

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FÍSICA**

**PROPRIEDADES DE RETENÇÃO E CONDUÇÃO DE ÁGUA EM
SOLOS, SOB CONDIÇÕES DE CAMPO E EM FORMA DE
AGREGADOS, SUBMETIDOS AOS PLANTIOS CONVENCIONAL E
DIRETO**

ROSILENE DOS SANTOS

**PONTA GROSSA
2008**

ROSILENE DOS SANTOS

**PROPRIEDADES DE RETENÇÃO E CONDUÇÃO DE ÁGUA EM
SOLOS, SOB CONDIÇÕES DE CAMPO E EM FORMA DE
AGREGADOS, SUBMETIDOS AOS PLANTIOS CONVENCIONAL E
DIRETO**

Dissertação apresentada para obtenção do crédito final na conclusão de Mestrado em Ciências, Área de Concentração: Física, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Professor Orientador: Dr. Fábio Augusto Meira Cássaro

**PONTA GROSSA
2008**

Ficha Catalográfica Elaborada pelo Setor de Processos Técnicos BICEN/UEPG

S237p Santos, Rosilene dos
Propriedades de retenção e condução de água em solos, sob condições de campo e em forma de agregados, submetidos aos plantios convencional e direto ./ Rosilene dos Santos . Ponta Grossa, 2008.
102f.
Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração : Física), Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Meira Cássaro

1. Condutividade hidráulica. 2. Curva de retenção.
3. Agregados de solo. I. Cássaro, Fábio Augusto Meira II. T.

CDD: 627

TERMO DE APROVAÇÃO

ROSILENE DOS SANTOS

**“PROPRIEDADES DE RETENÇÃO E CONDUÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS, SOB
CONDIÇÕES DE CAMPO E EM FORMA DE AGREGADOS, SUBMETIDOS AOS
PLANTIOS CONVENCIONAL E DIRETO”.**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências - Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.

Orientador:



Prof. Dr. Fábio Augusto Meira Cássaro
Departamento de Física, UEPG/PR



Prof. Dr. Francisco Carlos Serbena
Departamento de Física, UEPG/PR



Prof. Dr. Jadir Aparecido Rosa
IAPAR/PR

Ponta Grossa, 28 de janeiro de 2008.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela capacitação e sustentação.

Aos amigos, verdadeiros irmãos, por compartilharem das mesmas dificuldades e conquistas, tendo sempre uma palavra de apoio e coragem.

Em especial, àquelas pessoas que realmente fizeram a diferença: Emerson C. Mildenberg e Josué Bello, amigos fiéis, pelos conselhos e, principalmente, pelo carinho a mim dedicado.

A minha família, pela confiança, motivação e compreensão nas horas de ausência.

Ao Orientador Prof. Dr. Fábio A. M. Cássaro, pelo ensinamento e orientações no transcorrer deste trabalho.

A toda equipe do Instituto Agrônomo do Paraná, por abrirem as portas para nossa pesquisa.

Ao corpo docente e aos funcionários do DEFIS, por toda atenção e cooperação.

A toda equipe do Programa de Pós-Graduação da UEPG, por tornarem possível a realização deste trabalho.

A Banca examinadora de Qualificação, pelas críticas e sugestões.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo durante o decorrer deste trabalho.

"Cuidas da terra e a regas; fartamente a enriqueces;
Os riachos de Deus transbordam, para que nunca falte o trigo;
Pois assim ordenaste.
Encharca os seus sulcos (poros) e
aplainas os seus torrões (agregados)
Tu a amoleces com chuvas e abençoas as suas colheitas."

Salmo 65:9-10

RESUMO

É indiscutível a importância de estudos e pesquisas que visam o entendimento das propriedades físicas e hídricas do solo e de que tentem correlacioná-las com seus atributos físicos. Este trabalho apresenta a utilização da metodologia apresentada em Leeds-Harrison & Youngs (1997), desenvolvida para a determinação da condutividade hidráulica saturada ao nível de agregados de solo e o uso do Permeômetro de Guelph para medidas dessa propriedade em campo. Nesta pesquisa foram investigados agregados de solo submetidos aos sistemas de plantio convencional e direto. Para correlacionar a condutividade hidráulica do solo com suas propriedades de retenção, as curvas de retenção e de distribuição de poros dos agregados próximos à condição de saturação foram feitas através de um sistema baseado na idéia de um funil de placa porosa ou funil de Haines. Também foram realizadas medidas da densidade global, porosidade total, macroporosidade e microporosidade dos agregados investigados. Os resultados obtidos mostraram que o plantio convencional apresentou em média maior valor da condutividade hidráulica saturada comparada com o plantio direto, tanto em condições de campo como na forma de agregados. O plantio direto apresentou uma capacidade de retenção maior comparada com o plantio convencional. Isto pode ser devido ao maior número de microporos encontrados neste tipo de plantio. As curvas de distribuição de poros mostram em média um número maior de poros menores nos agregados do plantio direto, o que pode ter determinado seu menor valor de condutividade hidráulica em relação ao plantio convencional. O tipo de manejo pode propiciar a formação de poros com diâmetros maiores, os quais, em princípio, permitem maiores valores de condutividade hidráulica saturada. No entanto, devido às desestruturações impostas às amostras de solo, nada se pode afirmar a respeito da continuidade desses tipos de poros.

Palavras-chave: condutividade hidráulica, curva de retenção e agregados de solo.

ABSTRACT

It has been unquestionable the importance of the studies and researches that seek for the understanding of the physical and hydraulic properties of the soil and that these studies and researches try to correlate them with the soil physical attributes. This work presents the use of the methodology presented in Leeds-Harrison et al. (1994), developed for the determination of the saturated hydraulic conductivity at the level of aggregates of the soil and the use of Permeâmetro of Guelph for measures of that property in field.. In this work the aggregates of the soil were investigated submitted to systems conventional tillage and direct tillage. To correlate the hydraulic conductivity of the soil with its retention properties, the retention curves and distribution of pores of the aggregate near the saturation condition they were done through a system based on the idea of a funnel of porous plate or funnel of Haines. Measures of the bulk density, total porosity, macroporosity and microporosity of the investigated aggregates were also accomplished. The obtained results showed that the conventional tillage presented larger value of the saturated hydraulic conductivity on average compared with the direct tillage, so much in field conditions as in the form of aggregates. The direct tillage presented a capacity of larger retention compared to the conventional tillage. This can be due to the largest amount of microporous found in this tillage type. The pores distribution curves shows on average a larger amount of smaller pores in the aggregates of the direct tillage, what might have determined its smallest value of hydraulic conductivity in relation to the conventional tillage. The tillage type can propitiate the formation of pores with larger diameters, in which, firstly, allow larger values of saturated hydraulic conductivity. However, due to the no structures imposed to the soil samples, nothing can be affirmed in regard to the continuity of these types of pores.

Key - words: hydraulic conductivity, retention curves and soil aggregates.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Amostra de solo indicando as frações de sólido, líquido e gasoso.....	18
Figura 1.2 - Triângulo de classificação textural.....	19
Figura 1.3 - Tipos de agregados.....	22
Figura 1.4 - Curvas de retenção de água para solos de texturas e condições diferentes.....	23
Figura 1.5 - Retenção da água por agregados após drenagem.....	28
Figura 1.6 - Procedimento para saturação e aplicação de uma tensão h em uma amostra de solo saturada.....	31
Figura 1.7 - Curva de retenção de um solo.....	33
Figura 1.8 - Curva diferencial da curva de retenção do solo da figura anterior.....	34
Figura 1.9 - Arranjo experimental para medir a condutividade hidráulica de agregados de solo	35
Figura 3.1 - Solo cultivado sob sistema de plantio convencional.....	47
Figura 3.2 - Solo cultivado sob sistema de plantio direto.....	48
Figura 3.3 - Esquema do funil de Haines modificado.....	49
Figura 3.4 - Método da parafina para determinar o volume de agregados e calcular a densidade do solo.....	51
Figura 3.5 - Esquema do arranjo experimental desenvolvido por Leeds-Harrison et al. (1997).....	59
Figura 3.6 – Esquema ilustrativo do Permeâmetro de Guelph.....	61
Figura 4.1 - Condutividade hidráulica saturada em função da densidade para os solos sob plantio convencional e direto em condições de campo.....	66
Figura 4.2 - Condutividade hidráulica saturada em função da densidade para os agregados de solo sob plantio convencional e direto.....	67
Figura 4.3 - Condutividade hidráulica saturada em função da macroporosidade para os solos sob plantio convencional e direto em condições de campo.....	68
Figura 4.4 - Condutividade hidráulica saturada em função da macroporosidade para os agregados de solo sob plantio convencional e direto.....	68
Figura 4.5 - Condutividade hidráulica saturada em função da porosidade total para os solos sob plantio convencional e direto em condições de campo.....	71
Figura 4.6 - Condutividade hidráulica saturada em função da porosidade total para os agregados de solo sob plantio convencional e direto.....	72

Figura 4.7 - Condutividade hidráulica saturada em função da microporosidade para os solos sob plantio convencional e direto em condições de campo.....	73
Figura 4.8 - Condutividade hidráulica saturada em função da microporosidade para os agregados de solo sob plantio convencional e direto.....	73
Figura 4.9 - Curva de retenção normalizada para os agregados do plantio convencional.....	76
Figura 4.10 - FCAs para agregados do plantio convencional.....	77
Figura 4.11 - Curva de retenção normalizada para os agregados do plantio direto.....	77
Figura 4.12 - FCAs para agregados do plantio direto.....	78
Figura 4.13 - Curva de Retenção normalizada para os valores médios dos parâmetros da equação de van Genuchten.....	79
Figura 4.14 – FCAs utilizando-se os valores médios para os dois plantios investigados.....	79
Figura 4.15 - Parâmetros da equação de van Genuchten em função da quantidade de argila.....	84
Figura 4.16 - Parâmetros da equação de van Genuchten em função da densidade global.....	85
Figura 4.17 - Curvas de retenção para agregados do solo do solo, com maior e menor densidade dentre os investigados, tanto no plantio convencional quanto no direto.....	88
Figura 4.18 - FCAs para agregados de solo do plantio convencional e direto.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores para a condutividade hidráulica saturada, densidade global, porosidade total, a macroporosidade e microporosidade para o solo sob plantio convencional.....	63
Tabela 2 - Valores para a condutividade hidráulica saturada, densidade global, porosidade total, a macroporosidade e microporosidade para os agregados de solo sob plantio convencional.....	63
Tabela 3 - Valores para a condutividade hidráulica saturada, densidade global, porosidade total, a macroporosidade e microporosidade para o solo sob plantio direto.....	64
Tabela 4 - Valores para a condutividade hidráulica saturada, densidade global, porosidade total, a macroporosidade e microporosidade para os agregados de solo sob plantio direto.....	64
Tabela 5 - Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten para análise das curvas de retenção do plantio convencional.....	82
Tabela 6 - Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten para análise das curvas de retenção do plantio direto.....	82
Tabela 7 - Parâmetros médios da equação de van Genuchten para o sistema de plantio convencional e direto.....	82
Tabela 8 – Valores médios para as propriedades analisadas nos dois sistemas de plantio.....	90

