Esse resultado pode estar relacionado às diferenças no período de adoção dos sistemas de manejo, pois a introdução de práticas conservacionistas na microbacia foi iniciada em 2003, existindo grande variação de valores dentro de um mesmo sistema de manejo do solo. Mello (2006), estudando áreas com maior tempo sob determinado sistema de manejo, verificou que as perdas de carbono orgânico foram maiores no sistema convencional, seguido pelo preparo mínimo e plantio direto.

As áreas cultivadas apresentaram menor teor de CO que as não cultivadas. Na mata nativa o CO foi superior que no CN. A redução do teor de carbono orgânico nos solos cultivados foi em torno de 60% em relação aos solos sob mata nativa e 34% em relação aos solos sob campo nativo. A redução do teor de CO em solos cultivados reflete a degradação da estrutura do solo, consequência do menor retorno e maior taxa de decomposição do material orgânico (SANCHEZ, 1981).

As práticas conservacionistas não foram eficientes em aumentar o teor de carbono orgânico no solo até níveis próximos aos da mata nativa ou campo nativo. Esse fato pode estar ligado ao revolvimento do solo no momento da implantação dos cultivos de inverno e à baixa proteção da matéria orgânica pelos agregados desses solos. Esses resultados corroboram os valores encontrados por Bayer et al. (2000). Por outro lado, solos não revolvidos, como aqueles submetidos ao sistema de semeadura direta, apresentaram efeito positivo no acúmulo de matéria orgânica (BAYER et al., 2000; CASTRO FILHO et al., 2002), devido à agregação e ao microclima formado nesse sistema de manejo.

Em estudo de longo tempo realizado por Silva et al. (2005), os sistemas conservacionistas afetaram o teor de CO na camada superficial (0-2,5 cm) após 17 anos de implantação. O PD recuperou os teores de CO nessa camada ($19,5 \text{ g kg}^{-1}$) a valores semelhantes do solo em CN ($18,9 \text{ g kg}^{-1}$) e superior ao PC ($13,1 \text{ g kg}^{-1}$).

O aumento do teor de carbono orgânico (CO) acompanhou a diminuição da densidade do solo, com correlação negativa significativa ($r=-0,38$) (Tabela 6). O carbono orgânico esteve correlacionado positivamente com o grau de flocculação ($r=0,37$) e a estabilidade de agregados ($r=0,74$), melhorando a porosidade (total, macro e micro) do solo, bem como a Ks. A forte relação entre carbono orgânico e estabilidade de agregados também foi verificada por outros autores (ROS et al., 1997; SILVA, 2006; WOHLEMBERG et al., 2004), sendo maior em PD que em PC. Em estudo desenvolvido por Silva et al. (2006), a estabilidade de agregados, avaliada pelo diâmetro médio ponderado úmido, foi maior em campo nativo, seguido pelo plantio direto e preparo reduzido. Sistemas de manejo com vegetação permanente apresentam grande efeito na agregação do solo. Para Silva; Mielniczuk (1997), as raízes exercem grande influência na formação e estabilidade dos agregados do solo, apesar de representarem uma pequena fração dos constituintes orgânicos.

Quanto ao grau de floculação, o cultivo do solo resultou em menores valores que as áreas não cultivadas, enquanto que os demais contrastes não apresentaram diferença. Esses resultados refletem o efeito negativo do uso do solo na floculação das partículas de argila. Em horizontes superficiais de Cambissolo Háplico e Latossolo Vermelho-Amarelo, Mota et al. (2008) verificaram menor grau de floculação devido ao uso e manejo do solo, que provocam a ruptura dos agregados com redução à forma de grãos individualizados dispersando os coloides.

Além do manejo do solo, atributos químicos podem ter relação com a dispersão dos agregados do solo, como é o caso do sódio, que possui elevado raio iônico. Segundo Mello (2006), as áreas cultivadas dessa microbacia possuem elevada concentração de sódio na solução do solo, derivada da aplicação de salitre do Chile na cultura do fumo. Essa autora verificou maior concentração de sódio em sistemas de preparo convencional, seguido do cultivo mínimo e plantio direto.

4.1.6 Retenção de água no solo

A umidade de saturação do solo foi igual entre os sistemas de manejo do solo, variando de 0,55 no PD e PM a 0,58 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na MN (Tabela 7).

A retenção de água nas tensões de 1, 6 e 10 kPa foi maior nos sistemas não cultivados, e maior no CN em relação à MN (Tabela 7). A maior retenção de água nos solos não cultivados para as tensões de 1, 6 e 10 kPa pode estar relacionada à influência do manejo na estrutura do solo, onde a microporosidade e o teor de carbono orgânico foram maiores que nos solos cultivados (Tabela 5). Porém, observando-se os valores de coeficiente de correlação linear (Tabela 8), nota-se que a microporosidade teve relação com a retenção de água nessas tensões e o teor de carbono orgânico não.

Tabela 7 – Umidade volumétrica do solo nas tensões de 0 kPa (θ_{sat}), 1 kPa (θ_1), 6 kPa (θ_6), 10 kPa (θ_{10}), 500 kPa (θ_{500}), 1000 kPa (θ_{1000}), 1500 kPa (θ_{1500}) e água disponível (AD) para os sistemas de manejo do solo da microbacia⁽¹⁾.

Sistemas ⁽²⁾	θ_{sat}	θ_1	θ_6	θ_{10}	θ_{500}	θ_{1000}	θ_{1500}	AD
	-----m ³ m ⁻³ -----							
CN	0,57 (0,55)	0,52 (0,52)	0,47 (0,48)	0,44 (0,44)	0,26 (0,25)	0,20 (0,20)	0,16 (0,15)	0,28 (0,27)
MN	0,58 (0,57)	0,45 (0,46)	0,37 (0,38)	0,33 (0,34)	0,27 (0,26)	0,21 (0,22)	0,19 (0,20)	0,15 (0,13)
PC	0,57 (0,58)	0,46 (0,46)	0,36 (0,36)	0,33 (0,33)	0,26 (0,26)	0,20 (0,19)	0,17 (0,16)	0,16 (0,17)
PD	0,55 (0,56)	0,45 (0,44)	0,37 (0,36)	0,34 (0,35)	0,27 (0,26)	0,21 (0,21)	0,17 (0,18)	0,17 (0,16)
PM	0,55 (0,54)	0,46 (0,46)	0,39 (0,39)	0,36 (0,37)	0,27 (0,28)	0,19 (0,20)	0,15 (0,14)	0,21 (0,21)
CV (%)	7,3	8,5	10,6	11,6	18,5	16,7	20,4	27,1
Contrastes		Significância das médias dos contrastes ⁽³⁾						
CN-MN x PC-PD-PM	ns	**	**	**	ns	ns	ns	**
CN x MN	ns	**	**	**	ns	ns	ns	**
PC x PD-PM	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	*
PD x PM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

⁽¹⁾Valores entre parênteses representam a mediana dos valores obtidos.

⁽²⁾ CN = campo nativo; MN = mata nativa; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; PM = preparo mínimo; e CV = coeficiente de variação.

⁽³⁾ * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade; ^{ns}não significativo.

Em estudo desenvolvido por Bertol; Santos (1995), a maior retenção de água esteve associada à diminuição da macroporosidade em solos compactados pelo uso agrícola, associado, muitas vezes, ao aumento da microporosidade. A diminuição da macroporosidade também foi a causa da maior retenção de água num Vertissolo sob pisoteio animal (20 e 40 animais ha⁻¹) (PÉREZ GOMAR, 2005). As mudanças negativas na retenção de água de solos sob pousio e cultivo, em relação à mata nativa, foram atribuídos por Machado et al. (2008) à redução nos teores de CO e ao aumento na densidade do solo, caracterizando o comprometimento da qualidade física e hídrica do solo.

Os sistemas de manejo com cultivo do solo tiveram semelhante retenção de água nas tensões de 1 e 6 kPa, mas diferiram para a tensão de 10 kPa, onde a retenção foi maior nas áreas com práticas conservacionistas (Tabela 7). A umidade retida na tensão de 10 kPa representa a capacidade de campo e é muito importante para a disponibilidade de água às plantas. Nesse sentido, os sistemas

conservacionistas foram mais eficientes em aumentar a retenção de água na capacidade de campo, proporcionando maior quantidade de água disponível.

Tabela 8 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as propriedades físico-hídricas do solo e a umidade volumétrica nas tensões 0 kPa (θ_{sat}), 1 kPa (θ_1), 6 kPa (θ_6), 10 kPa (θ_{10}), 500 kPa (θ_{500}), 1000 kPa (θ_{1000}), 1500 kPa (θ_{1500}) e água disponível (AD).

Variável	θ_{sat}	θ_1	θ_6	θ_{10}	θ_{500}	θ_{1000}	θ_{1500}	AD
Cascalho	0,17 ⁽²⁾	-0,18	-0,2	-0,26*	0,08	-0,06	-0,18	-0,13
Areia total	-0,07	0,14	0,04	-0,03	-0,12	-0,15	-0,15	0,05
Areia grossa	-0,18	-0,08	-0,09	-0,09	-0,09	-0,02	0,05	-0,11
Areia fina	0,04	0,17	0,05	-0,04	-0,07	-0,15	-0,19	0,07
Silte	0,23	0,17	0,09	0,04	0,12	0,00	-0,11	0,08
Argila	-0,14	-0,24*	-0,04	0,07	-0,01	0,13	0,23	-0,05
Porosidade total	0,95**	0,25*	0,02	-0,04	-0,16	-0,28*	-0,26*	0,12
Macroporosidade	0,58**	-0,41**	-0,75**	-0,74**	-0,09	-0,22	-0,22	-0,49**
Microporosidade	0,17	0,77**	0,96**	0,90**	0,00	0,07	0,08	0,71**
Permeabilidade ao ar em 1 kPa	0,43**	-0,51**	-0,53**	-0,58**	-0,12	-0,29*	-0,31**	-0,31*
Permeabilidade ao ar em 6 kPa	0,50**	-0,47**	-0,62**	-0,68**	-0,06	-0,25*	-0,30*	-0,40**
Permeabilidade ao ar em 10 kPa	0,51**	-0,43**	-0,59**	-0,66**	-0,07	-0,27*	-0,32**	-0,37**
Ks ⁽¹⁾	0,45**	-0,49**	-0,54**	-0,56**	-0,05	-0,13	-0,13	-0,40**
Carbono orgânico	0,21	0,04	0,21	0,17	0,04	0,08	0,12	0,09
Grau de flocculação	0,29*	0,22	0,15	0,12	0,06	0,14	0,15	0,02
EA ⁽¹⁾	0,17	0,08	0,17	0,18	-0,02	0,05	0,13	0,08

⁽¹⁾Ks = condutividade hidráulica do solo saturado; e EA = estabilidade de agregados.

⁽²⁾* e **significativo a 5% e 1% de probabilidade.

Nas tensões de 500, 1000 e 1500 kPa, os sistemas de manejo não diferiram quanto à retenção de água (Tabela 7) e não esteve associada à composição granulométrica e ao teor de carbono orgânico do solo (Tabela 8). Esperava-se que a retenção de água nas tensões maiores (θ_{500} , θ_{1000} e θ_{1500}) fosse afetada pela textura e pelo teor de carbono orgânico do solo. Como a composição granulométrica foi homogênea para todos os sistemas de manejo, não houve diferenciação na retenção de água. Flores et al. (2008) visualizaram diferenças na retenção de água entre áreas cultivadas (preparo convencional e plantio direto) e não cultivadas (campo pastejado e mata nativa) para todas as tensões estudadas (0, 1, 6, 33, 100, 400 e 1500 kPa). Por outro lado, no estudo desenvolvido por Silva et al. (2005) a retenção de água sob diferentes tensões não foi influenciada pelos tratamentos campo nativo, preparo convencional, preparo reduzido e semeadura direta.

4.1.7 Disponibilidade de água

A disponibilidade de água foi maior em áreas de campo nativo ($0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e menor em áreas de mata nativa ($0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), com diferença estatística entre esses valores (Tabela 7). As áreas com práticas conservacionistas aumentaram a fração de água disponível em relação ao PC, e o cultivo do solo reduziu a disponibilidade de água.

Como a retenção de água na tensão de 1500 kPa (PMP) foi semelhante para os sistemas de manejo, o que vai determinar a quantidade de água disponível é o volume na tensão de 10 kPa (CC). Nessa tensão, a maior retenção foi verificada em áreas sob campo nativo, conseqüentemente a água disponível foi maior nos solos sob esse sistema de manejo. A maior retenção de água na CC pode ter sido em função da maior microporosidade no CN. A macroporosidade no PC pode ter diminuído a disponibilidade de água desse sistema, quando comparado aos sistemas conservacionistas PD e PM. A relação da água disponível com a macro e a microporosidade ($r=-0,49$ e $0,71$, respectivamente) está apresentada na Tabela 8. Estudando sistemas de preparo do solo, Silva et al. (2005) não verificaram diferenças na disponibilidade de água nos sistemas PC, PM, PD e CN.

A compactação do solo reduz a porosidade total em detrimento dos macroporos. Nesse caso, a maior retenção de água no solo reduz a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo saturado (REICHERT et al., 2007, 2009).

4.1.8 Permeabilidade ao ar

A permeabilidade ao ar (K_a) esteve diretamente relacionada com a tensão da água no solo (Tabela 9), em função do esvaziamento de poros.

Tabela 9 – Permeabilidade do solo ao ar nas tensões de 1 (Ka₁), 6 (Ka₆) e 10 kPa (Ka₁₀) para os sistemas de manejo do solo da microbacia⁽¹⁾.

Sistemas ⁽²⁾	Ka ₁	Ka ₆	Ka ₁₀
	-----mm h ⁻¹ -----		
CN	40 (24)	76 (64)	105 (77)
MN	262 (150)	535 (253)	655 (351)
PC	174 (130)	506 (307)	651 (401)
PD	146 (65)	337 (193)	399 (241)
PM	125 (154)	302 (245)	375 (279)
CV (%)	62,5	19,7	18,6
Contrastes	Significância das médias dos contrastes ⁽³⁾		
CN-MN x PC-PD-PM	ns	*	ns
CN x MN	ns	**	**
PC x PD-PM	ns	ns	ns
PD x PM	ns	ns	ns

⁽¹⁾Valores entre parênteses representam a mediana dos valores obtidos.

⁽²⁾CN = campo nativo; MN = mata nativa; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; PM = preparo mínimo; e CV = coeficiente de variação.

⁽³⁾* e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade; ns não significativo.

Os sistemas de manejo foram semelhantes quanto aos valores de Ka para a tensão de 1 kPa (Tabela 9). Entretanto, nas tensões 6 e 10 kPa os solos sob mata nativa foram mais permeáveis que o campo nativo, e as áreas cultivadas são semelhantes entre si. Devido ao comprometimento da estrutura, verificado pela densidade e porosidade, os solos sob campo nativo refletiram menores valores de Ka que solos sob MN. As diferenças de macroporosidade verificadas entre os sistemas conservacionistas e o convencional não influenciaram na Ka.

O contraste entre áreas cultivadas e não cultivadas somente foi significativo na tensão de 6 kPa, em que a Ka foi maior em áreas cultivadas. Esse contraste somente foi significativo porque o tratamento campo nativo apresentou valores de Ka bem menores que os outros sistemas, dando a impressão que a MN também apresenta estrutura degradada.

Na Tabela 10 estão os coeficientes de correlação de Pearson referentes à permeabilidade ao ar. Verifica-se que o teor de cascalho tem correlação positiva com a permeabilidade ao ar. Como visto anteriormente, o cascalho aumenta a macroporosidade e diminui a densidade da fração terra fina do solo, proporcionando ao solo maior capacidade de condução de água e ar.

Tabela 10 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as propriedades físico-hídricas e a permeabilidade do solo ao ar nas tensões de 1 (Ka₁), 6 (Ka₆), 10 kPa (Ka₁₀), grau de flocculação (GF) e estabilidade de agregados (EA).