LISTA DE SÍMBOLOS

M_t – Massa total

m_s – Massa das partículas sólidas

m_l – Massa da fração líquida

m_g – Massa da fração gasosa

V_t – Volume total

V_s – Volume das partículas sólidas

V_l – Volume da fração líquida

V_g – Volume da fração gasosa

ρ – Densidade de partículas

ρ_s – Densidade do solo

d – Densidade

α_s – Porosidade

m_{sat} – Massa saturada

m_{60cm} – Massa da amostra submetida a tensão de 60cm de água

U – Umidade a base de massa

θ – Umidade a base de volume ou conteúdo de água no solo

σ – Tensão superficial

R, r – raio

g – Aceleração da gravidade

ψ_m, h – Potencial matricial, pressão ou tensão de sucção

θ_s – Umidade de saturação

θ_r – Umidade Residual

α, n, m – Parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten

K – Condutividade hidráulica

K_{sat} – Condutividade hidráulica saturada

Q – Fluxo de água

S – Sortividade

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	15
CAPÍTULO 1.....	17
1 TEORIA.....	17
1.1 O SOLO.....	17
1.2 TEXTURA DO SOLO.....	19
1.3 DENSIDADE DE PARTÍCULAS.....	24
1.4 DENSIDADE DO SOLO.....	24
1.5 POROSIDADE, MICROPOROSIDADE E MACROPOROSIDADE DO SOLO.....	25
1.6 UMIDADE DO SOLO.....	26
1.7 RETENÇÃO DA ÁGUA PELO SOLO.....	28
1.8 POTENCIAL MATRICIAL.....	29
1.9 CURVA DE RETENÇÃO E FUNÇÃO CAPACIDADE DE ÁGUA.....	30
1.10 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	34
CAPÍTULO 2.....	38
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	38
2.1 A INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE MANEJO NAS PROPRIEDADES DO SOLO.....	38
2.2 FORMAÇÃO DE AGREGADOS NO SOLO.....	39
2.3 ESTRUTURA POROSA E PROPRIEDADES DE RETENÇÃO DA ÁGUA PELO SOLO.....	41
2.4 INFILTRAÇÃO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO.....	43
CAPÍTULO 3.....	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE COLETA DOS AGREGADOS.....	46
3.2 CURVAS DE RETENÇÃO E AGREGADOS DE SOLO.....	48
3.2.1 MÉTODO DA PARAFINA.....	51

3.3 DENSIDADE GLOBAL DOS AGREGADOS.....	52
3.4 DENSIDADE GLOBAL EM CAMPO.....	53
3.5 MACROPOROSIDADE, MICROPOROSIDADE E POROSIDADE TOTAL DOS AGREGADOS.....	53
3.6 MACROPOROSIDADE, MICROPOROSIDADE E POROSIDADE TOTAL DO SOLO.....	54
3.7 TEXTURA DO SOLO.....	55
3.7.1 LEI DE STOKES.....	57
3.8 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS AGREGADOS.....	58
3.9 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM CAMPO.....	61
3.10 FUNÇÃO CAPACIDADE DE ÁGUA (FCA).....	62
CAPÍTULO 4.....	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
4.1 MACROPOROSIDADE E DENSIDADE GLOBAL – CAMPO X AGREGADOS.....	64
4.2 CORRELAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA COM OS PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO – CAMPO X AGREGADOS.....	65
4.3 CURVAS DE RETENÇÃO E FCAS.....	76
4.4 PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN.....	82
4.5 INFLUÊNCIA DA DENSIDADE GLOBAL NAS CURVAS DE RETENÇÃO E FCAS.....	87
4.6 RESUMO DOS RESULTADOS.....	90
CONCLUSÕES.....	92
PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

INTRODUÇÃO

O conhecimento das relações solo-água é de fundamental importância para uma boa produtividade do solo. A água é essencial à produção vegetal, e o desenvolvimento satisfatório das plantas depende dela. A água também age como solvente que, juntamente com os sais em solução, compõe a solução do solo que por sua vez fornece nutrientes essenciais aos vegetais em crescimento.

O solo funciona como um reservatório natural de água para as plantas. Visto que esse reservatório é reabastecido descontinuamente pela chuva, faz-se necessário o manejo correto da água e, para isto, é preciso conhecer as propriedades hidráulicas dos diferentes tipos de solo.

As características de retenção da água e da condutividade hidráulica do solo avaliam, respectivamente, sua capacidade de armazenamento e a facilidade com que água é conduzida através dele.

Através da análise da porosidade e textura do solo pode-se determinar o comportamento da água no solo revelando suas características de retenção e condução. Segundo Brady (1989), citado por Carvalho et al. (1999), os solos de textura mais fina retêm maior porcentagem de água e isso se deve ao fato de que estes solos possuem maior porcentagem de material coloidal, maior espaço poroso e superfície de adsorção muito maior que os solos de textura mais grossa.

Já a condutividade hidráulica está diretamente ligada ao tamanho, volume e distribuição dos poros do solo. Nos solos arenosos, com grande quantidade de macroporos, o deslocamento de água é rápido e nos argilosos é mais lento. Quanto maior a condutividade hidráulica do solo maior é a facilidade com que a água se move em seu interior (SCHERPINSKI, 2003).

Além da textura do solo, o tipo de manejo também influencia as propriedades de condução e retenção da água no solo. No sistema de plantio direto não há nenhuma mobilização prévia do solo antes do plantio de culturas, sendo este feito sobre a resteva integral e triturada da cultura anterior. Isto minimiza problemas de erosão, melhora o teor de matéria orgânica, diminui o tempo de plantio e reduz os custos com combustível no plantio das culturas (SCHERPINSKI, 2003). Além disso, o plantio direto diminui as taxas de infiltração e perdas de água por enxurrada e

erosão o que leva o solo a uma condição mais favorável de disponibilidade hídrica para as plantas.

Já no plantio convencional, a mobilização do solo antes do plantio de culturas promove a compactação do solo, a exposição excessiva ao sol e a sua degradação por erosão. O revolvimento da superfície do solo, nesse tipo de manejo, proporciona um volume maior de macroporos o que pode aumentar as taxas de infiltração e a condutividade hidráulica do solo.

Portanto, uma comparação entre os plantios é capaz de fornecer, tanto do ponto de vista acadêmico quanto prático, informações importantes para se saber ao certo: as modificações nas propriedades de retenção e condução de água pelo solo e as vantagens e ou desvantagens de um tipo de manejo em relação ao outro.

Existem vários métodos para se estudar o comportamento físico-hídrico do solo. Entre eles estão os métodos de campo e os de laboratório. Os métodos de campo são preferidos, tendo em vista que são mais representativos, e isto se deve ao fato do volume de solo envolvido no estudo ser maior do que nos estudos de laboratório (PEREIRA et al., 2001).

O objetivo deste estudo foi de empregar um sistema apresentado em Leeds-Harrison & Youngs (1997) para a determinação da condutividade hidráulica saturada de agregados de solos. Tais agregados foram retirados de parcelas de solos submetidos a dois tipos de manejos, o plantio direto e o plantio convencional. Os resultados obtidos pelo uso desse sistema foram comparados aos valores da condutividade hidráulica dos solos em condições de campo, os quais foram determinados pela utilização de um permeâmetro de carga constante (permeâmetro de Guelph).

Avaliou-se também a correlação da condutividade hidráulica saturada de agregados com parâmetros físicos do solo tais como: textura, densidade global, curvas de retenção, macroporosidade, microporosidade e porosidade do solo.

A degradação do solo ou a preservação deste depende do tipo de manejo a que ele é submetido. Portanto, estudar o comportamento físico-hídrico do solo em diferentes sistemas de manejo é bastante relevante para minimizar os problemas de degradação do solo e aumentar sua capacidade produtiva.

CAPÍTULO 1

1 TEORIA

Para se entender as propriedades de condução e retenção de água no solo é importante apresentar alguns conceitos básicos de Física do Solo. Este capítulo dedica-se a dar uma visão geral dos atributos físicos que caracterizam fisicamente um solo.

1.1 O Solo

O termo solo refere-se aqui à camada externa e agricultável da superfície terrestre. Sua origem é a rocha que, por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou, no decorrer das eras geológicas, em material poroso de características peculiares (REICHARDT & TIMM, 2004).

O solo é, portanto, um material poroso que armazena líquidos e gases em seus poros. O tamanho do espaço entre os poros do solo é consequência do arranjo de suas partículas sólidas.

A parte sólida do solo constitui-se de material mineral e orgânico. A parte mineral provém da rocha da qual o solo se formou e a parte orgânica é constituída por organismos vivos e resíduos de plantas e animais em diferentes estágios de decomposição.

A parte líquida do solo é uma solução aquosa de sais minerais e substâncias orgânicas que é retida nos poros em graus variáveis de persistência variando de um solo para outro. Parte da água do solo é utilizada pelas plantas e outra grande parte permanece no solo ou é drenada para camadas mais profundas do solo. A reposição desta água se dá através da chuva ou por irrigação advinda de práticas agrícolas.

O espaço poroso que não está preenchido com água é ocupado pela fração gasosa constituída de ar modificado, o qual apresenta um alto nível de CO_2 e pouco O_2 (REICHARDT & TIMM, 2004).

Algumas relações massa-volume são usadas para descrever as três frações que compõem o solo (sólida, líquida e gasosa) e suas inter-relações. Tomando uma amostra de solo pode-se discriminar as massas e os volumes de cada uma das frações, como mostra esquematicamente na figura 1.1:

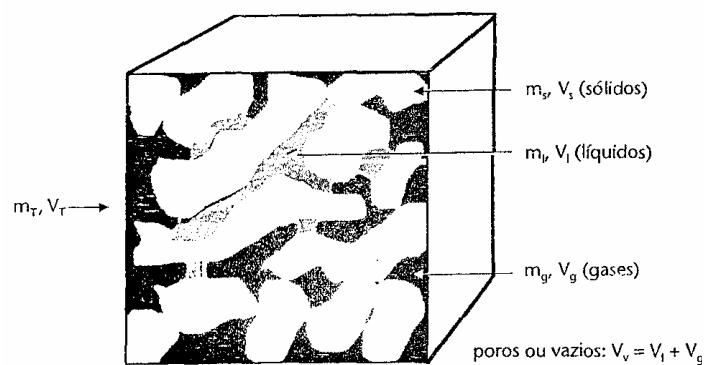


Figura 1.1: Amostra de solo indicando as frações de sólido, líquido e gasoso (REICHARDT & TIMM, 2004).

$$M_t = m_s + m_l + m_g \quad (1.1)$$

$$V_t = V_s + V_l + V_g \quad (1.2)$$

Assim, na equação 1.1 M_t é a massa total da amostra; m_s é a massa de suas partículas sólidas; m_l é a massa de sua fração líquida e; m_g a massa de sua fração gasosa. E na equação 1.2 V_t é o volume total da amostra; V_s é o volume dos sólidos da amostra; V_l é o volume do líquido presente na amostra e; V_g o volume da fração gasosa da amostra.

1.2 Textura do Solo

As partículas sólidas do solo variam muito de tamanho. Enquanto algumas são facilmente vistas à olho nu, outras são tão pequenas que apresentam propriedades coloidais.

A distribuição de partículas de variados tamanhos em um determinado solo determina sua textura. Cada solo recebe uma designação referente à sua textura, designação esta que nos dá uma idéia do tamanho de suas partículas constituintes mais freqüentes. Tradicionalmente, as partículas do solo são divididas em três frações de tamanho, chamadas frações texturais: areia, silte e argila (REICHARDT & TIMM, 2004). A figura 1.2 representa o triângulo de classificação textural utilizado para designar o solo de acordo com as suas porcentagens de areia, silte e argila.

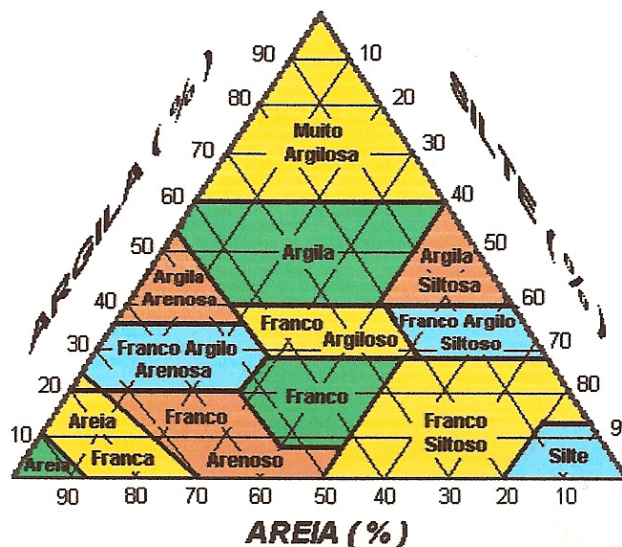


Figura 1.2: Triângulo de classificação textural (REICHARDT & TIMM, 2004).

O processo de determinação da textura do solo é denominado análise mecânica ou análise granulométrica do solo. Nesse tipo de análise, as frações de areia (partículas de diâmetro entre 2 e 0,02mm), silte (partículas de diâmetro entre

0,02 e 0,002mm) e argila (partículas com diâmetro menor que 0,002mm) são separadas e quantificadas.

Solos de textura fina possibilitam movimentação relativamente lenta de gases e de água, devido ao fato do seu sistema poroso ser formado predominantemente por poros de pequenos diâmetros (microporos). Nesse caso os microporos mantêm-se, com frequência, cheios de água (BRADY,1983).

O espaço poroso de um solo é a porção ocupada pelo ar e pela água. O tamanho desse espaço poroso é determinado principalmente pela distribuição de suas partículas sólidas. Devido ao alto teor de matéria orgânica presente em solos de textura média é comum as partículas sólidas destes solos se juntarem formando agregados de solo. Os espaços porosos por unidade de volume destes tipos de solos são elevados. Desse modo, solos com estrutura granular estável conduzem água com maior rapidez do que aqueles formados de unidades estruturais instáveis, que se dissociam quando molhados.

Solos de textura grossa (solos arenosos) são em geral muito desagregados e abertos e não possuem capacidade adequada de adsorção, manutenção de umidade e nutrientes. A adição de matéria orgânica, neste tipo de solo, pode aumentar sua capacidade de retenção, além de funcionar como agente aglutinador. Além disso, devido à maior presença de macroporos neste tipo de solo, ele possui uma condutividade hidráulica saturada mais elevada em comparação a solos de textura fina.

O tamanho e a forma do espaço poroso do solo são, portanto, fatores importantes a se considerar quando se investigam propriedades de retenção e condução de água por ele.

Macroporos são poros com diâmetro acima de 100 μ m. São os poros que permitem o movimento livre do ar e da água de percolação no solo. Microporos são poros com diâmetros menores do que 30 μ m. São também chamados poros capilares e são responsáveis pela retenção da água pelo solo. Os poros com diâmetro entre 30 e 100 μ m são chamados de mesoporos e são responsáveis pela distribuição de água no espaço poroso do solo.

A estrutura do solo e sua estabilidade exercem um importante papel na variedade de processos que ocorrem no solo tais como: erosão, infiltração, penetração de raízes e aeração.

A junção de partículas dá origem a um agregado de solo, o qual é classificado segundo sua forma (prismáticos, laminares, colunares, granulares e em bloco). Um agregado irregular é classificado de acordo com suas dimensões características, as quais podem ser o seu diâmetro médio, ou o seu volume.

Segundo Brady (1983) são identificados quatro tipos básicos de agregados de solo:

- Em forma de placa (laminar): os agregados são arrumados em placas horizontais relativamente finas, folículos ou lentes.
- Em forma de prismas (prismáticos e colunares): os agregados são orientados verticalmente e podem atingir ou ultrapassar os 15cm de diâmetro.
- Em forma de bloco: são agregados com faces hexagonais irregulares e com as dimensões aproximadamente iguais. Em tamanho variam entre 7,5 a 10cm de diâmetro médio.
- Em forma de esferóide (granular): todos os agregados arredondados podem ser considerados granulares embora o termo se refira mais àqueles inferiores a 1,25cm de diâmetro. Este tipo de estrutura é característica de muitos solos de superfícies, especialmente aqueles com elevado teor de matéria orgânica e são os únicos tipos de agregados que sofrem influência dos tipos de manejo do solo.

Os diferentes tipos de agregados mencionados anteriormente são apresentados esquematicamente na figura 1.3:

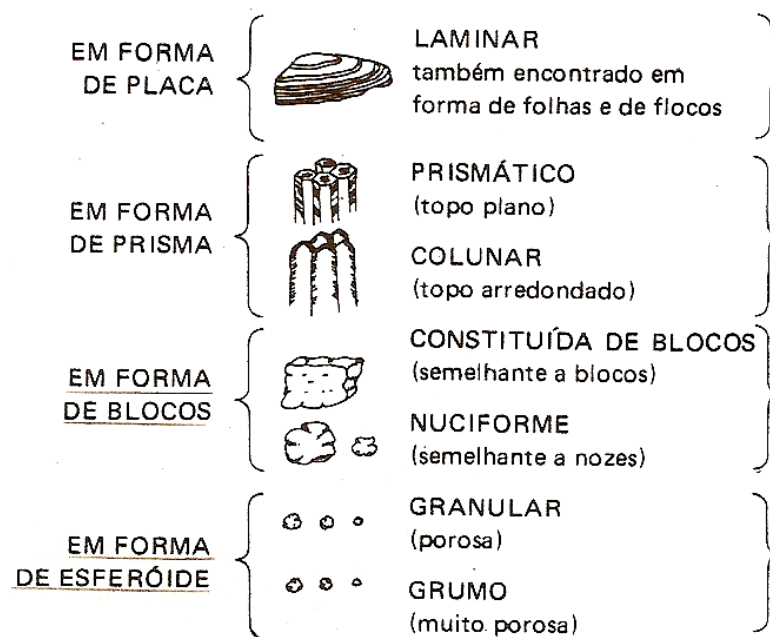


Figura 1.3: Tipos de agregados (BRADY, 1983).

Um solo com uma estrutura bem definida apresenta boa quantidade de poros de tamanho relativamente grande (alta macroporosidade) afetando a penetração das raízes, circulação de ar e a infiltração de água.

De acordo com Rawls & Pachepsky (1991), citados por Laurani et al. (2004), a distribuição do tamanho dos poros é importante para a curva característica para o solo próximo à saturação (isto é, quando todos os poros estão preenchidos com água). Conforme decresce a umidade, os filmes de água ao redor de agregados dominam a curva característica. Assim, em solos agregados, a agregação domina a retenção da água para conteúdos altos de água enquanto a textura e a mineralogia se tornam mais importantes para baixos conteúdos de água.

Exemplos de curvas de retenção ou curvas características para solos de textura fina e grossa e solos compactados são representados na figura 1.4:

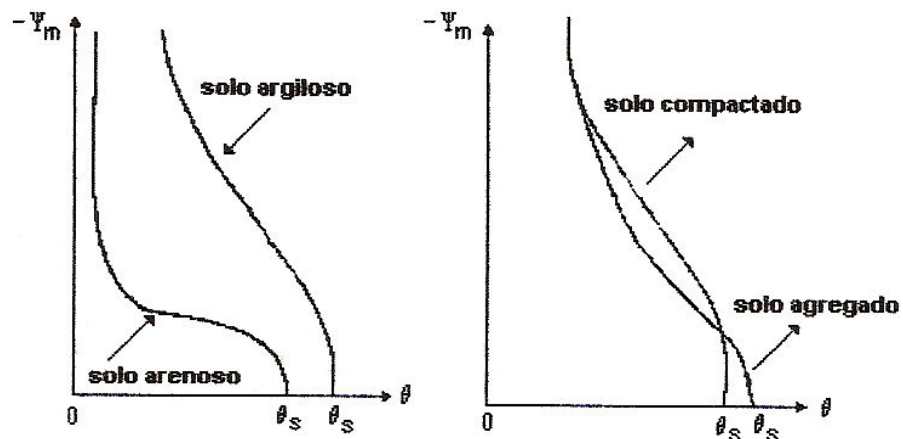


Figura 1.4: Curvas de retenção de água para solos de texturas e condições diferentes.