Variável	Ka ₁	Ka ₆	Ka ₁₀	GF	EA
Cascalho	0,31 ^{*(1)}	0,37**	0,37**	-0,02	-0,13
Areia total	-0,10	-0,04	-0,02	-0,24*	-0,18
Areia grossa	-0,04	-0,06	-0,04	-0,31*	0,04
Areia fina	-0,04	0,01	0,02	0,05	-0,33**
Silte	0,09	0,08	0,09	0,33**	-0,11
Argila	-0,02	-0,05	-0,08	-0,17	0,35**
Porosidade total	0,54**	0,56**	0,57**	0,32*	0,23
Macroporosidade	0,73**	0,85**	0,82**	0,07	-0,02
Microporosidade	-0,44**	-0,56**	-0,52**	0,19	0,21
Umidade de saturação	0,43**	0,50**	0,51**	0,29*	0,17
Umidade a 1 kPa	-0,51**	-0,47**	-0,43**	0,22	0,08
Umidade a 6 kPa	-0,53**	-0,62**	-0,59**	0,15	0,17
Umidade a 10 kPa	-0,58**	-0,68**	-0,66**	0,12	0,18
Umidade a 500 kPa	-0,12	-0,06	-0,07	0,06	-0,02
Umidade a 1000 kPa	-0,29*	-0,25*	-0,27*	0,14	0,05
Umidade a 1500 kPa	-0,31**	-0,30*	-0,32**	0,15	0,13
Água disponível	-0,31*	-0,40**	-0,37**	0,02	0,08
Condutividade hidráulica do solo saturado	0,88*	0,85**	0,84**	0,10	0,30*
Carbono orgânico	0,22	0,09	0,08	0,37**	0,74**
Grau de dispersão	0,00	0,01	-0,02	-0,57**	0,02
Grau de flocculação	0,01	-0,02	0,01	1,00	0,37**
Estabilidade de agregados	0,15	-0,01	-0,05	0,37**	1,00

(1) * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade.

A Ka teve elevada variabilidade amostral na tensão de 1 kPa. Provavelmente isso se deve à variabilidade do volume de macroporos e, também, da continuidade dos poros. Conforme Schjonning et al. (2005), a permeabilidade do solo ao ar é exponencialmente relacionada com a macroporosidade. A permeabilidade além de ser dependente da porosidade e do teor de água do solo, também é dependente da continuidade de poros, pois poros descontínuos não possuem a capacidade de realizar a troca gasosa entre o solo e a atmosfera.

A permeabilidade ao ar é fortemente governada pela estrutura do solo (BALL; SMITH, 1991; MOLDRUP et al., 2003). O estudo com estrutura do solo requer um conhecimento da relação entre a permeabilidade ao ar e a porosidade de aeração. De acordo com Ball; Smith (1991), ambas não são bem relacionadas porque a

permeabilidade ao ar é muito sensível aos macroporos e galerias formadas pela atividade biológica.

Estudando sistemas de manejo em Latossolo Vermelho, Fontanela (2008) observou que áreas sem controle do tráfego apresentaram alterações na continuidade e distribuição de tamanho de poros em relação a áreas com controle de tráfego, com redução da permeabilidade ao ar. A associação entre K_a e macroporosidade foi verificada por Corcini (2008). Esse autor constatou o incremento de K_a foi maior quando a tensão da água nas amostras variou de 1 a 6 kPa.

4.1.9 Estabilidade de agregados e propriedades da fração 1,0-2,0 mm de solo

A composição granulométrica da fração de solo de tamanho entre 1,0 e 2,0 mm, utilizada para o cálculo de estabilidade de agregados, foi semelhante à composição granulométrica da fração menor que 2,0 mm (Tabela 11). Houve relação negativa e significativa entre areia grossa e o grau de floculação (Tabela 12). Portanto, para os agregados da classe de 1,0 a 2,0 mm de diâmetro, o grau de floculação tende a ser menor que para a classe de agregados menores que 2,0 mm.

O comportamento dos valores de carbono orgânico do solo e do grau de floculação para as partículas de 1,0-2,0 mm de diâmetro foi semelhante aos contrastes para a classe de solo menor que 2,0 mm. No entanto, os valores são menores para essas duas variáveis. Os contrastes serão discutidos a seguir.

O teor de CO foi reduzido nos sistemas cultivados (Tabela 13) em função do manejo do solo que implica em menor retorno de material vegetal à superfície do solo e maior taxa de decomposição da matéria orgânica. Segundo Wendling et al. (2005), a redução do conteúdo de carbono orgânico total e dos índices de agregação em solos cultivados se deve ao revolvimento do solo, que favorece a oxidação da matéria orgânica. Ainda, Bayer et al. (2000) argumentam que a incorporação dos resíduos vegetais, a maior disponibilidade de oxigênio, a maior temperatura e a menor proteção física intra-agregados reduz gradativamente o estoque de carbono orgânico do solo.

Tabela 11 – Composição granulométrica do solo na fração de 1,0-2,0 mm de diâmetro para os sistemas de manejo do solo da microbacia⁽¹⁾.

Sistemas ⁽²⁾	Areia			Silte	Argila
	Total ⁽³⁾	Grossa	Fina		
-----g kg ⁻¹ -----					
CN	299 (315)	154 (146)	145 (169)	476 (500)	225 (248)
MN	288 (267)	165 (145)	123 (106)	435 (481)	277 (252)
PC	319 (318)	182 (163)	136 (117)	425 (423)	257 (247)
PD	279 (259)	166 (154)	113 (92)	403 (406)	318 (305)
PM	274 (254)	171 (143)	103 (106)	434 (460)	292 (271)
CV (%)	28,8	52,6	9,4	20,2	31,5
Contrastes Significância das médias dos contrastes ⁽²⁾					
CN-MN x PC-PD-PM	ns	ns	ns	ns	ns
CN x MN	ns	ns	ns	ns	ns
PC x PD-PM	ns	ns	ns	ns	ns
PD x PM	ns	ns	ns	ns	ns

⁽¹⁾Valores entre parênteses representam a mediana dos valores obtidos.

⁽²⁾CN = campo nativo; MN = mata nativa; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; PM = preparo mínimo; e CV = coeficiente de variação.

⁽³⁾Areia total (2,0-0,05 mm); areia grossa (2,0-0,2 mm); areia fina (0,2-0,05 mm); silte (0,05-0,002 mm); e argila (<0,002 mm).

Tabela 12 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre variáveis físico-hídricas do solo na fração 1,0-2,0 mm de diâmetro e estabilidade de agregados (EA), carbono orgânico (CO₁₋₂), grau de floculação (GF₁₋₂) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ks).

Variável ⁽¹⁾	EA	CO ₁₋₂	GF ₁₋₂	Ks
Areia total	-0,17 ⁽²⁾	-0,19	-0,27*	-0,15
Areia grossa	-0,13	-0,18	-0,33**	-0,10
Areia fina	-0,24	-0,23*	0,06	-0,12
Silte	-0,07	0,08	0,32**	0,06
Argila	0,34**	0,25*	-0,06	0,13
Estabilidade de agregados	1,00	0,73**	0,35**	0,30*
Carbono orgânico	0,73**	1,00	0,43**	0,35**
Grau de floculação	0,35**	0,43**	1,00	0,15

⁽¹⁾variáveis determinadas na fração do solo de 1,0 a 2,0 mm de diâmetro.

⁽²⁾* e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade.

Tabela 13 – Estabilidade de agregados (EA), carbono orgânico (CO) e grau de floculação (GF) da fração 1,0-2,0 mm para os sistemas de manejo do solo da microbacia⁽¹⁾.

Sistemas ⁽²⁾	EA %	CO ₁₋₂ g kg ⁻¹	GF ₁₋₂ %
CN	95,0 (95,6)	26,4 (27,9)	42,9 (48,1)
MN	93,4 (93,8)	46,1 (44,3)	38,9 (40,2)
PC	85,7 (87,2)	17,0 (16,8)	30,0 (28,2)
PD	91,0 (91,9)	19,6 (20,5)	29,7 (28,3)
PM	83,6 (83,2)	18,4 (19,7)	29,9 (29,1)
CV (%)	6,8	35,2	14,3
Contrastes	Significância das médias dos contrastes ⁽³⁾		
CN-MN x PC-PD-PM	**	**	**
CN x MN	ns	**	ns
PC x PD-PM	ns	ns	ns
PD x PM	**	ns	ns

⁽¹⁾Valores entre parênteses representam a mediana dos valores obtidos.

⁽²⁾CN = campo nativo; MN = mata nativa; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; PM = preparo mínimo; e CV = coeficiente de variação.

⁽³⁾* e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade; ^{ns}não significativo.

Novamente, o teor de CO foi maior nos solos sob mata nativa, em decorrência da grande quantidade de material vegetal depositado na superfície do solo e da ausência de revolvimento. Em relação à mata nativa, o uso do solo com campo nativo reduziu 43% do total carbono orgânico, enquanto que os sistemas cultivados reduziram o CO em 60%.

Nas áreas cultivadas, os teores de CO são semelhantes (Tabela 13), evidenciando que as práticas conservacionistas não foram eficientes em aumentar o teor de CO no solo. Talvez, o revolvimento do solo para implantação da cultura do fumo não permite a estabilização de agregados pela matéria orgânica adicionada no cultivo de inverno, o que deixa o CO desprotegido.

Em relação à proteção do CO, verifica-se, na Tabela 12, que essa propriedade esteve correlacionada significativa e positivamente com o teor de argila, melhorando o grau de floculação e a estabilidade de agregados. Por outro lado, o efeito da areia fina sobre o teor de carbono orgânico do solo foi negativo.

Alguns autores encontraram resultados diferentes em relação ao teor de CO em sistemas com práticas conservacionistas e convencionais. A agregação e as alterações no microclima em solos sob semeadura direta contribuíram para o acúmulo de matéria orgânica em solos não revolvidos, como foi verificado por diversos autores (BAYER et al., 2000; CASTRO FILHO et al., 2002). Dependendo do tipo de solo e condições climáticas, sistemas de manejo que adicionaram grande quantidade de resíduos vegetais ao solo e perturbaram pouco a estrutura do solo, aumentam o teor de CO e a estabilidade de agregados (COSTA et al., 2003). As práticas conservacionistas foram mais eficientes em aumentar o teor de carbono orgânico no solo em estudo desenvolvido por Mello (2006) na microbacia Cândido Brum. Segundo essa autora, o menor teor de CO em áreas sob preparo convencional deve-se ao maior teor de sódio na solução do solo, o qual dispersa os agregados e torna o CO suscetível ao transporte por escoamento.

O maior teor de carbono orgânico na fração de solo de 1,0 a 2,0 mm nas áreas não cultivadas pode estar associado aos maiores valores de grau de floculação da argila. O cultivo do solo reduziu o grau de floculação em relação aos solos não cultivados, enquanto que os demais contrastes não foram significativos. Nota-se o efeito negativo do cultivo do solo na floculação das partículas de argila (Tabela 13). O uso do solo fraciona os agregados, dificultando a ação da matéria orgânica na formação e estabilização de agregados, o que torna o solo suscetível à erosão em função das partículas de argila dispersas. Ainda, a maior concentração de sódio na solução do solo para aquelas áreas cultivadas, verificada por Mello (2006) nessa mesma área, pode ter influenciado na dispersão do solo e consequente redução do grau de floculação e perda de carbono orgânico em relação às áreas não cultivadas.

A estabilidade de agregados (EA) foi maior em CN (95,0) e menor em PM (83,6). As áreas sob campo nativo e mata nativa tiveram EA semelhantes. O mesmo foi observado para os sistemas de manejo conservacionista e convencional (Tabela 13). A maior estabilidade de agregados em solos sob campo nativo pode estar relacionada à cobertura vegetal, composta principalmente por gramíneas perenes. Essas plantas possuem sistema radicular fasciculado, abundante e bem distribuído, o que favorece a agregação entre partículas minerais e unidades de agregados, além de ser muito eficiente na estabilização de agregados (SILVA; MIELNICZUK, 1997; WOHLBERG et al., 2004). Em solos sob mata nativa, a contínua adição de

material orgânico associado ao sistema radicular da floresta tem efeito na estabilidade dos agregados.

A semelhança de EA para as áreas sob PC, PD e PM não era esperada (Tabela 13). Essa semelhança pode estar relacionada com a dispersão dos valores, devido aos diferentes períodos de adoção dos sistemas de manejo. Em Latossolo Bruno, Costa et al. (2004) encontraram maior estabilidade de agregados, representada pelo diâmetro médio geométrico, em PD do que em PC. A estabilidade foi relacionada com os teores de carbono orgânico total e particulado, concordando com os resultados de Carpenedo; Mielniczuk (1990), que encontraram efeitos semelhantes em Latossolos. A relação de causa e efeito entre carbono e estabilidade de agregados é ressaltada por Six et al. (1999), onde o carbono orgânico afeta diretamente a estabilidade de agregados e esta, por sua vez, oferece maior proteção física à matéria orgânica. Estudando um Argissolo Vermelho-Amarelo, Wohleberg et al. (2004) observaram efeito das culturas na formação e estabilização dos agregados, sendo a estabilidade de agregados maior naqueles sistemas de manejo que aportaram maior quantidade de material orgânico e que cobriam o solo o ano todo. Em estudo desenvolvido por Cogo et al. (2003), o plantio direto aumentou a agregação em relação ao sistema de preparo convencional, o que mostra a importância do não revolvimento em sistemas agrícolas, tornando o solo mais resistente aos processos erosivos.

Os sistemas não cultivados tiveram maior EA que os sistemas cultivados (Tabela 13). A maior quantidade de material vegetal na superfície do solo nos sistemas não cultivados, a ausência de revolvimento e a menor concentração de sódio (MELLO, 2006) possibilitam maior quantidade de ligações eletroquímicas da matéria orgânica com as partículas do solo. Agregados mais estáveis e resistentes resistem à ação de forças externas, como pisoteio de animais, operações mecanizadas e força erosiva da chuva, devendo-se manejar o solo no sentido de melhorar a estabilidade dos agregados.

Resultados semelhantes foram encontrados, em que o cultivo do solo dificultou a ação da matéria orgânica na estabilização dos agregados, inclusive nos sistemas conservacionistas, sendo menor que na mata nativa (COSTA et al., 2003; ALBUQUERQUE et al., 2005) e no campo nativo (CRUZ et al., 2003; SILVA et al., 2006). Com cultivos de trigo e soja, Carpenedo; Mielniczuk (1990) verificaram menor agregação do solo submetido ao preparo convencional em relação à mata nativa.

4.1.10 Tensão de cisalhamento

Na determinação da tensão de cisalhamento em camadas superficiais do solo, o fator que mais influi nos valores é a cobertura vegetal. Portanto, os contrastes foram organizados de maneira que a discussão seja baseada na composição vegetal da superfície do solo, pois em muitos locais a determinação da tensão de cisalhamento não é acompanhada de dados granulométricos e estruturais do solo.

Os maiores valores de tensão ao cisalhamento foram verificados em áreas de campo nativo (35,5 kPa) e os menores valores em áreas revolvidas (RV) (3,0 kPa) (Tabela 14). As áreas revolvidas, em pousio (PS) e com cobertura de inverno (CB) não diferiram entre si, e tiveram valores menores que as áreas de mata nativa e campo nativo. Esse último foi superior à mata nativa.

Tabela 14 – Tensão de cisalhamento do solo e umidade gravimétrica nos diferentes sistemas de manejo do solo da microbacia⁽¹⁾.

Sistemas ⁽²⁾	Tensão de cisalhamento	Umidade gravimétrica
	kPa	g g ⁻¹
CN	35,5 (35,6)	0,44 (0,39)
MN	12,4 (6,8)	0,54 (0,57)
RV	3,0 (2,3)	0,12 (0,11)
CB	7,2 (7,0)	0,23 (0,23)
PS	5,5 (5,3)	0,16 (0,17)
CV (%)	64,3	29,5
Contrastes	Significância das médias dos contrastes ⁽³⁾	
CN-MN x RV-CB-PS	**	**
CN x MN	**	*
RV x CB-PS	ns	**
CB x PS	ns	ns

⁽¹⁾Valores entre parênteses representam a mediana dos valores obtidos.