Maiores detalhes a respeito do que curva de retenção representa serão fornecidos nos itens 1.7 e 1.8 desta dissertação.

A agregação do solo pode sofrer alterações permanentes ou temporárias provocadas por práticas de manejo e cultivo. Segundo Brady (1983), o cultivo tende a diminuir o espaço poroso do solo.

Segundo Köhne et al. (2002) a agregação pode levar a caminhos preferenciais para o deslocamento da água no solo e que, enquanto a matriz porosa fornece a maior parte do volume para o armazenamento de água, o volume de macroporos, especialmente em condições próximas a saturação, provê caminhos de alta condutividade para o deslocamento da água no solo.

A seguir apresentamos alguns conceitos básicos ligados a propriedades físicas do solo e que serão utilizados ao longo deste trabalho.

1.3 Densidade de Partículas

A densidade de partículas depende da composição do solo e é definida como a razão entre a massa total da amostra seca “ m_s ” e o volume total das partículas sólidas que compõem esta amostra “ V_s ”, ou seja:

$$\rho = \frac{m_s}{V_s} \quad (1.3)$$

Tipicamente, o valor da densidade de partículas varia entre 2650 a 2750kg/m³, a qual é, em média, a densidade dos componentes mais freqüentes no solo; quartzo e silicatos. Solos com alto teor de matéria orgânica apresentam menor densidade de partículas.

1.4 Densidade do Solo

A densidade do solo, também denominada densidade global, é definida como sendo a razão entre a massa de solo seco “ m_s ” em uma amostra de solo e o volume total desta amostra “ V_t ”. No computo da densidade global, tanto o volume das partículas sólidas, quanto o espaço poroso entre elas são considerados. A expressão que fornece a densidade global de um solo é apresentada a seguir:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_T} \quad (1.4)$$

A densidade global é um parâmetro físico muito importante e é utilizado no cálculo da porosidade do solo. É usado também como um índice que fornece o grau de compactação de um solo.

1.5 Porosidade, Microporosidade e Macroporosidade do Solo

A porosidade “ α_s ” do solo indica a fração de poros contidos numa determinada amostra de solo, e é definida por:

$$\alpha_s = \frac{V_p}{V_T} = \frac{V_T - V_s}{V_T} \quad (1.5)$$

A porosidade total do solo é igual à percentagem de saturação em volume de solo e pode ser determinada de acordo com a expressão:

$$\text{Porosidade total} = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{V_t} \right) \times 100\% \quad (1.6)$$

Na qual, m_{sat} é a massa da amostra após a saturação; m_s é a massa da amostra seca e; V_t é o volume da amostra de solo.

Pode-se ainda calcular a porosidade do solo em termos de sua densidade, através da seguinte relação:

$$\alpha_s = 1 - \frac{\rho_s}{\rho} \quad (1.7)$$

Portanto, verifica-se que uma mudança na densidade “ ρ ” do solo altera a sua porosidade, ou melhor, observa-se que um aumento na densidade do solo produz uma diminuição de sua porosidade e vice-versa.

A microporosidade do solo é considerada como sendo o conteúdo volumétrico de água retida em sua matriz após a aplicação de uma tensão equivalente a 60cm de coluna de água ($5,9 \times 10^3 \text{Pa}$) (EMBRAPA, 1979), e pode ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{Microporosidade} = \frac{m_{60cm} - m_s}{V_t} \quad (1.8)$$

Na qual, m_{60cm} é a massa da amostra após ser submetida a uma tensão de 60cm de coluna de água; m_s é a massa da amostra seca e; V_t é o volume da amostra.

A macroporosidade do solo pode ser determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade do solo, ou seja:

$$\text{Macroporosidade} = \text{Porosidade total} - \text{Microporosidade} \quad (1.9)$$

1.6 Umidade do Solo

A umidade do solo (ou conteúdo de água no solo) é um conceito de extrema importância, visto que ela é o índice que quantifica a quantidade de água numa dada amostra de solo.

Pode-se expressar a umidade do solo basicamente de duas maneiras:

a) umidade à base de massa (U)

É definida como a razão entre a massa de água existente numa amostra de solo num dado instante e a massa dos sólidos que a compõe, isto é,

$$U = \frac{m_a}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \rightarrow (\text{kgkg}^{-1}), \quad (1.10)$$

ou, em termos percentuais esta expressão é escrita como:

$$U\% = \left(\frac{m - m_s}{m_s} \right) 100. \quad (1.11)$$

b) umidade à base de volume (θ)

É definida como a razão entre o volume de água em uma amostra de solo V_a e o volume dessa amostra V_t , ou seja,

$$\theta = \frac{V_a}{V_t} \rightarrow (m^3 m^{-3}), \quad (1.12)$$

Utilizando-se a expressão 1.1, e considerando-se a massa da fração gasosa m_{ar} da amostra desprezível frente às massas das frações líquida e sólida, respectivamente, m_{ag} e m_s , que compõem o solo, temos que:

$$\theta = \frac{m - m_s}{\rho_{ag} V_t} \rightarrow (m^3 m^{-3}) \quad (1.13)$$

Nesta expressão, ρ_{ag} representa a densidade da água ou solução no solo. Comumente este valor é adotado como sendo igual a 1 g/cm^3 , a densidade da água pura.

Em porcentagem, reescrevem-se as equações (1.11) e (1.12) como:

$$\theta\% = \left(\frac{V_a}{V_t} \right) 100, \quad (1.14)$$

ou

$$\theta\% = \left(\frac{m - m_s}{\rho_{ag} V_t} \right) 100. \quad (1.15)$$

1.7 Retenção da Água pelo Solo

Como já foi dito, o solo é um material poroso cujos poros são preenchidos, basicamente, por água e ar. Quando todo espaço poroso do solo está preenchido de água diz-se que o solo está saturado.

Segundo Libardi (2005) dois processos explicam a retenção da água nos solos. No primeiro deles, a retenção ocorre nos microporos dos agregados do solo e pode ser explicada pelo fenômeno da capilaridade. No segundo, o de adsorção, a retenção ocorre nas superfícies dos sólidos do solo, como filmes finos presos a elas como mostra a figura 1.5.

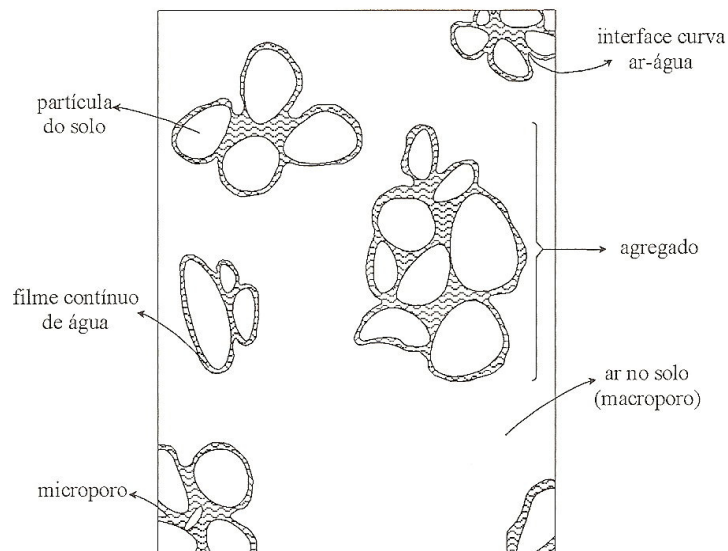


Figura 1.5: Retenção da água por agregados após a drenagem.

O solo é uma estrutura porosa que possui um variado conjunto de poros. Ao se modificar a energia da água em seu interior (por exemplo, aplicando-se uma sucção na matriz do solo), os poros maiores são esvaziados em primeiro lugar. Aumentando-se ainda mais a energia da água, poros cada vez menores podem ser esvaziados.

Juntas, as forças capilares e de adsorção, formam as forças mátricas, as quais dão origem ao chamado potencial matricial.

1.8 Potencial Matricial

O potencial matricial da água do solo é freqüentemente denominado potencial capilar, tensão da água no solo, sucção, ou pressão negativa. Como foi dito, esse potencial é o resultado de forças capilares e de adsorção, as quais surgem em virtude da interação entre a água e as partículas sólidas que compõem o solo. Essas forças atraem e “fixam” a água no solo, diminuindo sua energia potencial com relação à água livre. Fenômenos capilares que resultam da tensão superficial da água e de seu ângulo de contato com as partículas sólidas também são responsáveis por esse potencial (REICHARDT & TIMM, 2004).

Dessa forma, de maneira geral pode-se dizer que o potencial matricial é, sobretudo, o resultado do efeito combinado de dois mecanismos – capilaridade e adsorção – que não podem ser facilmente separados. A água em meniscos capilares está em equilíbrio com a água de “filmes” de adsorção. A modificação do estado de um deles implica a modificação do outro. Dessa forma, o “potencial mátrico” se refere ao efeito total resultante das interações entre a água e a matriz sólida do solo (REICHARDT & TIMM, 2004).

A descrição matemática desse potencial matricial “ Ψ_m ” é bastante difícil devido às irregularidades dos poros e sua determinação é normalmente obtida experimentalmente.

Segundo Reichardt & Timm (2004), em superfícies curvilíneas de interface líquido-gás, há uma diferença de pressão entre pontos imediatamente superiores e inferiores à interface, a qual é dada por:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \quad (1.16)$$

Onde σ é a tensão superficial do líquido e R é o raio de curvatura do menisco na interface líquido-gás. Esta relação é chamada de “Fórmula de Laplace”.

Se R for igual ao raio do tubo capilar r , o menisco será hemisférico e o ângulo de contato α será nulo. Para valores de α entre 0° e 90° , $R = \frac{r}{\cos \alpha}$ e a diferença de pressão será:

$$\Delta P = \Delta \Psi = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r} \quad (1.17)$$

No caso de um capilar, esta diferença de pressão é negativa, a qual é capaz de elevar uma coluna de água de altura h dada por:

$$h = \Delta P / \rho g$$

Na qual, ρ é a densidade da água pura e g a aceleração gravitacional local.

Então, a altura h que a água pura atinge num tubo capilar de raio r é dada por:

$$h = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho_l g r} \quad (1.18)$$

O valor de h representa a energia por unidade de peso com que a água se encontra retida no capilar ou no caso do solo, em seu sistema poroso. Para que se retire essa água do capilar, é necessária a aplicação de uma sucção ou uma pressão maior ou igual à ΔP , a que elevou a água para o interior do capilar. No solo, h representa o valor do potencial matricial na condição de umidade em que ele se encontra.

1.9 Curva de Retenção e “Função Capacidade de Água”

A curva característica de umidade do solo ou, simplesmente, a curva de retenção é obtida aplicando-se em uma mesma amostra de solo, diferentes tensões (sucções) “ h ” e verificando-se a umidade que permanece na amostra após a aplicação desta tensão.

Desta forma, a curva de retenção relaciona o potencial matricial (ψ_m), representado pelas tensões (h) aplicadas ao solo, e o conteúdo de água que permanece no solo após a aplicação desta tensão.

Um dos métodos usado para determinar a curva característica de uma amostra de solo é utilizando-se um equipamento denominado de funil de Haines, o qual é descrito esquematicamente na figura 1.6.

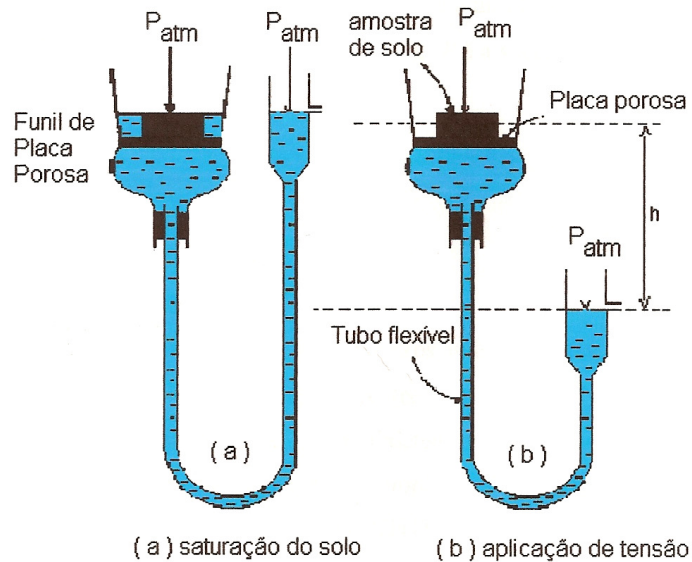


Figura 1.6: Procedimento para saturação e aplicação de uma tensão h em uma amostra de solo saturada. a) saturação do solo; b) aplicação da tensão h .

Tal funil consiste basicamente de uma placa porosa em sua parte inferior e uma haste capilar flexível em contato hidráulico com esta placa. Para a realização de uma medição, uma amostra saturada é colocada sobre a placa porosa do funil e em seguida, pelo abaixamento da haste flexível, aplica-se uma tensão h , a qual será responsável pela drenagem de alguns dos poros da amostra de solo. A figura 1.6 mostra esse procedimento de forma esquemática.

A cada tensão aplicada à amostra tem-se uma medida de umidade do solo e se pode construir, então, sua curva de retenção ou característica. Esta curva é comumente ajustada utilizando-se a equação de van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980), a qual é representada pela equação:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1.19)$$

Nessa expressão θ_r e θ_s são, respectivamente, as umidades residual e de saturação, h é o potencial matricial e α , n e m são parâmetros de ajuste.

Segundo van Genuchten (1980), em geral é válida a relação: $m = 1 - \frac{1}{n}$ (para $n > 1$), conhecida como restrição de Muallen.

Os parâmetros acima citados são ajustados aos dados obtidos experimentalmente por programas computacionais que utilizam o método dos mínimos quadrados. Um dos softwares computacionais utilizado para este ajuste é o RETC (RETention Curve), do Salinity Laboratory, USDA (VAN GENUCHTEN et al., 1991).

A partir dos parâmetros de ajuste obtidos utilizando-se a equação de van Genuchten pode-se obter a “Função Capacidade de Água”, a qual reflete a distribuição de poros no interior de uma amostra de solo.

A relação $d\theta/dh$ é definida como “Função Capacidade de Água” (FCA), a qual expressa a variação da umidade (θ) em relação à variação do potencial matricial (h) aplicado em uma amostra (JURY et al., 1991).

Esta relação, obtida a partir da equação de van Genuchten, é dada por:

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r)(-m)\alpha n(-1)(h)^{n-1}}{[1 + \alpha(h)^n]^{1+m}} \quad (1.20)$$

Usando o fato de que, em geral, $m = 1 - \frac{1}{n}$ esta equação fica dada por:

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r)(n-1)(h)^{n-1}}{[1 + \alpha(h)^n]^{\frac{2-1}{n}}} \quad (1.21)$$

A interpretação da FCA pode ser feita da seguinte maneira. De acordo com a equação 1.18, sabemos que uma determinada tensão h esvazia uma classe de poros cujo raio mínimo é dado por:

$$r = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho_l g h} \quad (1.22)$$

Ao se aumentar o valor de h , esvaziam-se poros de raios cada vez menores.

Supondo que h_1 produz o esvaziamento de poros de raios maiores ou iguais a r_1 . Aplicando-se uma tensão maior h_2 ($h_2 > h_1$), são esvaziados os poros de raios maiores ou iguais a r_2 , para os quais temos que: $r_2 < r_1$.

Devido à aplicação dessas duas sucções, a amostra passa de uma condição de umidade θ_1 para uma θ_2 , na qual, $\theta_2 < \theta_1$, como mostra a figura 1.7.

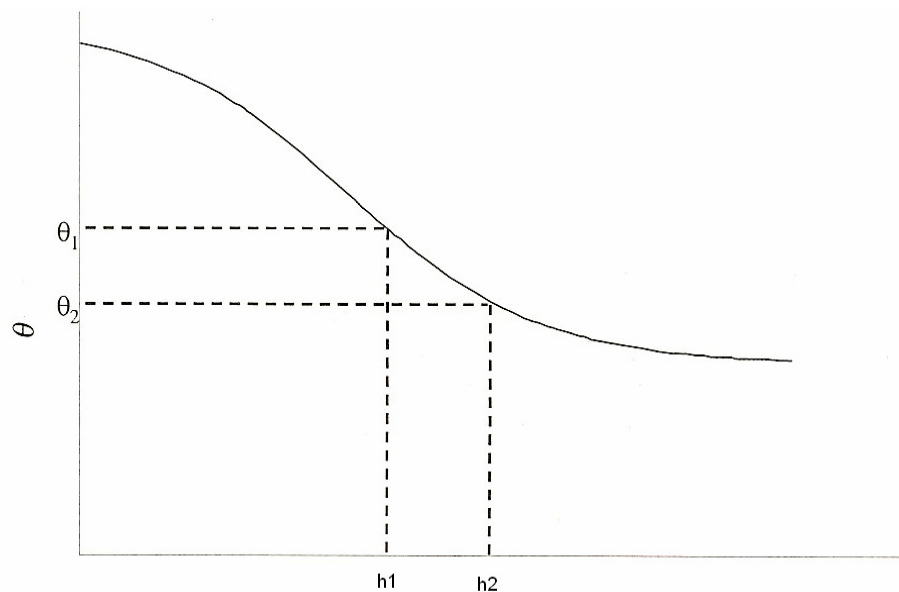


Figura 1.7: Curva de retenção de um solo (LIBARDI, 2005)

A razão $\Delta\theta/\Delta h$ representa o volume de água por volume de solo que está retida entre os potenciais h_2 e h_1 . Como h está relacionado ao raio mínimo do capilar que é esvaziado pela aplicação desta tensão, temos que, $\Delta\theta/\Delta h$ representa indiretamente o volume de água por volume de solo que está retido em poros com raios entre r_1 e r_2 (LIBARDI, 2005).

Com base nessas considerações, conclui-se que, para uma mesma diferença $h_1 - h_2$, quanto maior for $\theta_1 - \theta_2$ (Figura 1.8), maior é o número de poros existentes no solo com raios entre os valores de r_1 e r_2 .

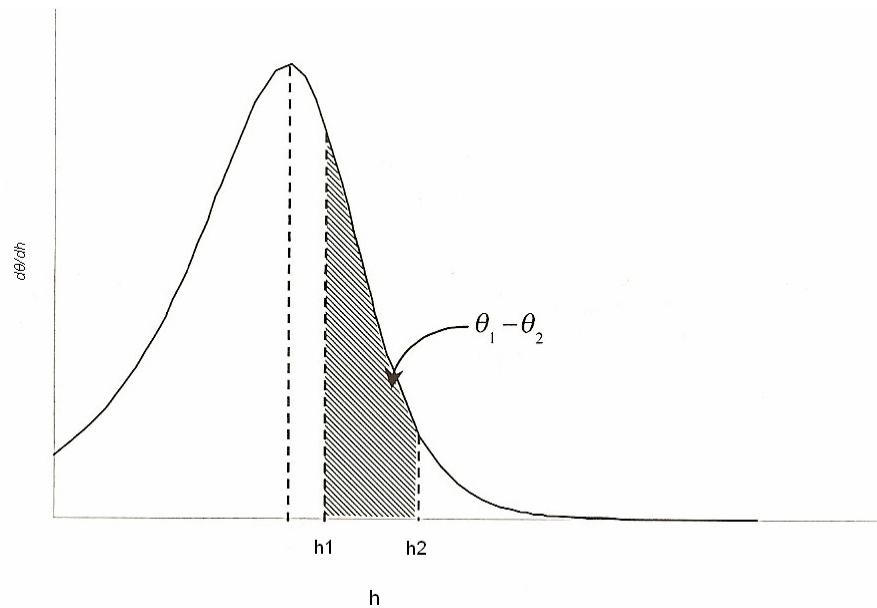


Figura 1.8: Curva diferencial da curva de retenção do solo da figura anterior (LIBARDI, 2005).