⁽²⁾CB = cobertura de inverno; CN = campo nativo; MN = mata nativa; RV = revolvido; e PS = pousio.

⁽³⁾* e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade; ^{ns}não significativo.

Usando *torvane*, Vieira et al. (2008) não encontraram diferenças de tensão de cisalhamento em Latossolo Vermelho entre os sistemas de manejo plantio direto e escarificado com controle de tráfego. Usando *vane shear test*, Munkholm et al. (2001) verificaram que o cultivo mínimo elevou os valores de cisalhamento em relação ao preparo convencional. Comportamento semelhante foi encontrado por Schjonning; Rasmussen (2000) e Ball; O`Sullivan (1982).

Em avaliações de laboratório, usando um aparelho de cisalhamento direto, Secco (2003) observou que a coesão teve relação direta com a densidade do solo, e diminuiu com o aumento do teor de água. O efeito da umidade na coesão do solo é comprovado também por Boeni (2000). Gaggero (1998) não observou diferença significativa entre as condições pré e pós-pastejo em um solo Podzólico Vermelho-Escuro. Silva et al. (2004) observaram diferença na resistência ao cisalhamento em um Latossolo Vermelho distrófico, influenciada pelo teor de água, tipo de uso e manejo do solo.

A maior resistência mecânica em solos mantidos em condições naturais, como a mata nativa e campo nativo, deve-se, provavelmente, aos maiores teores de matéria orgânica associado ao modelo de agregação do solo (TISDALL; OADES, 1982). Além disso, o emaranhamento ocasionado pelas raízes (JASTROW et al., 1998) e a presença de ligações físico-químicas (TERZAGHI et al., 1996) presentes em ambientes nativos proporcionam maior agregação do solo e maior resistência mecânica.

Autores como Carpenedo; Mielniczuk (1990), Silva; Mielniczuk (1997) e Wohleberg et al. (2004) ressaltaram a maior eficiência das gramíneas na formação de agregados estáveis. Esse efeito pode ser proporcionado pela liberação de exsudatos orgânicos e pela compressão das partículas unitárias e remoção de água, favorecendo a coesão entre as partículas do solo (SILVA; MIELNICZUK, 1997; SILVA et al., 1998). A grande quantidade de raízes nas gramíneas causa secamento, localizado em torno das mesmas, e atua na aproximação das partículas minerais, por causa da pressão exercida pelo seu avanço, através dos espaços porosos do solo. Esses fatores, associados à liberação de substâncias orgânicas na rizosfera, favorecem a agregação do solo (REINERT, 1993).

As áreas CB e PS aumentaram a umidade gravimétrica em relação às áreas revolvidas. Os solos sob RV tiveram o menor teor de umidade gravimétrica na

camada superficial do solo ($0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Tabela 14). O cultivo do solo reduziu a umidade gravimétrica do solo e a mata nativa foi superior ao campo nativo. A menor cobertura em solos revolvidos fez com que ocorresse maior evaporação da água. A perda de umidade foi reduzida nos sistemas com cobertura anual e pousio. A maior quantidade de material orgânico fez com que a umidade fosse maior em áreas de mata nativa ($0,54 \text{ g g}^{-1}$), seguida pelo campo nativo ($0,44 \text{ g g}^{-1}$).

4.2 Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado

Na Tabela 15 constam os componentes estatísticos da variável K_s . Os coeficientes de assimetria e curtose são utilizados para avaliar se os dados seguem uma distribuição normal. A assimetria é o grau de desvio de uma distribuição, ou seja, se ela está estendendo-se mais para um lado que para o outro. A curtose é uma medida do grau de achatamento da curva de uma distribuição, ou seja, se as distribuições têm picos relativamente altos ou tem topos achatados. Para dados que segue perfeitamente a curva de distribuição normal os valores do coeficiente de simetria e curtose, devem ser zero e três, respectivamente (ROBERTSON, 1998). Os valores mínimos e máximos dos dados também foram obtidos para cada variável, assim como foram feitos histogramas para verificar a natureza da distribuição.

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W) (Tabela 15) e o histograma de distribuição (Figura 7a) indicam que a K_s tem tendência à distribuição não normal. Porém, sua transformação em raiz quadrada (Figura 7b), ou qualquer outro tipo de transformação, não possibilitou melhores ajustes, sendo usada para os cálculos na forma normal. A análise dos resultados finais deve ser feita de forma cuidadosa, pois, segundo Guimarães (2000), a distribuição não normal da K_s e sua alta variabilidade podem induzir a inferências que não condizem com a realidade, e que carecem de precisão.

Verifica-se na Tabela 15 que a K_s apresenta alto coeficiente de variação (53%). Conforme Warrick; Nielsen (1980), altos coeficientes de variação para essa propriedade do solo são esperados. Os mesmos autores citam vários trabalhos em que se obteve coeficiente de variação para a K_s entre 86 e 190%.

Tabela 15 – Estatística descritiva da condutividade hidráulica do solo saturado (Ks, mm h⁻¹).

Estatística	Ks
Número	69,0
Média	289,4
Desvio padrão	158,4
Variância	25104,9
Coeficiente de variação, %	52,9
Mínimo	41,3
Máximo	612,0
Assimetria	0,12
Curtose	-1,00
Normalidade (W)	0,96*

*significativo a 5% de probabilidade.

O efeito pepita (Co) reflete a variabilidade não explicada ou variações não detectadas pela distância insuficiente da malha de amostragem (CAMBARDELLA et al., 1994). O alcance de dependência espacial (Ao) é um dos parâmetros importantes do semivariograma e define a distância máxima até onde o valor de uma variável possui relação de dependência com o seu próximo (GUERRA, 1988).

O programa ajustou um modelo esférico para estimativa dos dados e o alcance da dependência espacial para a Ks foi de 141 m. Isso quer dizer que determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance têm distribuição espacial aleatória, sem dependência espacial, podendo ser aplicada a estatística clássica. As determinações realizadas em distâncias menores que o alcance permite o uso de interpolações para estimativas em pontos não amostrados. No geral, a distância de 141 m corresponde com o comprimento (ou largura) das glebas. Assim, a dependência nos valores de Ks estaria relacionado com o manejo do solo, em que determinações realizadas para o mesmo sistema de manejo, em determinada gleba de solo, apresentam dependência espacial. Esse efeito poderia ser mais bem verificado se a malha de pontos coletados fosse mais densa.

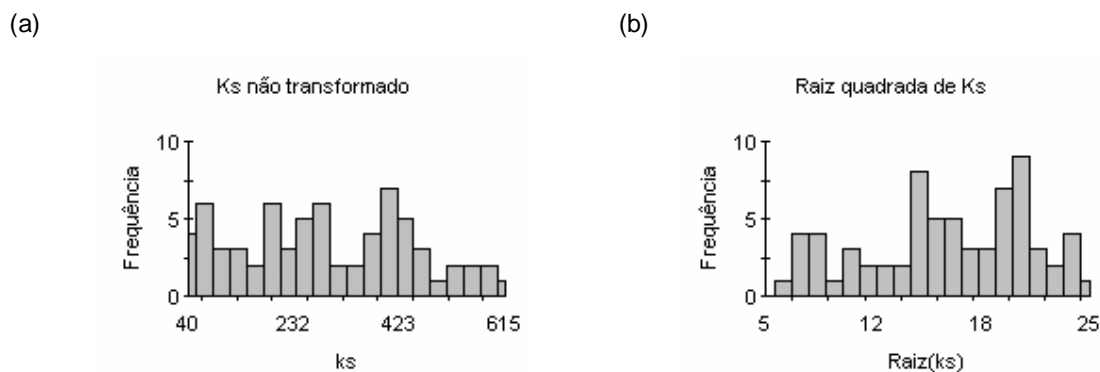
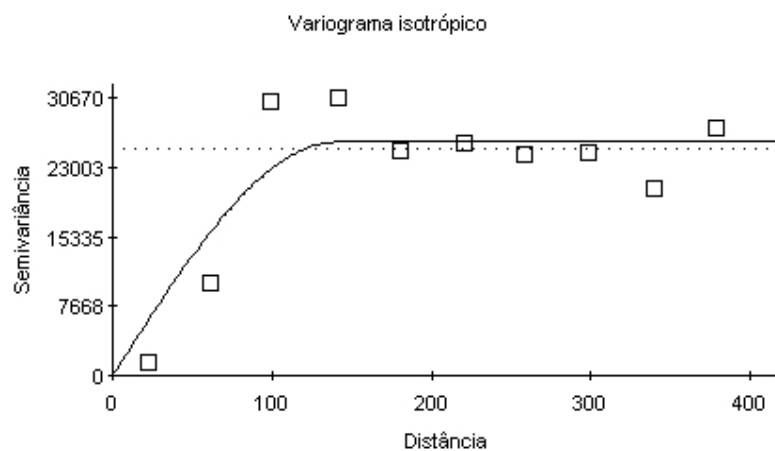


Figura 7 – Histogramas para o teste de normalidade da condutividade hidráulica do solo saturado (Ks). (a) variável Ks não transformada; (b) variável Ks transformada em raiz quadrada.



Spherical model ($C_0 = 10,00$; $C_0 + C = 25840,00$; $A_0 = 141$; $r^2 = 0,831$;
 RSS = $1,616E+08$)

Figura 8 – Modelo de semivariograma (esférico) ajustado para os dados coletados no solo da microbacia. C_0 = efeito pepita; $C_0 + C$ = patamar; A_0 = alcance; r^2 (R^2) = coeficiente de determinação; RSS = soma de quadrados de resíduos.

A relação 1:1 (Figura 9) permite visualizar a eficiência da estimativa dos dados. Nota-se que a estimativa não é boa para os maiores e menores valores de Ks, havendo superestimativa para os valores baixos e subestimativa para os valores altos. O valor mínimo e máximo para os dados estimados foi de 133 e 432 mm h^{-1} , respectivamente.

Após a validação do semivariograma foi feita a krigagem, onde foi construído o mapa de condutividade hidráulica da microbacia (Figura 10).

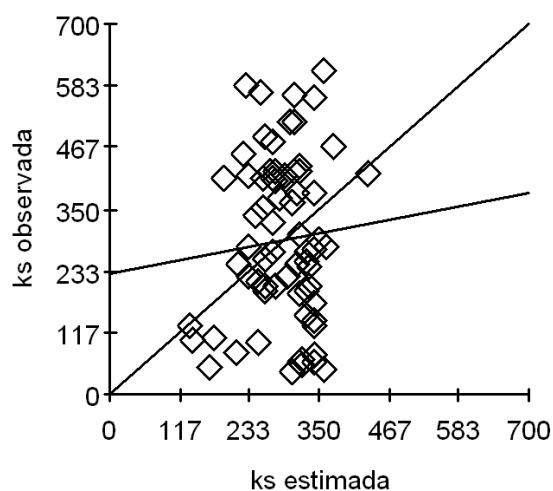


Figura 9 – Relação 1:1 (validação cruzada) dos dados de Ks observados e os estimados pelo semivariograma.

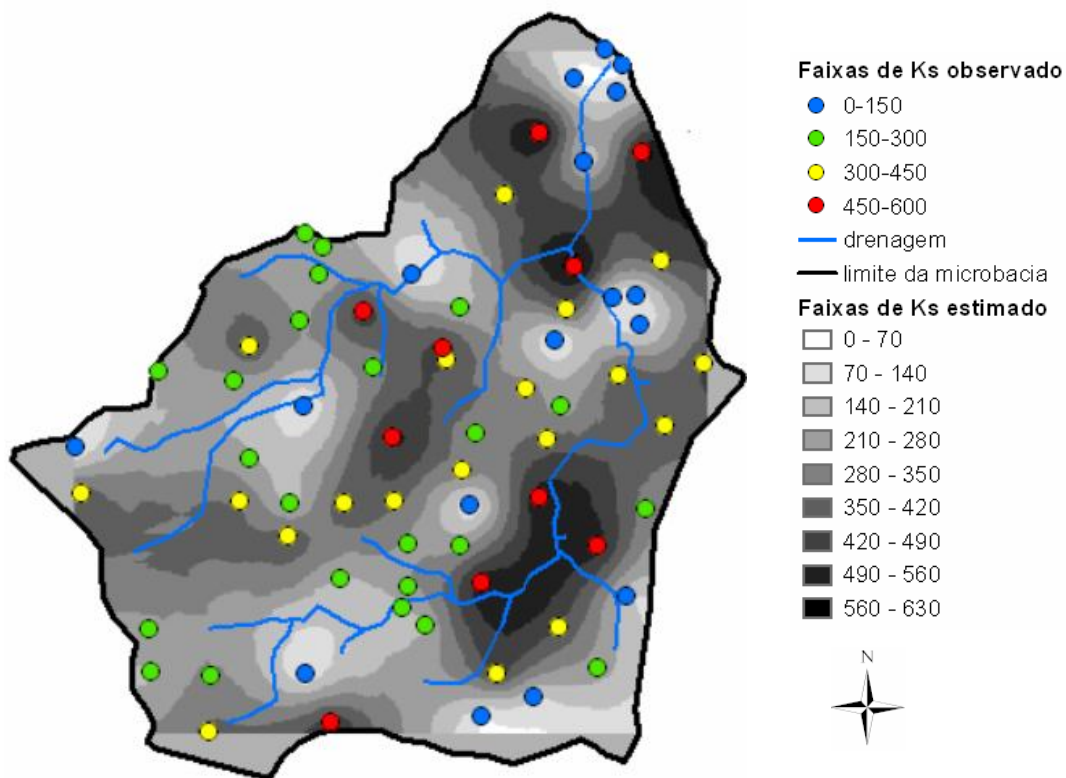


Figura 10 – Mapa da distribuição espacial dos valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_s , mm h^{-1}) estimados pelo método da krigagem.

Com o mapa de distribuição espacial da K_s (Figura 10), pode-se visualizar que existem áreas próximas à rede de drenagem com elevada capacidade de fluxo de água. O manejo do solo deve ser realizado no sentido de melhorar a retenção de água no solo e evitar o transporte de contaminantes para a rede de drenagem.

A elevada K_s nas faixas escuras da parte norte da microbacia (Figura 10) tem correspondência com áreas de relevo forte ondulado, com alta pedregosidade e perfil raso, em que predomina a mata nativa como cobertura vegetal.

Na parte sul, com maior quantidade de áreas agrícolas e relevo mais plano, também se encontra áreas com elevada K_s , especialmente naquelas áreas em que se pratica o manejo convencional do solo.

4.3 Elaboração das funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica do solo saturado

A análise descritiva das variáveis físico-hídricas utilizadas para as equações de regressão está apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Análise descritiva das variáveis físico-hídricas do solo da microbacia.

Variável	Unidade	Pontos	Média	Mínimo	Máximo	CV
Condutividade hidráulica do solo sat. (K_s)	mm h ⁻¹	66	294	45,3	612	53,2
Densidade do solo (D_s)	Mg m ⁻³	68	1,03	0,79	1,35	14,3
Porosidade total (P_T)	m ³ m ⁻³	68	0,57	0,46	0,69	8,1
Macroporosidade (M_A)	m ³ m ⁻³	68	0,19	0,03	0,31	33,4
Microporosidade (M_i)	m ³ m ⁻³	68	0,38	0,29	0,53	12,9
Cascalho (C_{ASC})	g kg ⁻¹	69	190	0	567	65,2
Areia total (A_T)	g kg ⁻¹	69	265	148	637	31,4
Areia grossa (A_G)	g kg ⁻¹	69	111	11	297	51,5
Areia fina (A_F)	g kg ⁻¹	69	154	65	354	44,0
Silte (S_i)	g kg ⁻¹	69	454	243	666	18,2
Argila (A_{RG})	g kg ⁻¹	69	281	118	511	30,7
Carbono orgânico (CO)	g kg ⁻¹	69	26,3	10,0	85,4	54,8
Grau de flocculação da argila (GF)	%	64	38,4	14,7	71,7	27,2
Umidade volumétrica de sat (θ_{sat})	m ³ m ⁻³	68	0,57	0,46	0,66	7,5
Umidade volumétrica a 1 kPa (θ_1)	m ³ m ⁻³	68	0,46	0,31	0,57	9,4
Umidade volumétrica a 6 kPa (θ_6)	m ³ m ⁻³	68	0,38	0,24	0,51	13,7
Umidade volumétrica a 10 kPa (θ_{10})	m ³ m ⁻³	68	0,35	0,22	0,49	14,6
Água disponível (AD)	m ³ m ⁻³	68	0,18	0,04	0,36	33,6

Observa-se que o coeficiente de variação da K_s é alto, tendendo à não normalidade. Porém, todas as formas de transformação de K_s foram testadas e nenhuma foi eficiente na normalização, sendo utilizado na forma normal para a elaboração das equações, o que pode gerar imprecisão nas estimativas. Entre as variáveis que foram transformadas estão cascalho, microporosidade, areia total, areia fina e carbono orgânico.