1.10 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica é uma propriedade física do solo que possui muito interesse prático e teórico. Por isso, muitos métodos têm sido desenvolvidos para medi-la em solos sob condições de laboratório e campo.

Em geral, estima-se o valor da condutividade hidráulica através da equação de Darcy, elaborada por Henry Darcy, o qual realizou uma experiência sobre infiltração vertical em filtros de areia homogênea sob condições de saturação (REICHARDT & TIMM, 2004).

Darcy verificou que a densidade de fluxo de água, dentre outros fatores, é proporcional ao gradiente de potencial hidráulico no solo. Sua equação foi adaptada mais tarde para solos não saturados (BUCKINGHAM, 1907), passando a chamar-se equação de Darcy-Buckingham e, apesar de suas limitações, é muito utilizada para descrever o fluxo de água no solo (REICHARDT & TIMM, 2004).

A equação de Darcy-Buckingham é escrita como segue:

$$q = -K.\nabla H = -K.gradH \quad (1.23)$$

Na qual q é a densidade do fluxo de água, ∇H ou *grad H* é o gradiente de potencial hidráulico e K é a condutividade hidráulica do solo.

Para a determinação da condutividade hidráulica de solos utiliza-se basicamente permeâmetros de carga constante (Frasco de Mariotte e o permeâmetro de Guelph) e permeâmetros de carga não constante (permeâmetro de carga decrescente).

No entanto, devido às suas pequenas dimensões, a condutividade hidráulica de agregados não pode ser obtida pelo uso destes equipamentos. Leeds-Harrison & Youngs (1997), descreveram em seu artigo um equipamento desenvolvido para a medição da condutividade hidráulica saturada de agregados de solo. O equipamento desenvolvido por eles é esquematizado na figura 1.9 apresentada a seguir.

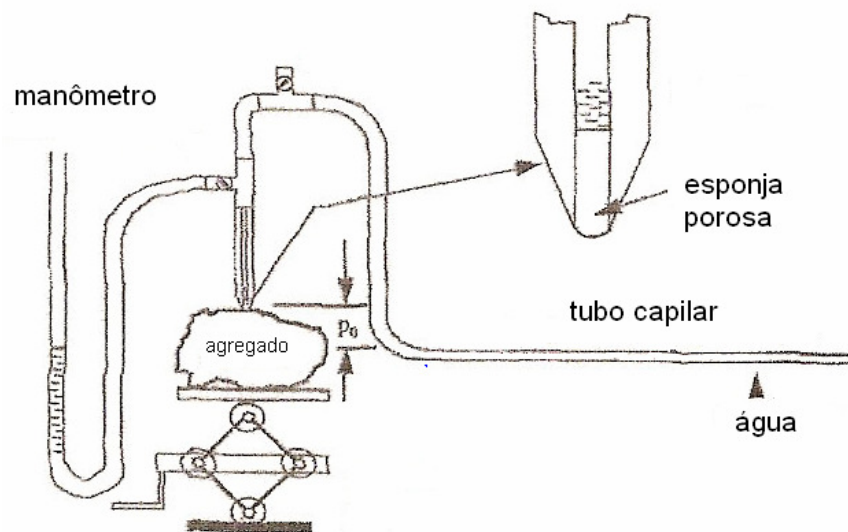


Figura 1.9: Arranjo experimental para medir a condutividade hidráulica de agregados de solo.

Neste arranjo experimental, a água é liberada para o solo através de uma pequena esponja contida no final de um tubo cilíndrico de raio R . Quando esse tubo está no mesmo nível do tubo capilar horizontal, a água de todo o sistema encontra-se em equilíbrio. Se a ponta que contém a esponja for posicionada a alguns centímetros acima do tubo horizontal, uma pequena diferença de pressão negativa é criada na extremidade que libera a água para o agregado.

O sistema não é esvaziado pela elevação do tubo devido ao fato da esponja ser um sistema poroso e, como tal, esvazia-se perante a aplicação de determinada sucção. Se a sucção imposta pelo sistema não for suficientemente grande, a esponja não é esvaziada e o sistema permanece completamente preenchido de água. Nesta condição, o sistema libera água sob tensão ao agregado de solo.

O método apresentado por Leeds-Harrison & Youngs (1997), para a determinação da condutividade hidráulica saturada de um agregado, consiste em se determinar o fluxo “ Q ” que penetra no interior do agregado em diferentes tensões p_0 .

O cálculo desse fluxo é feito pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{\pi r^2 \Delta x}{\Delta t}$$

Na qual, Δx é o deslocamento da água no tubo horizontal (succionada pelo agregado) e πr^2 a área de secção transversal deste tubo.

Segundo Leeds-Harrison & Youngs (1997), a taxa constante do fluxo de água Q que penetra pela superfície do solo em condições de saturação se relaciona à pressão p_0 , ao raio R da esponja, à sortividade S_0 e a condutividade hidráulica saturada do solo K_0 é pela relação:

$$Q = \frac{4bRS_0^2}{f} + 4RK_0p_0 \quad (1.23)$$

Na qual, k_0 é a condutividade hidráulica saturada, S é a sortividade, f é a diferença do conteúdo inicial e final de água no solo e b um parâmetro ($0,5 \leq b \leq \pi/4$) que depende da difusidade.

Portanto, Q está linearmente relacionada à p_0 , a pressão com que a água é liberada ao agregado. Dessa forma, um gráfico de Q versus p_0 é uma reta com inclinação igual a $4RK_0$.

Como R é conhecido (neste caso é igual ao raio da ponta que contém a esponja) K_0 , a condutividade hidráulica do solo na condição de saturação pode ser determinada através do coeficiente angular da reta obtida no gráfico de Q versus p_0 , o qual é fornecido pela equação 1.25:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta p_o} = 4RK_o \quad (1.25)$$

E a condutividade hidráulica saturada k_o do agregado é, portanto, dada por:

$$k_o = \frac{1}{4R} \frac{\Delta Q}{\Delta p_o} \quad (1.26)$$

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica baseada em parte da bibliografia existente até o momento sobre fatores que podem alterar as propriedades de retenção e condução de água em solos submetidos aos sistemas de plantio convencional e direto.

2.1 A Influência dos Sistemas de Manejo nas Propriedades do Solo

A correlação dos conceitos descritos no capítulo anterior é de suma importância para o estudo das propriedades hídricas do solo. Porém, dentre outros fatores, o tipo de manejo empregado no solo, também influencia essas propriedades.

O objetivo de um manejo correto do solo é manter alta a sua produtividade, e minimizar problemas, tais como: perda de solo por enxurrada e erosão, diminuição da capacidade de retenção e condução da água, compactação e alterações nas propriedades físicas do solo como sua densidade e porosidade, e conservação da água disponível às culturas, tanto na fase de crescimento quanto na de produção.

O plantio direto é uma seqüência de plantio projetada para minimizar perdas de solo e água pela ação do escoamento superficial. Segundo a Sociedade Americana de Ciências do Solo (SSSA) em 1997, o plantio direto é citado como o sistema de manejo que mantém a cobertura vegetal em índices maiores que 30%, (NAIME, 2001).

Segundo Naime (2001), o plantio convencional apresenta área de cobertura vegetal menor do que 30%, o que ocasiona uma maior exposição do solo ao impacto direto da chuva o que pode produzir o selamento da superfície do solo, o qual propicia escoamentos superficiais de água, fator que causa erosão no solo. Além

disso, o uso intenso de implementos neste tipo de plantio promove, por exemplo, um aumento da descontinuidade dos macroporos do solo e sua compactação.

Shipilato et al. (2000), em estudos utilizando lisímetros chegaram à conclusão de que o plantio direto favorece a formação de macroporos na estrutura do solo. Segundo eles, isso se deve à incorporação de matéria orgânica no solo, uma maior presença de minhocas e atividade biológica mais intensa.

Shipilato et al. (2000) concluíram que o plantio direto pode reduzir o escoamento superficial da água no solo e aumentar a infiltração de água em seu interior, mais notadamente durante a fase de crescimento da cultura quando o índice pluviométrico é alto e a evaporação é maior.

Devido à formação e preservação desses macroporos, a proporção de água de chuva que entra e flui para o interior do solo é maior em sistemas sob plantio direto do que sob plantio convencional.

O tipo de manejo também influencia a formação, estruturação e estabilização dos agregados do solo.

O preparo convencional, devido ao revolvimento do solo, degrada suas propriedades físicas, pois rompe seus agregados, compacta-o abaixo da camada preparada e o deixa descoberto. A semeadura direta, em virtude da pequena mobilização do solo, preserva os agregados e a cobertura do solo, porém o deixa mais compactado (BERTOL et al., 2004).

Ainda segundo Bertol et al. (2004), ao estudar os atributos físicos de um Cambissolo Húmico, verificou-se que, nas profundidades de 0 a 10cm, a densidade deste solo foi 19% maior na semeadura direta do que no preparo convencional. Os estudos também indicaram a existência de uma camada de maior compactação a partir dos 10cm de profundidade no preparo convencional, em contraste à compactação relativamente uniforme em toda a profundidade estudada na semeadura direta.

2.2 Formação de Agregados no Solo

Os diferentes tipos de manejo alteram a concentração do carbono orgânico presente no solo e, conseqüentemente, o tamanho, a estabilidade e a resistência

dos seus agregados. Isto ocorre porque as moléculas de carbono orgânico atuam nas etapas de formação e estabilização dos agregados, além de servirem de fonte de energia para os microrganismos, que são importantes agentes de agregação.

Neste aspecto, Wohlenberg et al. (2004) concluíram que a variação na estabilidade de agregados em diferentes sistemas de cultivo pode ser atribuída a diferenças no teor de carbono orgânico do solo.

Paladini & Mielniczuk (1991), citados por Wohlenberg et al. (2004), encontraram correlação significativa entre agregados maiores que 2,0mm e o carbono orgânico do solo na profundidade de 0 – 2,5cm, indicando que os compostos orgânicos podem ter atuado na formação e estabilização desses agregados.