A análise de correlação linear de Pearson (Tabela 17) indicou que houve correlação positiva e significativa das variáveis macroporosidade, porosidade total, cascalho e carbono orgânico com a condutividade hidráulica do solo saturado. Por outro lado, a correlação da densidade do solo e da microporosidade com a K_s foi negativa. As frações granulométricas e o grau de floculação não apresentaram correlação significativa com a K_s .

Tabela 17 – Análise de correlação linear de Pearson entre variáveis físico-hídricas e a condutividade hidráulica do solo saturado do solo da microbacia.

Variável	Condutividade hidráulica
Macroporosidade	0,74**
Densidade do solo	-0,62**
Umidade volumétrica a 10 kPa	-0,56**
Umidade volumétrica a 6 kPa	-0,54**
Porosidade total	0,52**
Umidade volumétrica a 1 kPa	-0,49**
Microporosidade	-0,46**
Umidade volumétrica de saturação	0,44**
Água disponível	-0,40**
Carbono orgânico	0,35*
Cascalho	0,28**
Areia fina	-0,19 ^{ns}
Areia total	-0,16 ^{ns}
Argila	0,10 ^{ns}
Grau de floculação	0,09 ^{ns}
Silte	0,06 ^{ns}
Areia grossa	-0,00 ^{ns}

* e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

O efeito positivo da porosidade total e da macroporosidade na K_s é, de certa forma, lógico. Isso porque o espaço poroso é que determina o fluxo de água no solo.

O cascalho contribui com o aumento de espaços porosos maiores e o carbono orgânico tem efeito na estrutura do solo, melhorando a estabilidade de agregados e a continuidade de poros.

O efeito negativo da densidade se deve à diminuição da porosidade do solo, principalmente do volume de macroporos, e, em alguns casos, o consequente aumento da microporosidade dificulta o fluxo de água no perfil.

As funções de pedotransferência para a Ks encontram-se na Tabela 18 e a relação 1:1 entre dados observados e estimados, na Figura 11. Verifica-se que a equação gerada a partir da entrada com dados granulométricos como variáveis independentes (equação 1) não foi precisa, ou seja, as frações cascalho e areia fina, selecionadas pelo programa para inserção na equação, não explicam as variâncias dos valores observados de Ks. Os sinais das variáveis independentes (positivo para o cascalho e negativo para a areia fina) indicam que o cascalho influencia positivamente a Ks, enquanto que a areia fina tem efeito contrário.

Tabela 18 – Funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica do solo saturado (Ks).

Equações de regressão ⁽¹⁾	R ²	S _{yx} (%)	N
1) $K_s = 828,77 + 14,49 \sqrt{C_{ASC}} - 146,08 \log(A_F)$	0,19	143,4	69
2) $K_s = 1680,00 + 8,81 \sqrt{C_{ASC}} - 163,11 \log(A_F) - 737,36 D_s + 1515,80 CO^{-1}$	0,56	106,9	69
3) $K_s = 55,18 - 2739,40 CO^{-1} + 1932,50 M_A$	0,70	87,2	69
4) $K_s = - 49,49 + 0,43 A_G + 35,04 \log A_F - 1765,78 CO^{-1} + 7163,72 M_A - 3866,73 P_T + 1,31 GF - 4010,91 \theta_1 + 8728,80 \theta_6 - 1253,99 \theta_{10}$	0,87	61,5	69

⁽¹⁾R² = coeficiente de determinação do modelo; S_{yx} = erro padrão da estimativa; N = número de pares de dados para gerar a equação; C_{ASC} = cascalho; A_F = areia fina; D_s = densidade do solo; CO = carbono orgânico; M_A = macroporosidade; A_G = areia grossa; P_T = porosidade total; GF = grau de floculação; θ_1 = umidade volumétrica na tensão 1 kPa; θ_6 = umidade volumétrica na tensão 6 kPa; θ_{10} = umidade volumétrica na tensão 10 kPa.

Quando foram incluídas as variáveis Ds e teor de CO junto àquele conjunto de dados de granulometria utilizado para a elaboração da equação 1, foi possível a elaboração da equação 2, em que entraram no modelo as variáveis C_{ASC}, A_F, Ds e CO (Tabela 18). A precisão do novo modelo melhorou significativamente, ou seja, 56% da variação dos dados observados de Ks foram explicados pela equação. Conforme os sinais dos parâmetros Ds e CO, verifica-se que o primeiro tem efeito negativo na Ks e o segundo tem efeito positivo.

Na equação 3, a inclusão das variáveis M_A , M_I , P_T e GF junto ao conjunto de dados utilizado para a elaboração da equação 2, fez com que o programa escolhesse somente as variáveis CO e M_A para estimar os dados de K_s . A equação 3 melhorou a estimativa da K_s ainda mais, pois 70% dos dados observados foram explicados pela equação. Além disso, o erro padrão da estimativa (S_{yx}) foi menor, ou seja, houve menor dispersão dos dados observados e estimados de K_s (Figura 11). O sinal positivo de M_A indica que a macroporosidade tem efeito positivo na K_s , enquanto que o sinal negativo do CO não tem muito fundamento, pois o teor de carbono orgânico tem efeito positivo na K_s , conforme Tabela 17.

Na equação 4, com a adição de parâmetros referentes à retenção de água junto ao conjunto de variáveis independentes da equação anterior, possibilitou a inserção de seis variáveis (A_G , A_F , CO , M_A , P_T , GF , θ_1 , θ_6 , θ_{10}). Assim, 87% da variação dos dados de K_s foram explicados pela função e o erro padrão da estimativa foi o menor entre todas as outras equações, indicando menor dispersão dos pontos observados e estimados de K_s em relação à reta 1:1.

De forma geral, as variáveis que representam a estrutura do solo foram as que mais participaram das equações de estimativa da K_s , em detrimento das variáveis granulométricas. Como o solo é relativamente homogêneo quanto à granulometria, era de se esperar esse resultado, o que evidencia que o manejo teve mais influência no espaço poroso do solo e, conseqüentemente, na K_s .

A equação 4 é melhor que as demais, pois explica 87% da variação dos valores de K_s e possui menor dispersão dos dados (S_{yx}) em relação à reta 1:1. Além dessa, a equação 3 pode ser considerada útil, pois com apenas duas variáveis (D_s e CO), geralmente disponíveis em bancos de dados de solos, explicou 70% da variação dos dados de K_s .

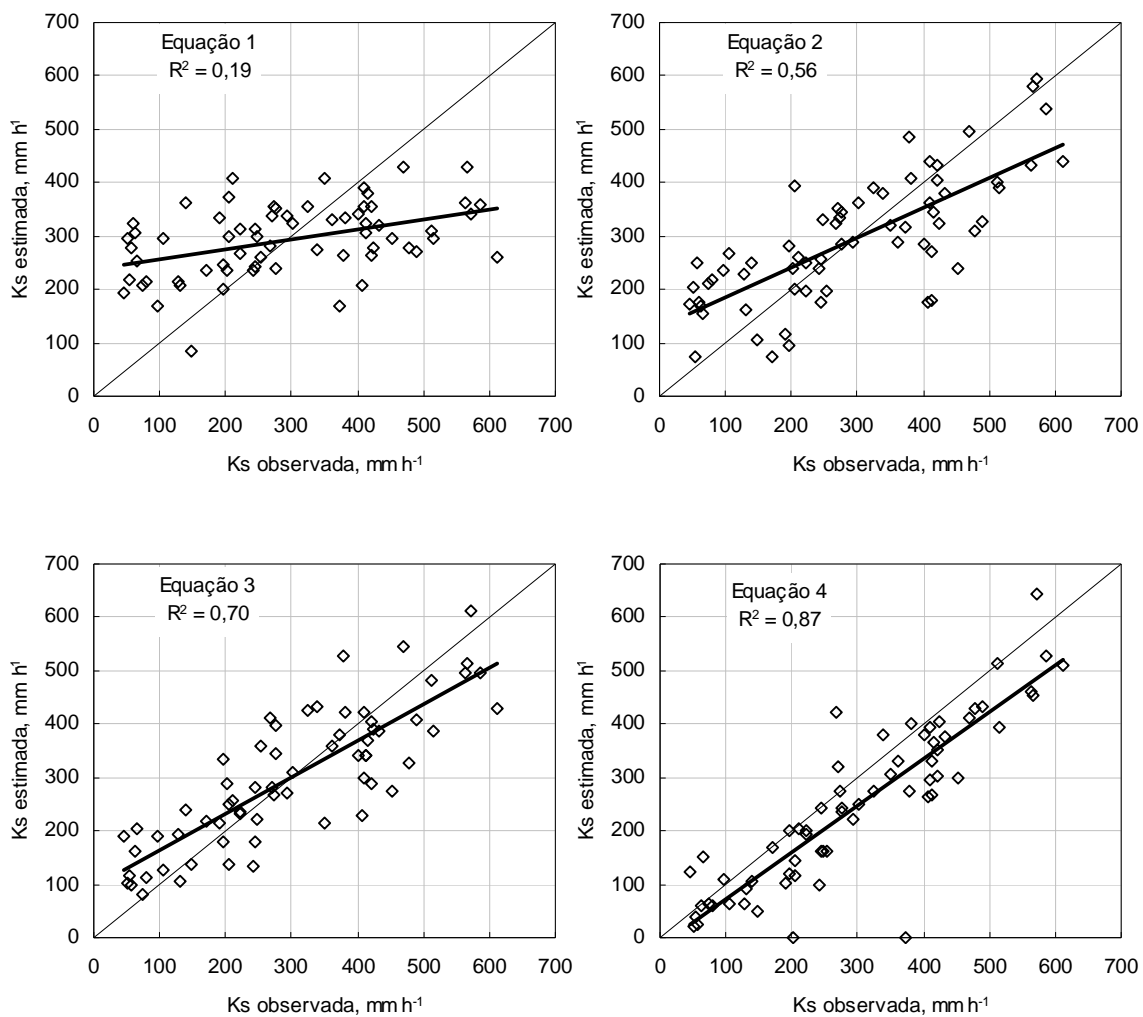


Figura 11 – Relação 1:1 dos valores observados e estimados de condutividade hidráulica do solo saturado (K_s).

As demais equações, elaboradas para atender aos mais diversos bancos de dados, no que se refere à disponibilidade de dados, estão apresentadas na Tabela 19. Em algumas dessas equações realizaram-se combinações entre as variáveis granulométricas, como por exemplo, a divisão de silte por areia fina, possibilitando melhor correlação com a K_s e, conseqüentemente, sua inclusão na equação de estimativa.

Tabela 19 – Outras funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica do solo saturado (Ks).

Equações de regressão ⁽¹⁾	R ²	S _{yx} (%)
$K_s = 801,10 - 16680,00 A_T^{-1} - 220,94 D_s - 2425,50 CO^{-1} - 3837,75 P_T + 6402,30 \theta_{sat} - 3325,10 \theta_1$	0,85	64,0
$K_s = - 1335,75 - 13704,00 A_T^{-1} - 1406,09 CO^{-1} + 3059,30 M_A + 305,70 M_I - 3347,28 \theta_1 + 6326,57 \theta_6 - 1327,22 \theta_{10}$	0,83	69,3
$K_s = - 33,92 + 2957,23 M_A - 3130,08 \theta_1 + 4561,70 \theta_6 - 1454,69 \theta_{10}$	0,81	72,4
$K_s = 98,01 - 1325,94 CO^{-1} + 2823,00 \theta_{sat} - 2906,87 \theta_1$	0,80	72,5
$K_s = 808,28 + 0,0012 S_I^2 - 31,87 S_I/A_F - 1,02 A_F/S_I - 316,30 D_s + 1478,89 M_A$	0,73	84,9
$K_s = 1300,88 + 4,74 \sqrt{C_{ASC}} - 101,8 \log A_F - 459,90 D_s - 631,01 P_T + 1440,13 M_A$	0,72	84,7
$K_s = 695,68 + 5,45 \sqrt{C_{ASC}} - 86,29 \log A_F - 295,68 D_s + 1390,83 M_A$	0,72	86,0
$K_s = 1243,96 - 148,91 \log A_F - 26,16 S_I/A_F - 373,13 D_s + 1401,76 M_A$	0,71	86,4
$K_s = 316,94 - 3179,08 CO^{-1} + 1608,06 M_A - 523,43 \theta_{10}$	0,70	88,8
$K_s = 282,13 + 0,23 A_{RG} - 321,75 D_s + 1506,49 M_A$	0,70	88,8
$K_s = - 66,1 + 7,87 \log A_{RG} - 339,38 D_s + 1465,79 M_A$	0,69	88,6
$K_s = 293,86 - 280,86 D_s + 1559,12 M_A$	0,69	89,8
$K_s = 293,76 + 0,25 A_{RG} - 617,72 S_I/A_F - 1685,32 CO^{-1} - 249,75 M_I^{-1}$	0,68	92,9
$K_s = 1534,70 + 9,03 \sqrt{C_{ASC}} - 138,78 \log A_F - 649,44 D_s$	0,54	109,7
$K_s = 1135,38 - 36,27 S_I/A_{RG} - 749,56 D_s$	0,47	117,5

⁽¹⁾R² = coeficiente de determinação do modelo; S_{yx} = erro padrão da estimativa; S_I = silte; P_T = porosidade total; A_{RG} = argila; C_{ASC} = cascalho; A_F = areia fina; D_s = densidade do solo; CO = carbono orgânico; M_A = macroporosidade; M_I = microporosidade; θ_{sat} = umidade de saturação; θ_1 = umidade volumétrica na tensão 1 kPa; θ_6 = umidade volumétrica na tensão 6 kPa; θ_{10} = umidade volumétrica na tensão 10 kPa.

4.4 Avaliação de funções de pedotransferência da literatura

A relação 1:1 entre os valores observados no solo da microbacia e os estimados pelas equações elaboradas a partir de outros bancos de dados são apresentadas na Figura 12. As equações propostas por esses autores estão apresentadas na seção materiais e métodos (Tabela 2).

Verifica-se que a grande maioria das equações para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado subestima os dados para o solo da microbacia em estudo. Entre essas equações, estão aquelas propostas por Saxton; Rawls (2006), Cosby et al. (1984), Brakensiek et al. (1984), Saxton et al. (1986), Campbell; Shiozawa (1994), Dane; Puckett (1994) e Pucket et al. (1985).

A subestimativa dos valores de K_s pode estar associada à condição estrutural do solo para qual essas funções foram elaboradas. Os solos que serviram de base

para essas equações estão situados em regiões de clima temperado, enquanto que os da microbacia situam-se em clima temperado e apresentam estrutura degradada, com grande porosidade. Assim, estimativas que utilizam somente dados texturais não terão bons resultados para os solos da microbacia de Arvorezinha, pois essas propriedades do solo não estão correlacionadas significativamente com a K_s .