Castro Filho et al. (1998), estudando um Latossolo Roxo de Londrina, no Paraná, concluíram que o acúmulo de resíduos vegetais na superfície como consequência da adoção do sistema de plantio direto melhorou o estado de agregação graças ao incremento do teor de carbono orgânico do solo, sobretudo na camada de 0-10cm, independentemente da sucessão de culturas.

Embora não seja considerado um fator importante para o crescimento das plantas, segundo Letey (1985), a estrutura do solo exerce influência direta nos processos de movimentação de água e de transferências de calor que ocorrem no interior do solo. Também, alteram as propriedades do solo tais como: sua densidade e porosidade.

De acordo com Campos et al. (1999), a agregação do solo pode sofrer alterações permanentes ou temporárias, provocadas por práticas de manejo de solo ou culturas. Por exemplo, Basso & Reinert (1998), verificaram que uma cultura de milho sob plantio direto produz um aumento da estabilidade estrutural do solo.

As raízes, apesar de representarem uma pequena fração dos constituintes orgânicos do solo, exercem grande influência na formação e estabilidade dos agregados do solo (SILVA & MIELNICZUK, 1997).

As raízes das plantas exercem significativo benefício na agregação do solo, (ALLISON, 1973). A estabilidade de agregados é maior em sistemas de cultivo que cobrem o solo durante todo o ano, pois além da ação direta das culturas na formação e estabilização dos agregados, esses sistemas continuamente aportam material orgânico para o desenvolvimento de microrganismos, que são importantes agentes de agregação do solo.

Além disso, as raízes removem continuamente a água, criando secamento nas regiões próximas a elas e, pela exsudação, fornecem alimento para microrganismos da rizosfera que, direta ou indiretamente, influenciam a agregação do solo. Pouco se encontra na literatura a respeito do estudo das propriedades hidráulicas de agregados de solos.

2.3 Estrutura Porosa e Propriedades de Retenção da Água pelo Solo

Segundo Reichardt (1993), solos cultivados têm menor porosidade que solos não cultivados. A perda da porosidade está relacionada à redução do teor de matéria orgânica do solo, à compactação e ao efeito do impacto das gotas de chuva em sua superfície. Ainda de acordo com esse trabalho, a compactação afeta a estrutura, o arranjo poroso, o volume e as características de retenção de água do solo.

Para Richard et al. (2001) e Tamari (1994), citados por Beutler (2005), o solo compactado apresenta maior condutividade hidráulica não-saturada por causa da redução dos espaços inter-agregados, a qual aumenta a área superficial de contato entre os agregados e, conseqüentemente, a continuidade dos poros.

De acordo com Freire (1975) e Klute (1986), citados por Carvalho & Lima (2000), vários atributos podem influir na retenção de água pelo solo, com maior ou menor intensidade, sendo os mais importantes: sua umidade, sua textura, o tamanho e distribuição de seus poros, seus conteúdos de matéria orgânica e de óxidos de ferro livres.

Para altos teores de água, onde os fenômenos de capilaridade são de importância na determinação do potencial matricial, a curva característica de retenção é dependente da geometria dos poros, ou seja, da disposição e do tamanho dos poros. A curva de retenção de água, nessa condição, é função da densidade e porosidade do solo (REICHARDT, 2004).

Segundo Beutler et al. (2005) a porosidade do solo pode ser estrutural ou textural, e os poros resultam do arranjo das partículas elementares do solo. A porosidade estrutural é mais afetada pelo manejo e pela compactação, caracterizados principalmente pelo decréscimo da porosidade total e da

macroporosidade e do aumento da microporosidade. O decréscimo do número de poros de maior diâmetro, devido à compactação ocorre às custas da fragmentação dos agregados do solo. Essa fragmentação destrói os espaços inter-agregados do solo e ocorre principalmente devido ao uso de equipamentos empregados no preparo dele.

Carvalho & Lima (2000) salientam que a maioria dos latossolos possui elevado teor de argila, predominantemente caulinita, a qual devido à sua estrutura cristalina (1:1) apresenta baixa capacidade de retenção de água. Além disso, apresentam elevada quantidade de óxido de ferro e alumínio, os quais atuam como agentes cimentantes das partículas de argila, o que favorece a formação de agregados de solo. A formação desses agregados aumenta a macroporosidade do solo, o que contribui para baixa retenção da água por parte desse tipo de solo.

Segundo Azooz et al. (1997) e Barber et al. (1996), citados por Portela et al. (2001), a macroporosidade do solo é a propriedade mais facilmente afetada pelo manejo empregado no solo. De acordo com eles, a estabilidade dos agregados normalmente é função decrescente do seu tamanho; desta forma, agregados grandes, que potencialmente apresentariam poros maiores, são destruídos mais facilmente que os agregados menores.

Carpenedo & Mielniczuk (1990), concluíram que os preparos convencionais rompem os agregados na camada preparada e aceleram a decomposição da matéria orgânica do solo, o que afeta a resistência dos agregados do solo. Bertol et al. (2004) salientam ainda que estes sistemas de preparo aumentam o volume de poros, especialmente macroporos, devido ao uso freqüente de arados e grades no preparo do solo. Para esses autores, o volume de macroporos foi de 2,4 a 1,8 vezes maior no preparo convencional do que na semeadura direta.

Já no sistema de semeadura direta, a maior estabilidade dos agregados e a continuidade dos poros (ALBUQUERQUE et al. 1995; CAMPOS et al. 1995; COSTA, 2001) favorecem a infiltração de água e dificultam o escoamento superficial da água no solo em relação ao preparo convencional (BERTOL et al., 2000).

2.4 Infiltração e Condutividade Hidráulica Saturada do Solo

Inicialmente, a infiltração de água no solo possui valor elevado, diminuindo com o tempo, até se tornar constante no momento que o solo fica saturado. Assim sendo, sob chuva ou irrigação contínuas, a taxa de infiltração se aproxima, gradualmente, de um valor mínimo e constante (SOBRINHO et al., 2003).

É importante considerar que os macroporos são funcionais quando o solo está muito próximo à saturação, sendo capazes de transportes preferenciais de água e substâncias químicas de forma rápida durante o processo de infiltração (BORGES et al., 1999).

Os sistemas de manejo exercem influência sobre a taxa de infiltração no solo visto que os diferentes tipos de manejo alteram suas propriedades físicas tais como sua porosidade, umidade e condutividade hidráulica. Por exemplo, nos sistemas de manejo em que é eliminada a cobertura vegetal do solo, verifica-se que o impacto de gotas de chuva produz a quebra de agregados e, como consequência ocorre a formação de encrostamento superficial, o que contribui para a redução da capacidade de infiltração de água no solo.

Shipitalo & Protz (1987), citados por Laurani et al. (2004), em sua pesquisa verificaram que no plantio direto a porosidade total do solo é menor quando comparada ao sistema convencional. Porém verifica-se que solos sob esse plantio possuem maior quantidade de macroporos. Esse aumento na macroporosidade pode induzir o aparecimento de fluxos preferenciais e contribuir para aumentar as taxas de infiltração do solo.

Segundo Borges et al. (1999), o processo de infiltração é caracterizado por dois parâmetros: a sortividade S_0 (capacidade do solo absorver água em relação ao seu conteúdo de água inicial) e a condutividade hidráulica K_0 . O valor da sortividade é associado à fase inicial da infiltração, pois nessa fase a infiltração é praticamente independente dos efeitos gravitacionais e geométricos. Já a condutividade hidráulica é um parâmetro hídrico do solo, o qual quantifica a capacidade do solo em deixar passar água e ar através do seu perfil, ou seja, é uma medida da facilidade com que a água é conduzida através do solo. Ela está diretamente ligada ao tamanho, volume e distribuição dos poros da amostra investigada e varia para os diferentes tipos de solo existentes (SCHERPINSKI, 2003).

De acordo com Coutadeur et al. (2002), o cultivo do solo aumenta a variabilidade da estrutura e da condutividade hidráulica saturada do solo. Eles observaram, comparando solos cultivados e não cultivados, que na camada arada houve redução da condutividade hidráulica do solo pelo fato do sistema de manejo promover o rompimento da continuidade dos macroporos do solo. Já na camada não cultivada, a maior condutividade hidráulica observada para o solo pode ser atribuída à presença de canais promovidos pela atividade de minhocas. Logo, a variação da condutividade hidráulica pode ser relacionada à variação da estrutura interior do solo.

Sharma & Uehara (1968), citados por Klein & Libardi (2002), concluíram que a condutividade hidráulica para Latossolos decresce rapidamente quando pequenas tensões são aplicadas. Othmer et al (1991), citados pelo mesmo autor, atribuem isto à distribuição bimodal dos poros desse solo, inter-agregados e intra-agregados. Ao se aplicar essa tensão, os primeiros tipos de poros, maiores em geral, são esvaziados rapidamente, o que faz com que a condutividade do solo decresça.

Roth et al. (1988), também citados por Klein & Libardi (2002), estudando os parâmetros físicos e hídricos do solo em diferentes manejos, constataram que em potenciais abaixo de 20kPa, o plantio direto apresentou menores valores de condutividade hidráulica do que o manejo convencional. Já acima desse potencial o solo sob plantio direto apresentou valores superiores da condutividade hidráulica. Segundo esses autores, isto pode ser explicado em função de alguns fatores tais como a variação de manejos adotados dentro do próprio plantio direto. Nessa forma de plantio, há manejos em que se intensifica a atividade biológica no solo, há outros em que são cultivadas culturas com sistema radicular mais agressivo e profundo e finalmente, diferenças na condutividade hidráulica do solo podem advir das próprias variações das características físicas do solo.

Assis & Lanças (2005), estudando um Nitossolo Vermelho Distroférrico submetido a 12 anos de plantio direto e sob mata nativa, encontraram valores de condutividade hidráulica saturada, respectivamente, 15 e 11 vezes maiores que no plantio convencional. Eles afirmaram que os menores valores de condutividade hidráulica em relação ao plantio direto com 12 anos de cultivo deveram-se, principalmente, à desestruturação excessiva do solo, decorrente da utilização da aração e gradagem. Essa desestruturação promove o aparecimento de uma grande

quantidade de partículas finas, as quais promovem o selamento parcial dos poros do solo, o que dificulta a ocorrência de maiores taxas de infiltração.