A única equação que apresentou estimativa razoável foi aquela proposta por Vereecken et al. (1990), conseguindo explicar 24% da variação dos dados de K_s . As variáveis independentes utilizadas por esse modelo foram o conteúdo de argila, areia total, matéria orgânica e densidade do solo.

Nota-se que a inclusão, na equação, de propriedades do solo que representam sua condição estrutural, como D_s e CO , proporcionam melhores resultados. Um dos problemas verificados nessa equação é que, em baixos valores de densidade do solo, como é o caso de áreas sob mata nativa, ocorrem superestimativas da K_s , especialmente em valores de D_s abaixo de $0,8 \text{ Mg m}^{-3}$. Para a construção do gráfico na Figura 12, esses valores (em número de cinco) foram excluídos, porém, o valor de R^2 apresentado os considera.

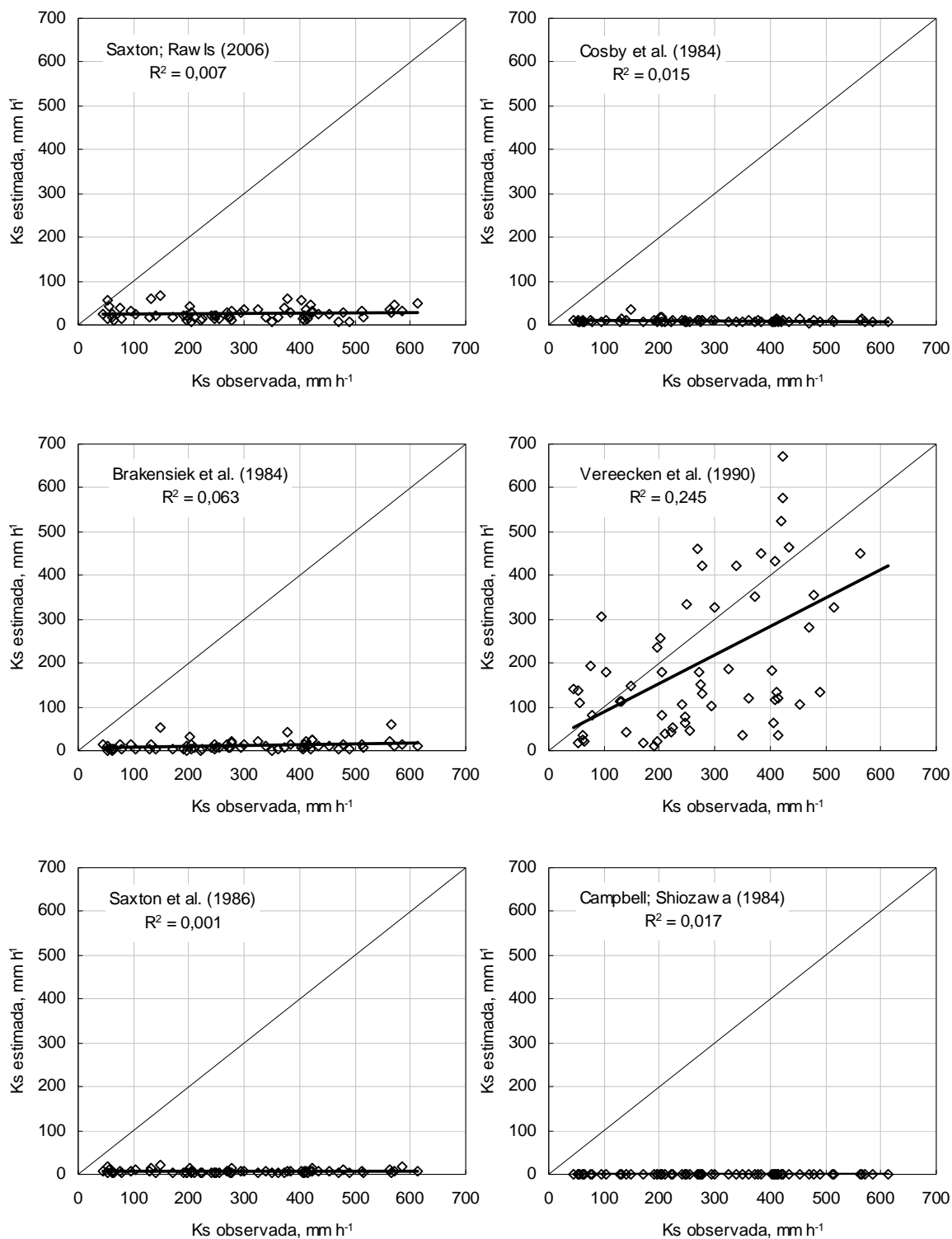


Figura 12 – Relação 1:1 dos valores de condutividade hidráulica do solo saturado (Ks) observados nos pontos amostrados da microbacia e os estimados pelas funções de pedotransferência encontradas na literatura.

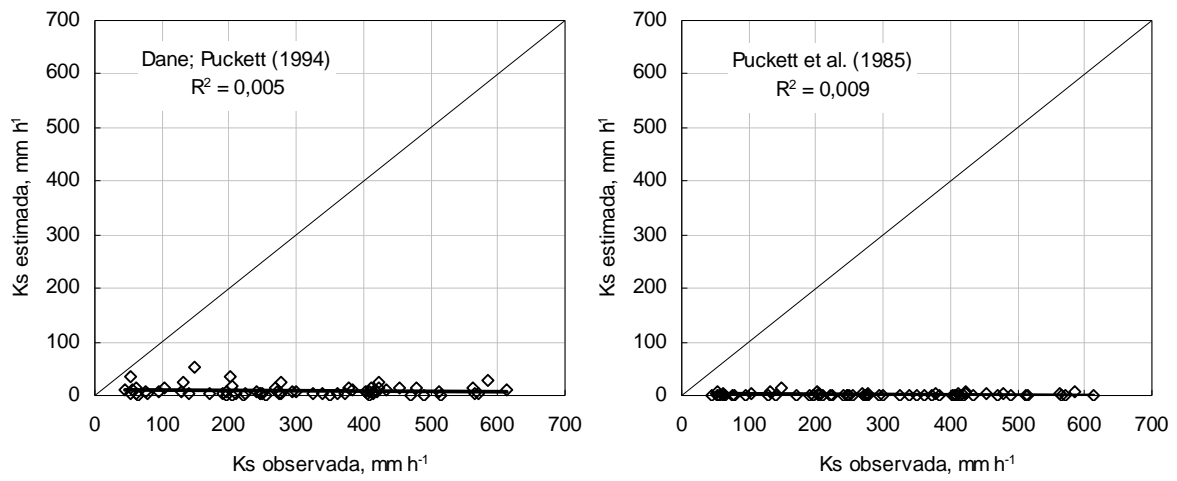


Figura 12 – continuação.

5 CONCLUSÕES

As áreas cultivadas apresentaram menor qualidade do solo em relação às áreas não cultivadas. O uso de práticas conservacionistas alterou a estrutura do solo, aumentando a retenção e a disponibilidade de água em relação ao preparo convencional. As demais propriedades físico-hídricas não foram afetadas pelas práticas conservacionistas em relação ao preparo convencional. Entre todos os sistemas de cultivo, o campo nativo foi o que apresentou estrutura mais compacta, devido ao pisoteio animal, o que influenciou na redução do fluxo de ar e água em relação às demais áreas e maior retenção e disponibilidade de água.

Os dados de condutividade hidráulica do solo saturado apresentaram dependência espacial, com alcance de 141 m, o que a construção do mapa de variabilidade espacial e a visualização de áreas que merecem mais cuidados quanto à conservação do solo, como aquelas situadas próximo à rede de drenagem.

As funções de pedotransferência que utilizaram variáveis preditoras com base na estrutura do solo apresentaram boa capacidade de estimativa dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado. No entanto, a utilização somente de dados texturais não foi suficiente para explicar essas variações.

Recomenda-se aplicar testes de confiabilidade dessas equações em outros bancos de dados. Porém, para a obtenção de melhores resultados, as funções não devem ser usadas para solos com condição estrutural muito diferente dessas áreas da microbacia.

Os testes de confiabilidade realizados com funções de pedotransferência encontradas na literatura utilizando o banco de dados da microbacia mostraram que a maioria não se adapta para as condições físico-hídricas dessa área. Essas funções foram baseadas em bancos de dados de solos de clima temperado e, na sua grande maioria, usam propriedades granulométricas como variáveis independentes.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno aluminico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 963-975, nov./dez. 2005.

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. I- Efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 115-119, jan./abr. 1995.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 717-723, jul./set. 2001.

ALEGRE, J. C. et al. Tillage systems and soil properties in Latin America. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 2-4, p. 147-163, jun. 1991.

AMADO, T. J. C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 189-197, jan./mar. 2001.

ANDRADE, A. R. S. et al. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 322-329, mar./abr. 2005.

ANGELICO, J. C.; SILVA, I. N. Eficiência da krigagem na estimativa das variáveis físicas e químicas do solo. **Energia na Agricultura**, Botucatu. v. 21, n. 1, p. 106-117, jan./mar. 2006.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-345, mar./abr. 2004.

AZEVEDO, E. C. **Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no Estado de Mato Grosso**. 2004. 158 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BAGARELLO, V. Influence of well preparation on field-saturated hydraulic conductivity measured with the Guelph permeameter. **Geoderma**, Amsterdam, v. 80, n. 1-2, p. 169-180, oct. 1997.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 307 p.

BALL, B. C.; O'SULLIVAN, M. F. Soil strength and crop emergence in direct drilled and ploughed cereal seedbeds in seven field experiments. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 609-622, 1982.

BALL, B. C.; SMITH, K. A. Gas movement. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (ed.). **Soil analysis physical methods**. 3rd ed., Madison: Marcel Dekker, 1991, p. 511-549.

BARRETO, A. N. et al. Condutividade hidráulica saturada em um solo aluvial do perímetro irrigado de São Gonçalo, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 152-155, jan./abr. 2001.

BAYER, C. et al. Efeitos de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 599-607, maio/jun. 2000.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-163, jan./fev. 2004.

BERTOL, I.; SANTOS, J. C. P. Uso do solo e propriedades físico-hídricas no Planalto Catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 2, p. 263-267, fev. 1995.

BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 167-177, jan./mar. 2001.

BEUTLER, A. N. et al. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 829-834, jul./set. 2002.

BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator**. 2000. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BOONE, F. R.; VEEN, B. W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994, p. 237-264.

BOSCH, D. D.; WEST, L.T. Hydraulic conductivity variability for two sandy soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 1, p. 90-98, jan./feb. 1998.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, New York, v. 9, n. 5, p. 177-213, may 1989.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 126 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BRAKENSIEK, D. L.; RAWLS, W. J.; STEPHENSON, G. R. **Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils**. ASAE Paper PNR-84-203, St. Joseph, Mich. 1984.

BREJDA, J. J. et al. Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 3, p. 974-982, jan. 2000.

BRUNSDON, C. et al. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. **Geographical Analysis**, v. 28, n. 4, p. 281-298, oct. 1996.

BUDIMAN, M. et al. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50 p. (Documentos, 45).

CADIMA, A. et al. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, no campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 2, p. 63-66, maio/ago. 1980.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, oct./nov. 1994.

CAMPBELL, G. S.; SHIOZAWA, S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INDIRECT METHODS FOR ESTIMATING THE HYDRAULIC PROPERTIES OF UNSATURATED SOILS. **Proceedings...** Riverside: University of California, 1994, p. 317-328,.

CAMPOS, R. C. et al. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 383-391, abr./jun. 1999.

CAMPOS, B. C. et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 121-126, jan./abr. 1995.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: Água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-88, jan./fev. 1995.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolo Roxo submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 1. p. 99-105, jan./abr. 1990.

CARVALHO, J. R. P. et al. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.

CASTRO FILHO, C. et al. Aggregate stability under different soil management systems in a red Latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 45-51, apr. 2002.

CAVENAGE, A. et al. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 997-1003, out./dez. 1999.

COGO, N. P., LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 743-753, jul./ago. 2003.

COOLEY, R. L. Practical scheffe-type credibility intervals for variables of a groundwater model. **Water Resources Research**. Washington, v. 35, n. 1, p. 113-126, jan. 1999.

CORCINI, A. L. M. **Variação temporal da estrutura do solo em sistemas integrados de cultivo da cebola no Uruguai**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestre em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

COREY, A. T. Air Permeability. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis – Part I – Physical and Mineralogical Methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 1986, p. 1121-1136.

COSBY, B. J. et al. A statistical exploration of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. **Water Resources Research**, Washington, v. 20, n. 6, p. 682-690, jun. 1984.

COSTA, F. S. et al. Aumento de matéria orgânica num Latossolo Bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 587-589, mar./abr. 2004.

COSTA, F. S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 527-535, maio/jun. 2003.

CRUZ, A. C. R. et al. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p.1105-1112, nov./dez. 2003.

DAM, R. F. et al. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 41-53, nov. 2005.

D'ANDRÉA, A. F. et al. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos Cerrados no Sul do Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1047-1054, out./dez. 2002.

DANE J. H.; PUCKETT, W. Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INDIRECT METHOD FOR ESTIMATION HYDRAULIC PROPERTIES OF USATURATED SOILS. **Proceedings...** Riverside: University of California, 1994, p. 389-403.

DE MARIA, I. C. et al. Atributos físicos do solo e crescimento radicular da soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 703-709, jul./set. 1999.

DEBARBA, L. **Simulação pelo Modelo Century do Impacto da Agricultura sobre o Estoque de Carbono Orgânico em Solos do Planalto Riograndense**. 2002. 172 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DECAGON DEVICES, I. **Operator's manual version 1.3 WP4 dewpoint potentiometer**. Washington: Decagon. 2000. 70 p.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D. Methods for analyzing constant head well permeameter data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 1, p. 320-323, jan. 1992.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 221 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).

FERREIRA, S. T. **Avaliação da relação entre a condutividade hidráulica do solo saturado com parâmetros físicos de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a dois diferentes manejos**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em ciências – área de concentração: física) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.

FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. 2008. 116 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

FLORES, C. A. et al. Recuperação da qualidade estrutural, pelo sistema plantio direto, de um Argissolo Vermelho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 8, p. 2164-2172, nov. 2008.

FLORES, J. P. C. et al. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 771-780, jul./ago. 2007.

FONSECA E. L. Uso do interpolador krigagem ordinária para a espacialização das propriedades físicas dos solos. In: I SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2002, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2002.

FONTANELA, E. **Qualidade físico-hídrica de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego**. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GAGGERO, M. R. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. 1998. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GENRO JUNIOR, S. A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto**. 2002. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GOMES, P. C. et al. Influência da cobertura vegetal na formação e evolução de húmus e sua relação com grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Amarelo do Município de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 41, n. 235, p. 223-233, maio/jun. 1994.

GONÇALVES, A. C. A. et al. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, out. 2001.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 169-177, abr. 2005.

GUBIANI, P. I. et al. Ksat 2008 – Programa computacional auxiliar na determinação da condutividade hidráulica de solo saturado pelo método do permeâmetro de carga

decrecente. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2008. 1 CD-ROM.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energia – Departamento de Produção Mineral, 1988. 145 p.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 2000, 89 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Água e Solo, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, Washington, v. 15, n. 6, p. 1633-1635, nov./dec. 1979.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 239-282, jun. 1988.

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

HARTGE, K. H.; HORN, R. **Die Physikalische Untersuchung Von Böden**. Stuttgart: Bodenkunde, Universität Kiel, Kiel. 1992. 177 p.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press. 1980. 413 p.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1981. 733 p.

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 207-219, dec. 2004.

HOSSEINI, E. et al. Comparison of several interpolators for smoothing hydraulic conductivity data in South West Iran. **Transactions of the ASAE**, v. 36, n. 6, p. 1687-1693, nov./dec. 1993.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560 p.

JASTROW, J. D.; MILLER, R. M.; LUSSENHOP, J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v. 30, n. 7, p. 905-916, jul. 1998.

JUNQUEIRA JUNIOR, J. A. et al. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 3, p. 914-922, jun. 2008.

KAISER, D. R. **Nitrato na solução do solo e na água de fontes para consumo humano numa microbacia hidrográfica produtora de fumo**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

KAY, B. D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v. 12, n. 1, p. 1-53, jan. 1990.

KEMPER, W. D. Aggregate stability. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis**. PART 1. Madison, WI. USA: ASA & SSSA. 1965, p. 511-519.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221-227, mar./abr. 2007.

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 646-650, jul./set. 2006.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857-867, out./dez. 2002.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis I. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. Cap. 13, p. 210-221.

LAL, R. Soil compaction and tillage effects on soil physical properties of a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. **Journal Sustainable Agriculture**, New York, v. 14, n. 4, p. 53-65, 1999.

LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, set./out. 2007.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p. 275-256, feb. 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, n. 1, p. 277-294, jan. 1985.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba, 2000. 509 p.

LIMA, C. L. R. et al. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 199-205, jan./fev. 2003.

LIMA, C. L. R.; et al. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1172-1178, jul./ago. 2006.

MACHADO, J. L. et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 495-502, mar./abr. 2008.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 17, p. 52-55, 1987.

MAPA DA CIDADE DE ARVOREZINHA/RS. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Arvorezinha>>. Acesso em: 11 fev. 2009.

MARCOLAN, A. L. et al. Recuperação de atributos físicos de um Argissolo em função do seu revolvimento e do tempo de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 571-579, maio/jun. 2007.

McCORMACK, D. E.; WILDING, L. P. Soil properties influencing strength of Cranfield and Geeburg soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 43, n. 1, p. 167-173, jan. 1979.

McKYES, E. **Agricultural engineering soil mechanics**. Amsterdam: Elsevier, 1989. 264 p.

MELLO, J. M. et al. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariogramas visando a estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 69, n. 1, p. 25-37, dez. 2005.

MELLO, N. A. de. Efeito do sistema de manejo nos atributos do solo, movimentação de sedimentos e exportação de carbono orgânico numa microbacia rural sob cultura do fumo. 2006. 272 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MESQUITA, M. G. B. F. **Caracterização estatística da condutividade hidráulica saturada do solo**. 2001. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MESQUITA, M. G. B. F. et al. More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 789-793, out./dez. 2002.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, maio/jun. 2004.

MINELLA, J. P. G. **Utilização de técnicas hidrossedimentométricas combinadas com a identificação de fontes de sedimentos para avaliar o efeito do uso e do manejo do solo nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica rural no Rio Grande do Sul**. 2007. 162 f. Tese (Doutorado em recursos hídricos e saneamento ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MOLDRUP, P. et al. Air permeability in Undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, n. 1, p. 32-40, jan./fev. 2003.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Seção de Geografia. 1961. 46 p.

MOTA, J. C. A. et al. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na Chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 49-58, jan./fev. 2008.

MOURA, M. V. T. et al. Uma alternativa para caracterizar o valor da condutividade hidráulica em solo saturado. **Irriga**, Botucatu, v. 4, n. 2, p. 83-91, maio/ago. 1999.

MULLA, D. J. et al. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 38, n. 4, p. 301-311, mar. 1992.

MUNKHOLM, L. J.; SCHJONNING, P.; RASMUSSEN, K. J. No-inversion tillage effects on soil mechanical properties of a humid sandy loam. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 62, n. 1-2, p. 1-14, oct. 2001.

OADES, J. M. The retentions of organic matter in soils. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 5, n. 1, p. 35-70, jan. 1988.

OLIVEIRA, L. B. et al. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 315-323, mar./abr. 2002.

OLIVEIRA, G. C. et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 327-336, mar./abr. 2004.

ORTIZ, G. C. **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo**. 2002. 75 f. Dissertação (Mestrado em Estatística) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 63, n. 6, p. 1748-1757, nov./dec. 1999.

PÉREZ GOMAR, E. **Qualidade física de um Vertissolo e produção forrageira em campo nativo melhorado, com irrigação e pastoreio**. 2005. 85 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PUCKETT, W. E.; DANE, J. H.; HAJEK, B. H. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 49, n. 4, p. 831-836, jul./aug. 1985.

QUEIROZ, J. E. **Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea**. 1995. 167 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L. A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters. In: **Advances in Infiltration**. ASAE, St. Joseph, MI. 1983. p. 102-112.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

REICHERT, J. M.; NORTON, L. D. Surface seal micromorphology as affected by fluidized bed combustion bottom-ash. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 7, n. 4, p. 303-317, mar. 1995.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 26-48, jul./dez. 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2007, v. 5, p. 49-134.

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

REINERT, D. J. **Recuperação da agregação pelo uso de leguminosas e gramíneas em solo Podzólico Vermelho-Amarelo**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1993. 62 p. (Tese de concurso a Professor Titular)

REINERT, D. J. Recuperação de solos em sistemas agropastoris. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. (eds.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998, p.163-176.

REINERT, D. J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a Typic Hapludalf**. 1990. 129 f. Thesis (Ph.D. in Agronomy) – Michigan State University, Michigan.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez. 2006.

REYNOLDS, W. D. et al. An assessment of the single-head analysis for the constant head well permeameter. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 72, n. 4, p. 489-501, nov. 1992.

RHEINHEIMER D. S. dos, et al. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 435-440, jan./fev. 2008.

RIBEIRO, K. D. et al. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, jul./ago. 2007.

ROBERTSON, G. P. **GS⁺: geostatistics for the environmental sciences**. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA, 1998. 152 p.

RODRIGUEZ-TOVAR, F. J.; DELGADO, J. Cuantificación del grado de consolidación del substrato: aplicación en análisis icnológicos. **Ameghiniana**, Buenos Aires, v. 43, n. 2, p.503-508, abr./jun. 2006.

ROQUE, M. W. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em solos de uma transeção perpendicular a um dreno natural**. 2003. 138 f. (Dissertação de mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

ROS, C. O. da, et al. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 241-247, abr./jun. 1997.

ROTH, C. H.; CASTRO FILHO, C. de; MEDEIROS, G. B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 241-248, set./dez. 1991.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 313-319, maio/ago. 1995.

SAMPAIO, F. M. T. et al. Correlações entre a permeabilidade e os atributos físicos do solo da sub-bacia do córrego centenário da cidade de Lavras-MG. **Ciência e agrotomologia**, Lavras, v. 30, n. 4, jul./ago. 2006.

SANCHEZ, P. A. **Suelos del trópico-Características y manejo**. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 1981. 645 p.

SAS Institute. **SAS Statistical Package**. Version 5.1.26, SAS Inc., Cary, 1997.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 5, p. 1569-1578, sep./oct. 2006.

SAXTON, K. E. et al. Estimating generalized soil water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 4, p. 1031-1036, jul./aug. 1986.

SCHJONNING, P. et al. Pore characteristics and hydraulic properties of a sandy loam supplied for a century with either animal manure or mineral fertilizers. **Soil Use and Management**, Stirling, v. 21, n. 3, p. 265-275, sept. 2005.

SCHJONNING, P. Soil strength as influenced by texture, water content and soil management. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.12, p. 277-283, 1991.

SCHJONNING, P.; RASMUSSEN, K.J. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, n. 1-2, p. 69-82, sept. 2000.

SCHERPINSKI, N. I. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos e do rendimento de grãos de soja em um Latossolo Vermelho sob sistema de plantio direto e convencional.** 2003. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto.** 2003. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA et al. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 329-337, mar./abr. 2006.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 877-883, may/jun. 1997.

SILVA, C. L. da; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 2, p. 213-220, fev. 1997.

SILVA, G. J. et al. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho-Amarelo do cerrado mato-grossense sob diferentes formas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2135-2143, set./out. 2008.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 113-117, jan./mar. 1997.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 311-317, abr./jun. 1998.

SILVA, M. A. S. da, et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 554-552, maio/jun. 2005.

SILVA, P. M. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do ribeirão marcela, alto rio grande, MG.** 2006. 155 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SILVA, R. B. et al. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 165-173, jan./fev. 2004.

SILVA, M. L. N. et al. Estabilidade e resistência de agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro cultivado com sucessão milho-adubo verde. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, p. 97-103, 1998.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 5, p. 1350-1358, sept./oct. 1999.

SMITH, G. N.; SMITH, I. G. N. **Elements of soil mechanics**. 7th ed. Oxford: Blackwell Science Professional. 1998. 494 p.

SOUZA, C. K et al. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de um Latossolo em Jaboticabal-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 486-495, jul./set. 2003.

SOUZA, L. S. et al. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 3, p. 367-372, jul./set. 1997.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 18-23, jan./mar. 2003.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 51-58, jan./mar. 2004.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p.

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

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004a. 1 CD-ROM.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004b. 1 CD-ROM.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, ago. 2007.

TAVARES-FILHO, J. et al. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 996-999, maio/jun. 2006.

TAYLOR, S. A. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 14, n. 1, p. 55-61, jan./feb. 1950.

TERZAGHI, K.; PERCL, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3th ed. New York, John Wiley Sons, 1996. 549 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and waterstable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Edinburg, v. 33, n. 2, p. 141-163, jun. 1982.

TORVANE SHEAR TESTER SET, PLASTIC-H-4212. EUA. Disponível em: <<http://www.humboldtmg.com/c-1-p-43-id-1.html>>. Acesso em: 09 fev. 2009.

VAN GENUCHTEN, M. Th.; LEIJ, F. J.; LUND, L. J. Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. In: INTERNATIONAL WORKSHOP. **Proceedings...** Riverside: University of California, 1992.

VEIGA, M. da et al. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a Southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1437-1446, jul./aug. 2008.

VENDRUSCULO, L. G. **Desenvolvimento de um sistema computacional para análise geoestatística**. 2001. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade de Campinas, Campinas.

VERECKEN, H.; MAES, J.; FEYEN, J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. **Soil Science**, Baltimore, v. 149, n. 1, p. 1-12, jan. 1990.

VERECKEN, H.; MAES, J.; FEYEN, J.; DARIUS, P. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. **Soil Science**, Baltimore, v. 148, n. 6, p. 389-403, dec. 1989.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VIEIRA, D. A. et al. Comportamento de Atributos físicos do solo franco arenoso e argiloso sob condições diferenciadas de manejo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17., 2008, **Anais...** Rio de Janeiro: SBCE-UFRRJ-Embrapa, 2008. v. 1, p. 1-4.

VIEIRA, M. J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 7, p. 873-882, jul. 1984.

VIEIRA, S. R. et al. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ V. et al. (eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002, v. 2, p. 1-45.

VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: **GIS Brasil'98**. Curitiba: [s.n.], 1998. 53 p.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, P. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R (eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S. R. Uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial. In: **Curso de atualização em conservação do solo**. Campinas: IAC, 1995. 61 p.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und deformationen in waldböden durch ernteverfahren**. 2005. 107 f. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Kiel.

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

WENDLING, B. et al. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, maio 2005.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.

WOHLENBERG, E. V. et al. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 891-900, set./out. 2004.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal American Society of Agronomy**, Madison, v. 28, n. 5, p. 337-351, may 1936.

7 ANEXOS

ANEXO A – Composição granulométrica de todos os pontos amostrados na microbacia.

Amostra	Sistemas ⁽¹⁾	Data	Coordenadas		C _{ASC} ⁽²⁾	TFSA	A _T	A _G	A _F	S _I	A _{RG}
			X	Y							
-----g kg ⁻¹ -----											
A1	PC	14/2/08	381822	6809668	410	590	268	136	132	398	334
A2	PC	14/2/08	381778	6809703	157	843	269	84	185	455	276
A3	PC	14/2/08	381788	6809743	284	716	298	159	140	353	349
A4	PD	14/2/08	381660	6809756	150	850	262	163	99	452	286
A5	PD	14/2/08	381561	6809837	167	833	296	168	128	427	277
A6	PD	14/2/08	381293	6809661	63	937	217	109	108	381	401
A7	PD	14/2/08	381294	6809579	9	991	192	92	100	409	399
A8	MN	14/2/08	381410	6809572	16	984	177	102	75	322	502
A9	PD	14/2/08	381591	6809576	26	974	254	169	86	343	403
A10	PC	14/2/08	381932	6809491	207	793	302	152	150	477	221
A11	PM	14/2/08	382031	6809529	10	990	159	68	91	570	271
A12	CN	14/2/08	382155	6809585	194	806	280	145	134	407	313
A13	PD	14/2/08	382210	6809723	228	772	300	190	109	412	288
B1	PD	14/2/08	381149	6810011	49	951	236	106	131	446	318
B2	PC	14/2/08	381594	6810418	371	629	202	47	155	329	469
B3	PC	14/2/08	381626	6810392	142	858	231	51	180	463	307
B4	PC	14/2/08	381618	6810342	427	573	426	134	292	379	195
B5	PC	14/2/08	381310	6810154	83	917	238	152	85	395	367
B6	PC	14/2/08	381486	6809987	133	867	280	132	148	406	314
B7	PD	14/2/08	381553	6809844	77	923	253	116	137	440	307
B8	PC	14/2/08	381764	6809906	315	685	288	113	175	408	304
B9	PM	14/2/08	382235	6810245	51	949	219	83	137	487	293
B10	CN	14/2/08	382184	6810297	51	949	230	43	187	510	260
B11	PD	14/2/08	382071	6810216	146	854	286	27	259	470	244
B12	MN	14/2/08	382018	6810121	126	874	230	153	77	449	320
B13	PC	14/2/08	381865	6810177	316	684	242	116	126	406	353
B14	CN	14/2/08	381798	6810342	28	972	155	83	73	611	233
C1	CN	14/5/08	382203	6810744	284	716	291	86	206	556	153
C2	PC	14/5/08	382191	6810689	242	758	218	37	181	572	210
C3	MN	14/5/08	382130	6810558	55	945	637	298	340	243	120
C4	PC	14/5/08	382109	6810714	268	732	491	137	354	391	118
C5	PC	14/5/08	382044	6810611	323	677	168	20	148	666	165
C6	CN	14/5/08	382169	6810772	94	906	349	165	183	480	171
C7	PC	14/5/08	382278	6810368	370	630	302	11	291	527	171
C8	PC	14/5/08	382229	6810301	62	938	183	48	136	593	224
C9	PC	14/5/08	382194	6810148	82	918	299	182	117	487	214
C10	PM	14/5/08	382359	6810169	190	810	188	61	127	583	229
C11	PD	14/5/08	382042	6809912	201	799	280	181	99	508	212
C12	MN	14/5/08	382059	6810023	79	921	286	171	115	494	220
C13	PC	14/5/08	382154	6809819	106	894	222	116	106	394	384
C14	MN	14/5/08	381407	6809463	0	1000	229	136	92	471	301
C15	PD	14/5/08	381160	6809921	35	965	216	88	128	501	283
C16	PC	14/5/08	381858	6810198	208	792	148	83	65	374	478
C17	PC	14/5/08	381895	6809966	68	932	180	79	101	538	282
C18	PD	14/5/08	381921	6810036	240	760	309	47	263	518	173
C19	PC	14/5/08	382096	6810274	246	754	282	160	122	454	263
C20	MN	14/5/08	382110	6810354	76	924	197	80	116	569	234
C21	CN	14/5/08	382084	6810087	69	931	315	182	133	413	272
C22	PD	14/5/08	381642	6809480	31	969	183	103	80	357	460

..continuação..

D1	PD	30/9/08	381454	6810136	265	735	216	27	188	494	290
D2	MN	30/9/08	381485	6810201	182	818	185	87	98	550	265
D3	PC	30/9/08	381583	6810253	318	682	280	30	250	497	222
D4	PC	30/9/08	381703	6810270	259	741	281	68	212	508	212
D5	PC	30/9/08	381761	6810028	303	697	272	77	195	474	254
D6	PM	30/9/08	381467	6809907	195	805	208	137	71	281	511
D7	PD	30/9/08	381666	6809900	311	689	226	109	116	379	396
D8	CN	30/9/08	381588	6810089	163	837	311	59	252	437	252
D9	MN	30/9/08	381722	6810163	234	766	266	121	145	468	265
D10	PC	30/9/08	381892	6810278	332	668	458	104	354	392	151
D11	PM	30/9/08	381960	6809575	288	712	351	141	209	433	217
D12	PM	30/9/08	382080	6809663	359	641	391	185	206	395	214
D13	PM	30/9/08	381909	6809899	178	822	242	123	119	427	331
D14	PC	30/9/08	381889	6809818	192	808	242	129	114	502	255
D15	PC	30/9/08	382286	6810052	175	825	224	114	110	533	244
D16	MN	30/9/08	382241	6810573	320	680	185	20	166	527	288
D17	MN	30/9/08	381976	6810494	383	617	206	12	195	543	250
D18	MN	30/9/08	381930	6809749	567	433	434	268	166	261	304
D19	PC	30/9/08	381790	6809825	281	719	240	106	135	444	316
D20	PD	30/9/08	382248	6809890	215	785	286	164	122	465	249

⁽¹⁾CN = campo nativo; MN = mata nativa; PC = preparo convencional; PD = plantio direto e PM = preparo mínimo; CV = coeficiente de variação.

⁽²⁾C_{ASC} = cascalho (20-2,0 mm); TFSA = terra fina seca ao ar; A_T = areia total (2,0-0,05 mm); A_G = areia grossa (2,0-0,2 mm); A_F = areia fina (0,2-0,05 mm); S_i = silte (0,05-0,002 mm); A_{RG} = argila (<0,002 mm).

ANEXO B – Valores de densidade do solo (Ds), porosidade total (P_T), macroporosidade (M_A), microporosidade (M_I), condutividade hidráulica do solo saturado (Ks), carbono orgânico do solo (CO), grau de flocculação (GF) e permeabilidade do solo ao ar nas tensões de 1 (K_{a1}), 6 (K_{a6}) e 10 kPa (K_{a10}) para cada ponto amostrado (A_M) na microbacia.

A _M	Sist. (1)	Data	Coordenadas		D _s $\frac{Mg}{m^3}$	P _T -----m ³ m ⁻³ -----	M _A	M _I	GF %	CO $\frac{g}{kg}$	K _s	K _{a1}	K _{a6}	K _{a10}
			X	Y										
A1	PC	14/2/08	381822	6809668	1,16	0,56	0,16	0,41	44,4	28,2	211	11	71	89
A2	PC	14/2/08	381778	6809703	0,99	0,58	0,21	0,37	42,7	22,0	197	34	125	141
A3	PC	14/2/08	381788	6809743	1,03	0,62	0,23	0,39	34,0	18,5	276	102	271	313
A4	PD	14/2/08	381660	6809756	1,35	0,50	0,15	0,35	31,5	21,9	190	37	111	133
A5	PD	14/2/08	381561	6809837	1,20	0,57	0,21	0,36	35,5	24,2	413	89	245	283
A6	PD	14/2/08	381293	6809661	1,14	0,59	0,21	0,38	36,1	27,1	254	44	126	150
A7	PD	14/2/08	381294	6809579	1,26	0,51	0,13	0,38	42,1	20,8	197	38	142	199
A8	MN	14/2/08	381410	6809572	.	.	.	.	38,7	47,8	.	.	.	.
A9	PD	14/2/08	381591	6809576	1,24	0,55	0,14	0,40	34,9	22,2	65	2	27	40
A10	PC	14/2/08	381932	6809491	1,24	0,49	0,14	0,35	22,7	16,2	62	0	64	83
A11	PM	14/2/08	382031	6809529	1,13	0,54	0,15	0,39	36,4	17,3	128	5	60	73
A12	CN	14/2/08	382155	6809585	1,08	0,60	0,16	0,43	55,7	29,9	246	49	130	160
A13	PD	14/2/08	382210	6809723	1,17	0,48	0,15	0,33	28,4	24,8	141	18	93	128
B1	PD	14/2/08	381149	6810011	1,30	0,46	0,11	0,35	41,6	17,9	54	32	62	83
B2	PC	14/2/08	381594	6810418	1,00	0,56	0,14	0,42	34,0	14,7	206	44	124	137
B3	PC	14/2/08	381626	6810392	1,16	0,54	0,15	0,39	37,2	16,2	245	19	87	103
B4	PC	14/2/08	381618	6810342	1,14	0,52	0,20	0,32	54,8	14,6	204	26	140	161
B5	PC	14/2/08	381310	6810154	1,16	0,48	0,16	0,32	38,4	21,3	221	42	111	114
B6	PC	14/2/08	381486	6809987	1,15	0,54	0,17	0,37	35,0	18,8	223	61	150	174
B7	PD	14/2/08	381553	6809844	1,30	0,53	0,15	0,38	34,8	21,0	172	34	90	101
B8	PC	14/2/08	381764	6809906	1,05	0,53	0,22	0,31	33,6	22,4	360	35	238	240
B9	PM	14/2/08	382235	6810245	1,15	0,55	0,15	0,40	33,3	12,0	80	7	38	53
B10	CN	14/2/08	382184	6810297	0,96	0,63	0,12	0,51	50,9	30,7	96	21	64	76
B11	PD	14/2/08	382071	6810216	1,06	0,58	0,14	0,44	40,4	20,3	45	32	37	38
B12	MN	14/2/08	382018	6810121	0,96	0,66	0,22	0,44	59,0	54,7	325	43	155	210
B13	PC	14/2/08	381865	6810177	1,05	0,60	0,23	0,37	39,3	22,3	415	139	252	286
B14	CN	14/2/08	381798	6810342	1,12	0,55	0,06	0,49	57,3	33,0	57	4	12	23
C1	CN	14/5/08	382203	6810744	1,09	0,55	0,07	0,48	29,5	29,9	52	11	48	51
C2	PC	14/5/08	382191	6810689	1,09	0,52	0,13	0,39	39,2	15,3	105	7	71	74
C3	MN	14/5/08	382130	6810558	1,10	0,51	0,15	0,36	33,1	12,8	147	25	50	71
C4	PC	14/5/08	382109	6810714	0,95	0,60	0,21	0,39	.	10,1	.	44	194	318
C5	PC	14/5/08	382044	6810611	0,76	0,64	0,30	0,34	71,7	19,9	585	691	1782	2629
C6	CN	14/5/08	382169	6810772	1,09	0,54	0,07	0,47	54,5	34,2	130	24	39	77
C7	PC	14/5/08	382278	6810368	0,94	0,62	0,26	0,36	64,0	16,7	424	173	709	1351
C8	PC	14/5/08	382229	6810301	0,97	0,59	0,23	0,36	39,0	13,7	.	40	307	406
C9	PC	14/5/08	382194	6810148	0,89	0,63	0,25	0,38	45,4	20,3	421	228	606	952
C10	PM	14/5/08	382359	6810169	0,96	0,60	0,24	0,36	36,7	20,5	433	154	537	700
C11	PD	14/5/08	382042	6809912	0,93	0,63	0,29	0,34	27,7	23,5	563	721	1435	1855
C12	MN	14/5/08	382059	6810023	0,70	0,69	0,26	0,43	56,9	85,4	378	248	715	867
C13	PC	14/5/08	382154	6809819	0,90	0,59	0,21	0,38	42,8	36,0	516	196	468	528
C14	MN	14/5/08	381407	6809463	0,88	0,58	0,19	0,39	.	67,9	373	71	193	209
C15	PD	14/5/08	381160	6809921	1,18	0,51	0,19	0,32	25,1	14,2	406	342	458	474
C16	PC	14/5/08	381858	6810198	0,95	0,61	0,31	0,29	37,1	22,9	470	484	1177	1193

..continuação..

C17	PC	14/5/08	381895	6809966	0,96	0,61	0,27	0,33	32,2	18,0	338	130	668	738
C18	PD	14/5/08	381921	6810036	0,98	0,60	0,27	0,33	25,5	15,7	276	86	268	309
C19	PC	14/5/08	382096	6810274	0,93	0,60	0,28	0,33	14,7	16,7	410	505	1372	1765
C20	MN	14/5/08	382110	6810354	0,79	0,61	0,23	0,38	45,1	37,4	612	646	1057	1177
C21	CN	14/5/08	382084	6810087	1,07	0,54	0,11	0,43	29,7	20,7	241	58	118	185
C22	PD	14/5/08	381642	6809480	1,03	0,58	0,25	0,33	34,8	21,4	489	403	1287	1345
D1	PD	30/9/08	381454	6810136	0,95	0,58	0,14	0,43	43,6	23,9	249	87	284	395
D2	MN	30/9/08	381485	6810201	0,89	0,55	0,15	0,40	51,0	41,5	421	120	254	323
D3	PC	30/9/08	381583	6810253	0,93	0,60	0,25	0,35	30,6	21,0	269	237	627	702
D4	PC	30/9/08	381703	6810270	0,97	0,58	0,21	0,36	30,1	19,8	478	440	934	964
D5	PC	30/9/08	381761	6810028	0,85	0,61	0,27	0,34	32,3	28,7	513	505	1233	1528
D6	PM	30/9/08	381467	6809907	1,16	0,54	0,14	0,40	33,6	22,9	351	167	245	279
D7	PD	30/9/08	381666	6809900	1,05	0,59	0,20	0,39	19,9	20,6	409	259	418	531
D8	CN	30/9/08	381588	6810089	0,98	0,58	0,05	0,53	39,5	35,8	74	110	123	161
D9	MN	30/9/08	381722	6810163	0,92	0,61	0,17	0,44	30,4	37,6	300	67	251	379
D10	PC	30/9/08	381892	6810278	1,03	0,56	0,23	0,33	.	12,8	203	188	1048	1498
D11	PM	30/9/08	381960	6809575	1,10	0,54	0,20	0,34	22,8	16,1	453	294	575	708
D12	PM	30/9/08	382080	6809663	1,04	0,57	0,20	0,37	41,5	25,1	412	238	631	732
D13	PM	30/9/08	381909	6809899	1,24	0,50	0,03	0,46	21,1	22,7	61	10	29	81
D14	PC	30/9/08	381889	6809818	1,05	0,55	0,21	0,34	34,4	15,8	271	143	472	713
D15	PC	30/9/08	382286	6810052	0,93	0,61	0,25	0,36	36,6	23,2	382	205	570	622
D16	MN	30/9/08	382241	6810573	0,59	0,62	0,31	0,31	62,3	67,1	571	589	1163	1376
D17	MN	30/9/08	381976	6810494	1,00	0,55	0,17	0,38	53,9	57,7	402	180	198	226
D18	MN	30/9/08	381930	6809749	0,68	0,64	0,26	0,38	26,1	59,0	566	629	1315	1710
D19	PC	30/9/08	381790	6809825	1,03	0,56	0,17	0,40	36,0	24,7	273	129	308	397
D20	PD	30/9/08	382248	6809890	1,08	0,53	0,17	0,37	35,0	26,2	293	113	304	323

⁽¹⁾CN = campo nativo; MN = mata nativa; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; PM = preparo mínimo; e CV = coeficiente de variação.

ANEXO C – Valores de umidade volumétrica do solo nas tensões de 0 kPa (θ_{sat}), 1 kPa (θ_1), 6 kPa (θ_6), 10 kPa (θ_{10}), 500 kPa (θ_{500}), 1000 kPa (θ_{1000}), 1500 kPa (θ_{1500}) e água disponível (AD) para cada ponto amostrado na microbacia.

Amostra	Sistema ⁽¹⁾	Data	Coordenadas		θ_{sat}	θ_1	θ_6	θ_{10}	θ_{500}	θ_{1000}	θ_{1500}	AD
			X	Y								
A1	PC	14/2/08	381822	6809668	0,56	0,48	0,41	0,39	0,31	0,25	0,22	0,17
A2	PC	14/2/08	381778	6809703	0,58	0,50	0,37	0,34	0,21	0,19	0,17	0,17
A3	PC	14/2/08	381788	6809743	0,62	0,50	0,39	0,38	0,21	0,18	0,17	0,21
A4	PD	14/2/08	381660	6809756	0,50	0,43	0,35	0,34	0,42	0,29	0,22	0,12
A5	PD	14/2/08	381561	6809837	0,57	0,46	0,36	0,35	0,22	0,20	0,18	0,17
A6	PD	14/2/08	381293	6809661	0,59	0,50	0,38	0,36	0,25	0,24	0,23	0,13
A7	PD	14/2/08	381294	6809579	0,51	0,44	0,38	0,36	0,26	0,24	0,23	0,14
A8	MN	14/2/08	381410	6809572	.	.	.	.	0,28	0,23	0,21	.
A9	PD	14/2/08	381591	6809576	0,55	0,47	0,40	0,39	0,27	0,21	0,18	0,22
A10	PC	14/2/08	381932	6809491	0,49	0,44	0,35	0,33	0,31	0,26	0,23	0,10
A11	PM	14/2/08	382031	6809529	0,54	0,48	0,39	0,37	0,29	0,23	0,19	0,18
A12	CN	14/2/08	382155	6809585	0,60	0,51	0,43	0,40	0,24	0,20	0,18	0,22
A13	PD	14/2/08	382210	6809723	0,48	0,42	0,33	0,29	0,24	0,20	0,18	0,11
B1	PD	14/2/08	381149	6810011	0,46	0,43	0,35	0,31	0,24	0,21	0,20	0,12
B2	PC	14/2/08	381594	6810418	0,56	0,48	0,42	0,41	0,30	0,24	0,21	0,20
B3	PC	14/2/08	381626	6810392	0,54	0,46	0,39	0,37	0,30	0,25	0,22	0,15
B4	PC	14/2/08	381618	6810342	0,52	0,44	0,32	0,35	0,26	0,20	0,17	0,18
B5	PC	14/2/08	381310	6810154	0,48	0,40	0,32	0,30	0,26	0,18	0,14	0,15
B6	PC	14/2/08	381486	6809987	0,54	0,45	0,37	0,35	0,26	0,19	0,15	0,20
B7	PD	14/2/08	381553	6809844	0,53	0,45	0,38	0,35	0,25	0,22	0,21	0,14
B8	PC	14/2/08	381764	6809906	0,53	0,42	0,31	0,28	0,31	0,26	0,23	0,05
B9	PM	14/2/08	382235	6810245	0,55	0,48	0,40	0,39	0,24	0,19	0,17	0,22
B10	CN	14/2/08	382184	6810297	0,63	0,57	0,51	0,49	0,17	0,15	0,13	0,36
B11	PD	14/2/08	382071	6810216	0,58	0,52	0,44	0,42	0,27	0,21	0,18	0,24
B12	MN	14/2/08	382018	6810121	0,66	0,55	0,44	0,42	0,22	0,18	0,14	0,28
B13	PC	14/2/08	381865	6810177	0,60	0,46	0,37	0,35	0,26	0,23	0,20	0,15
B14	CN	14/2/08	381798	6810342	0,55	0,52	0,49	0,47	0,32	0,23	0,18	0,29
C1	CN	14/5/08	382203	6810744	0,55	0,53	0,48	0,44	0,34	0,22	0,15	0,29
C2	PC	14/5/08	382191	6810689	0,52	0,47	0,39	0,36	0,26	0,22	0,18	0,17
C3	MN	14/5/08	382130	6810558	0,51	0,47	0,36	0,32	0,24	0,21	0,20	0,12
C4	PC	14/5/08	382109	6810714	0,60	0,50	0,39	0,33	0,27	0,18	0,13	0,20
C5	PC	14/5/08	382044	6810611	0,64	0,47	0,34	0,30	0,21	0,17	0,15	0,14
C6	CN	14/5/08	382169	6810772	0,54	0,52	0,47	0,42	0,22	0,19	0,15	0,26
C7	PC	14/5/08	382278	6810368	0,62	0,48	0,36	0,32	0,31	0,21	0,16	0,16
C8	PC	14/5/08	382229	6810301	0,59	0,48	0,36	0,33	0,26	0,19	0,15	0,18
C9	PC	14/5/08	382194	6810148	0,63	0,51	0,38	0,32	0,25	0,21	0,18	0,14
C10	PM	14/5/08	382359	6810169	0,60	0,46	0,36	0,33	0,32	0,20	0,13	0,19
C11	PD	14/5/08	382042	6809912	0,62	0,43	0,33	0,31	0,29	0,20	0,16	0,16
C12	MN	14/5/08	382059	6810023	0,64	0,49	0,38	0,35	0,26	0,18	0,15	0,19
C13	PC	14/5/08	382154	6809819	0,59	0,46	0,38	0,35	0,21	0,19	0,18	0,17
C14	MN	14/5/08	381407	6809463	0,57	0,48	0,38	0,36	0,28	0,22	0,20	0,16
C15	PD	14/5/08	381160	6809921	0,51	0,39	0,32	0,31	0,15	0,12	0,10	0,21
C16	PC	14/5/08	381858	6810198	0,57	0,38	0,26	0,25	0,22	0,15	0,12	0,12
C17	PC	14/5/08	381895	6809966	0,61	0,45	0,33	0,32	0,27	0,18	0,14	0,18
C18	PD	14/5/08	381921	6810036	0,60	0,48	0,33	0,30	0,23	0,16	0,12	0,19
C19	PC	14/5/08	382096	6810274	0,60	0,46	0,33	0,31	0,16	0,14	0,13	0,18
C20	MN	14/5/08	382110	6810354	0,59	0,41	0,36	0,33	0,33	0,26	0,22	0,10

..continuação..

C21	CN	14/5/08	382084	6810087	0,54	0,48	0,43	0,39	0,27	0,20	0,15	0,24
C22	PD	14/5/08	381642	6809480	0,58	0,41	0,33	0,31	0,30	0,21	0,16	0,15
D1	PD	30/9/08	381454	6810136	0,58	0,52	0,43	0,38	0,35	0,22	0,14	0,24
D2	MN	30/9/08	381485	6810201	0,55	0,45	0,40	0,34	0,25	0,24	0,23	0,11
D3	PC	30/9/08	381583	6810253	0,60	0,45	0,35	0,32	0,25	0,17	0,12	0,21
D4	PC	30/9/08	381703	6810270	0,58	0,43	0,36	0,32	0,24	0,17	0,13	0,19
D5	PC	30/9/08	381761	6810028	0,61	0,44	0,34	0,29	0,17	0,12	0,11	0,19
D6	PM	30/9/08	381467	6809907	0,54	0,42	0,40	0,37	0,28	0,21	0,17	0,21
D7	PD	30/9/08	381666	6809900	0,59	0,44	0,39	0,37	0,29	0,22	0,18	0,19
D8	CN	30/9/08	381588	6810089	0,56	0,53	0,51	0,45	0,25	0,21	0,18	0,27
D9	MN	30/9/08	381722	6810163	0,61	0,51	0,44	0,40	0,23	0,18	0,15	0,24
D10	PC	30/9/08	381892	6810278	0,56	0,45	0,33	0,30	0,27	0,20	0,16	0,14
D11	PM	30/9/08	381960	6809575	0,54	0,42	0,34	0,32	0,29	0,20	0,14	0,17
D12	PM	30/9/08	382080	6809663	0,57	0,46	0,37	0,34	0,24	0,17	0,14	0,21
D13	PM	30/9/08	381909	6809899	0,50	0,48	0,46	0,43	0,19	0,14	0,12	0,31
D14	PC	30/9/08	381889	6809818	0,55	0,43	0,34	0,29	0,34	0,27	0,23	0,06
D15	PC	30/9/08	382286	6810052	0,61	0,46	0,36	0,34	0,28	0,23	0,20	0,14
D16	MN	30/9/08	382241	6810573	0,55	0,31	0,24	0,22	0,34	0,24	0,18	0,04
D17	MN	30/9/08	381976	6810494	0,55	0,45	0,38	0,34	0,29	0,23	0,20	0,14
D18	MN	30/9/08	381930	6809749	0,58	0,38	0,32	0,26	0,24	0,18	0,15	0,11
D19	PC	30/9/08	381790	6809825	0,56	0,47	0,40	0,35	0,26	0,19	0,15	0,20
D20	PD	30/9/08	382248	6809890	0,53	0,44	0,37	0,35	0,35	0,21	0,12	0,23

⁽¹⁾CN = campo nativo; MN = mata nativa; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; PM = preparo mínimo; e CV = coeficiente de variação.

ANEXO D – Valores das variáveis físico-hídricas determinadas na fração de 1,0-2,0 mm de diâmetro para cada ponto amostrado na microbacia.

Amostra	Sistema ⁽¹⁾	Data	Coordenadas		A _T ⁽²⁾	A _G	A _F	S _I	A _{RG}	EA	CO	GF	
			X	Y									
											-----g kg ⁻¹ -----		
											%	g kg ⁻¹	%
A1	PC	14/2/08	381822	6809668	369	291	77	335	297	92,5	22,8	25,9	
A2	PC	14/2/08	381778	6809703	346	209	137	404	251	90,1	17,7	31,3	
A3	PC	14/2/08	381788	6809743	404	314	89	292	305	85,2	18,1	20,5	
A4	PD	14/2/08	381660	6809756	315	237	77	416	269	89,7	20,3	40,2	
A5	PD	14/2/08	381561	6809837	329	225	104	403	268	91,4	20,1	17,9	
A6	PD	14/2/08	381293	6809661	229	147	82	382	389	95,6	22,6	27,6	
A7	PD	14/2/08	381294	6809579	180	97	83	407	412	90,9	21,1	36,3	
A8	MN	14/2/08	381410	6809572	186	121	65	319	496	95,4	42,9	36,3	
A9	PD	14/2/08	381591	6809576	230	152	78	352	419	95,1	21,2	33,4	
A10	PC	14/2/08	381932	6809491	397	302	95	393	209	73,5	14,4	13,2	
A11	PM	14/2/08	382031	6809529	185	115	70	544	271	83,2	17,1	30,6	
A12	CN	14/2/08	382155	6809585	397	328	69	360	243	98,7	24,7	32,3	
A13	PD	14/2/08	382210	6809723	343	244	99	349	308	93,8	21,1	13,7	
B1	PD	14/2/08	381149	6810011	253	165	88	429	318	88,6	18,3	34,0	
B2	PC	14/2/08	381594	6810418	199	90	109	330	471	90,8	15,5	30,5	
B3	PC	14/2/08	381626	6810392	257	109	148	460	283	85,8	18,4	35,2	
B4	PC	14/2/08	381618	6810342	554	349	205	309	137	80,8	10,6	36,1	
B5	PC	14/2/08	381310	6810154	322	266	56	352	326	94,7	13,6	28,0	
B6	PC	14/2/08	381486	6809987	338	226	112	373	289	90,9	16,5	27,6	
B7	PD	14/2/08	381553	6809844	265	165	100	433	302	92,9	20,7	20,2	
B8	PC	14/2/08	381764	6809906	335	209	127	370	295	91,8	19,7	26,8	
B9	PM	14/2/08	382235	6810245	226	128	98	460	314	81,2	16,2	28,7	
B10	CN	14/2/08	382184	6810297	226	52	173	526	248	96,4	27,9	53,0	
B11	PD	14/2/08	382071	6810216	319	61	259	456	225	90,2	16,4	26,9	
B12	MN	14/2/08	382018	6810121	289	232	58	386	324	96,5	51,3	43,3	
B13	PC	14/2/08	381865	6810177	300	232	68	345	355	91,3	18,6	33,0	
B14	CN	14/2/08	381798	6810342	189	118	71	552	259	95,6	29,0	56,1	
C1	CN	14/5/08	382203	6810744	315	146	169	533	152	91,5	27,6	48,1	
C2	PC	14/5/08	382191	6810689	260	109	152	545	194	77,8	14,6	26,2	
C3	MN	14/5/08	382130	6810558	634	441	193	240	126	85,6	16,5	17,1	
C4	PC	14/5/08	382109	6810714	543	313	230	342	115	71,0	7,8	.	
C5	PC	14/5/08	382044	6810611	200	42	159	643	157	89,8	18,7	53,9	
C6	CN	14/5/08	382169	6810772	328	149	179	500	172	96,0	29,1	53,4	
C7	PC	14/5/08	382278	6810368	367	78	290	485	148	88,3	12,7	55,5	
C8	PC	14/5/08	382229	6810301	197	81	116	573	229	66,8	14,8	36,9	
C9	PC	14/5/08	382194	6810148	289	173	116	496	215	89,9	19,2	39,1	
C10	PM	14/5/08	382359	6810169	214	93	120	546	240	84,6	20,6	38,6	
C11	PD	14/5/08	382042	6809912	426	367	59	224	350	93,6	21,9	57,1	
C12	MN	14/5/08	382059	6810023	287	181	105	496	217	94,5	87,9	50,5	
C13	PC	14/5/08	382154	6809819	231	131	100	408	361	96,0	28,3	32,9	
C14	MN	14/5/08	381407	6809463	209	120	89	481	311	93,1	58,5	.	
C15	PD	14/5/08	381160	6809921	202	110	93	516	282	78,8	13,8	21,1	
C16	PC	14/5/08	381858	6810198	159	115	44	351	490	95,2	21,7	36,5	
C17	PC	14/5/08	381895	6809966	199	113	86	525	276	85,7	16,4	29,7	
C18	PD	14/5/08	381921	6810036	349	92	256	474	177	93,0	13,5	24,9	
C19	PC	14/5/08	382096	6810274	279	156	124	460	261	82,9	14,2	15,5	
C20	MN	14/5/08	382110	6810354	213	107	106	555	232	93,5	39,4	42,6	
C21	CN	14/5/08	382084	6810087	312	197	115	438	250	92,3	15,7	22,7	

..continuação..

C22	PD	14/5/08	381642	6809480	174	114	60	355	471	95,4	21,8	33,5
D1	PD	30/9/08	381454	6810136	244	56	188	477	279	92,3	20,2	40,5
D2	MN	30/9/08	381485	6810201	227	145	82	521	252	93,8	39,4	37,6
D3	PC	30/9/08	381583	6810253	337	96	240	452	211	83,2	16,8	28,3
D4	PC	30/9/08	381703	6810270	332	144	188	473	195	92,5	16,8	19,4
D5	PC	30/9/08	381761	6810028	315	131	184	445	241	95,0	22,8	25,6
D6	PM	30/9/08	381467	6809907	254	200	54	273	473	89,5	20,8	32,8
D7	PD	30/9/08	381666	6809900	251	155	95	370	380	85,7	19,9	19,7
D8	CN	30/9/08	381588	6810089	329	88	242	420	251	94,8	30,7	34,9
D9	MN	30/9/08	381722	6810163	321	193	128	427	252	93,5	29,3	24,5
D10	PC	30/9/08	381892	6810278	506	243	263	361	133	68,3	12,2	.
D11	PM	30/9/08	381960	6809575	300	143	157	501	199	82,5	11,7	21,9
D12	PM	30/9/08	382080	6809663	470	351	119	342	188	90,0	19,7	28,0
D13	PM	30/9/08	381909	6809899	270	164	106	371	360	74,4	22,4	29,1
D14	PC	30/9/08	381889	6809818	273	165	108	483	244	79,2	13,8	26,7
D15	PC	30/9/08	382286	6810052	333	251	82	447	220	84,1	19,3	23,7
D16	MN	30/9/08	382241	6810573	200	18	182	538	262	95,0	53,6	54,7
D17	MN	30/9/08	381976	6810494	267	47	220	508	225	95,2	44,5	44,7
D18	MN	30/9/08	381930	6809749	339	215	124	309	352	91,4	44,3	37,7
D19	PC	30/9/08	381790	6809825	280	161	118	439	281	86,1	19,8	22,2
D20	PD	30/9/08	382248	6809890	361	269	92	405	234	89,1	20,8	28,9

⁽¹⁾CN = campo nativo; MN = mata nativa; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; PM = preparo mínimo; e CV = coeficiente de variação.

⁽²⁾A_T = areia total (2,0-0,05 mm); A_G = areia grossa (2,0-0,2 mm); A_F = areia fina (0,2-0,05 mm); S_I = silte (0,05-0,002 mm); A_{RG} = argila (<0,002 mm); EA = estabilidade de agregados; CO = carbono orgânico; e GF = grau de floculação.

ANEXO E – Tensão de cisalhamento do solo e umidade gravimétrica nos diferentes sistemas de manejo do solo da microbacia.

Ponto	Cobertura do solo ⁽¹⁾	Coordenadas		Tensão de cisalhamento kPa	Umidade gravimétrica g g ⁻¹
		X	Y		
1	CB	381358	6809509	4,1	0,17
2	MN	381430	6809473	5,6	0,66
3	MN	381422	6809626	4,1	0,53
4	CB	381325	6809566	6,2	0,29
5	CB	381329	6809360	5,5	0,33
6	CV	381210	6809888	1,2	0,20
7	CB	381165	6809924	8,0	0,24
8	CB	381376	6810098	3,1	0,17
9	CB	381376	6809913	8,7	0,27
10	CB	381551	6809878	6,8	0,21
11	CB	381537	6809726	12,3	0,28
12	CV	381683	6809727	7,6	0,10
13	CB	381827	6809715	5,1	0,16
14	OS	381809	6809658	6,6	0,21
15	CB	381694	6809640	8,3	0,16
16	CB	381933	6809472	8,3	0,24
17	CB	381960	6809575	7,4	0,16
18	CB	382026	6809502	9,2	0,24
19	CB	382143	6809498	9,1	0,16
20	CN	382154	6809544	37,2	0,37
21	CV	382197	6809772	2,0	0,16
22	CV	382131	6809732	2,6	0,16
23	CB	382080	6809663	4,9	0,22
24	CB	382248	6809890	8,8	0,22
25	CV	382263	6809914	1,5	0,06
26	OS	382359	6810121	3,7	0,18
27	CB	382272	6810327	7,5	0,27
28	CB	382285	6810242	10,0	0,23
29	CB	382277	6810150	10,7	0,29
30	MN	382241	6810572	6,8	0,60
31	MN	381976	6810494	6,7	0,60
32	MN	381333	6809751	8,0	0,47
33	CB	381485	6810201	6,6	0,32
34	CB	381454	6810136	2,9	0,21
35	CB	381583	6810253	3,1	0,26
36	CB	381635	6810319	3,0	0,26
37	OS	381516	6810373	2,7	0,15
38	OS	381636	6810393	3,9	0,15
39	CB	381704	6810395	10,0	0,5
40	OS	381703	6810270	6,6	0,14
41	MN	381801	6810336	2,9	0,29
42	CB	381852	6810262	5,2	0,20
43	OS	381859	6810187	2,1	0,08
44	CB	381761	6810028	3,9	0,16
45	CB	381595	6809908	7,0	0,10
46	CV	381722	6809916	4,8	0,12
47	CB	381927	6809992	7,1	0,21
48	CB	381898	6809923	3,3	0,22
49	CV	381790	6809825	3,2	0,09

..continuação..

50	CB	381886	6809824	7,9	0,15
51	CB	381956	6809878	3,8	0,20
52	CB	382004	6809904	7,3	0,27
53	MN	382065	6810003	41,3	0,62
54	CN	382085	6810045	31,5	0,62
55	CB	381963	6810080	7,0	0,20
56	CB	381853	6810326	4,9	0,20
57	CV	381882	6810345	1,3	0,09
58	OS	382109	6810627	8,4	0,21
59	OS	382069	6810585	9,1	0,21
60	OS	382016	6810641	8,8	0,21
61	CB	382056	6810672	7,4	0,28
62	CN	382174	6810736	39,3	0,39
63	CN	382201	6810704	33,9	0,39
64	CB	382182	6810641	6,8	0,24
65	CB	382203	6810124	4,3	0,28
66	OS	382136	6810237	3,1	0,05
67	CB	382093	6810286	9,4	0,29
68	MN	382118	6810319	24,1	0,51
69	CB	381600	6809550	27,5	0,14
70	CB	381627	6809483	6,0	0,27

⁽¹⁾CB = cobertura de inverno; CN = campo nativo; MN = mata nativa; RV = revolvido; e PS = pousio.