Para Boone (1998) citado por Assis & Lanças (2005), muitos bioporos são produzidos pela ação de organismos vivos do solo de plantio direto, além disto, há o aparecimento de canais deixados por raízes que apodrecem, fatores que, em conjunto, permitem uma melhor drenagem da água pelo solo.

Osunbitan et al. (2005), ao estudarem os efeitos dos diferentes tipos de manejo no solo, concluíram que a condutividade hidráulica saturada do solo diminui com aumento do grau de manipulação do solo durante o cultivo. Isso se deve ao fato de que a manipulação do solo promove a quebra da continuidade dos macroporos da estrutura do solo.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada da metodologia utilizada para a realização das medidas em campo e em laboratório das propriedades de retenção e condução da água pelo solo.

3.1 Localização da Área de Coleta dos Agregados

A coleta dos agregados utilizados neste estudo foi realizada na Unidade Regional de Pesquisa Centro-Sul, do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) em Ponta Grossa. Foram coletados agregados de quatro diferentes pontos em parcelas de 20 X 18m, localizadas aleatoriamente dentro de dois manejos diferentes: plantio direto e plantio convencional.

As coordenadas geográficas da área do ensaio são: latitude 25° 13' S e longitude 50° 01' W. O clima da área em estudo, segundo a classificação de Köppen é o Cfb-subtropical úmido mesotérmico com verões frescos, sem estação seca e com geadas severas. A temperatura média do mês mais frio é menor que 18°C e a do mês mais quente maior que 22°C. A precipitação total anual situa-se entre 1300 a 1800 mm, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano.

O solo dos dois tipos de manejos é um Latossolo Vermelho Distrófico e o campo experimental possui uma declividade média de 8%.

O preparo do solo do plantio convencional era feito com uso de arado de disco, hidráulico e reversível, da marca LAVRALE, seguido de duas gradagens leves, com grade hidráulica de 24 discos, feitas com a finalidade de criar condições favoráveis para o estabelecimento da cultura.



Figura 3.1: Solo cultivado sob sistema de plantio convencional (IAPAR – PG)

O solo do plantio direto entre os anos de 1981-1988 utilizou-se uma alternância de preparo com uso da aração e gradagem e plantio direto em três ocasiões. A partir de 1989 esta parcela passou a ser cultivada sempre em plantio direto. Os preparos do solo e plantio foram realizados sempre em nível e a colheita realizada com colhedora automotriz. Este sistema de plantio não envolve preparo do solo, a não ser na faixa e profundidade onde a semente será plantada.



Figura 3.2: Solo cultivado sob sistema de plantio direto (IAPAR – PG)

3.2 Curva de Retenção e Agregados de Solo

Para as curvas de retenção foi utilizado um sistema desenvolvido a partir do funil de placa porosa ou de Haines. Esquemáticamente o sistema é apresentado na figura 3.3.

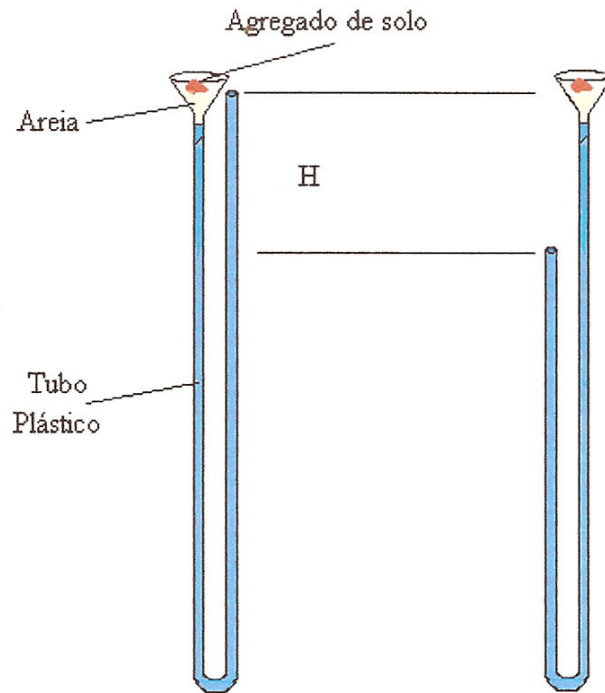


Figura 3.3: Esquema do funil de Haines modificado (SANTOS, 2005).

Os funis foram preenchidos com areia fina de granulometria menor que $106\mu\text{m}$, pois esta granulometria se mostrou adequada para suportar pressões da ordem de 1,2m de água (aproximadamente 95kPa), e conectados a uma mangueira flexível totalmente preenchida com água.

Para a análise das curvas de retenção foram investigados cinco agregados de quatro pontos escolhidos aleatoriamente nas parcelas sob plantio direto e convencional.

A fim de se evitar perdas de partículas e desestruturação dos agregados no processo de levantamento de uma curva de retenção, cada um deles foi envolvido com gaze. Para promover uma saturação lenta dos agregados, os mesmos foram colocados sobre papel toalha completamente umedecido (encharcado), durante um período de 24h.

Os agregados de solo investigados possuíam massas e volumes médios de, respectivamente, 23,3g e $18,4\text{cm}^3$.

As amostras de agregados completamente saturadas foram colocadas sobre a areia do funil, a qual também estava inicialmente saturada, e submetidas a pressões que variaram de 5 a 110cm de água ($4,9 \times 10^2\text{Pa}$ e $1,08 \times 10^4\text{Pa}$). A sucção aplicada nas amostras foi modificada de 5 em 5cm de água até atingir-se

uma pressão de 30cm de água e, de 10 em 10cm, até se atingir uma pressão de 110cm de água. Esta faixa de sucções foi escolhida pelo fato de se estar investigando a retenção de água dos agregados próximos à saturação, A cada aplicação de uma nova sucção, esperava-se 24h para o estabelecimento do equilíbrio da água do sistema poroso no interior do agregado. Este tempo foi suficiente para garantir que todos os poros maiores que “r”, segundo a equação 1.17, mostrada no capítulo 1, fossem completamente esvaziados. Para se evitar perdas de água do agregado por evaporação, durante o tempo de estabelecimento do equilíbrio, a extremidade superior do funil era vedada com papel filme. Após o equilíbrio as amostras eram pesadas, ressaturadas e colocadas novamente em seus respectivos funis.

Em síntese, o procedimento da coleta dos dados foi o seguinte:

- Primeiramente as amostras foram saturadas;
- As amostras saturadas foram colocadas em contato com a areia no funil de Haines modificado;
- O tubo flexível foi posicionado até aplicar a sucção desejada;
- Após o equilíbrio, a amostra foi pesada;
- Após pesada, a amostra foi ressaturada;
- Repetiu-se o procedimento acima, posicionando o tubo flexível para a aplicação de uma nova pressão.

Realizadas todas as medidas, os agregados foram colocados para secar em estufa a 105°C durante 24h.

Para se determinar a curva de retenção do agregado, determinou-se a umidade à base de volume θ que permaneceu na amostra após a aplicação da sucção h . Essa umidade foi calculada utilizando-se a equação 1.12, apresentada no capítulo 1. Nessa expressão, além de se conhecer o volume de água que permanece na amostra após a aplicação da sucção, deve-se conhecer o volume do agregado. Este volume foi determinado utilizando-se o método da parafina descrito a seguir.

3.2.1 Método da Parafina

O método da parafina consiste em imergir um agregado seco de massa “ m ”, suspenso por uma linha, em parafina para impermeabilizá-lo e, em seguida, imergi-lo em água para que, pelo empuxo produzido pela água no agregado (Princípio de Arquimedes), possa-se determinar seu volume.

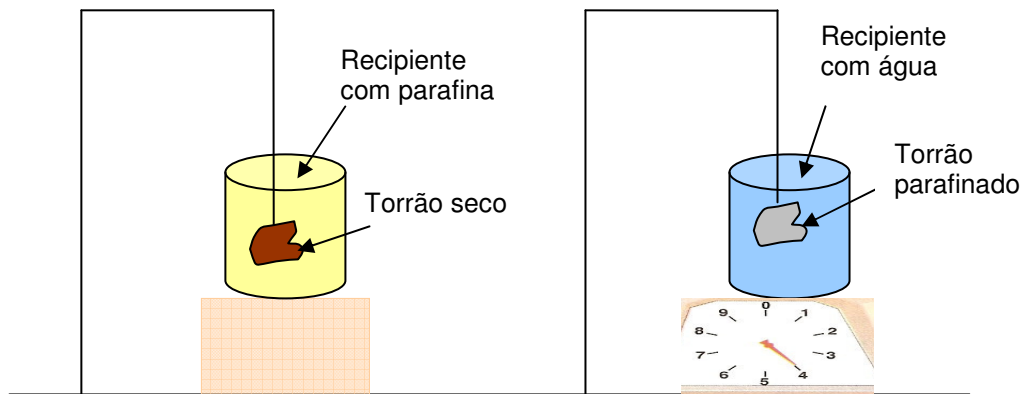


Figura 3.4: Método da parafina para determinar o volume de agregados e calcular a densidade do solo.

As amostras secas de agregados foram utilizadas para medidas da densidade global através do método da parafina. Esse método assim se apresenta:

- Inicialmente determinou-se a massa do agregado seco em estufa “ m_{seca} ”.
- Esse agregado seco foi suspenso por uma linha e imerso em parafina em temperatura próxima dos 70°C para impermeabilizá-lo;
- Pesou-se o agregado seco parafinado, determinando-se $m_{\text{agr+par}}$, a massa do agregado seco somada à massa da parafina que o envolve;
- Um recipiente com água foi colocado sobre uma balança digital tarada. Ao se imergir o agregado na água do recipiente, o empuxo dividido pela aceleração da gravidade local “ E/g ” é indicado pela balança (isto é válido pois, segundo Arquimedes, o empuxo é o peso do volume de água deslocada visto que $d_{\text{água}}=1\text{g/cm}^3$);

- O valor de E, de acordo com o princípio de Arquimedes é dado por:

$$E = \rho_{ag} \cdot g \cdot V_{deslocado}$$
 O $V_{deslocado}$ é igual ao volume do agregado V_{agr} somado ao volume da parafina V_{par} que o envolve, ou seja,

$$V_{deslocado} = V_{agr} + V_{par} = V_{agr+par}$$
- O valor de “E/g”, de acordo com o princípio de Arquimedes é dado por:

$$E / g = \rho_{ag} \cdot V_{deslocado}$$
- Como a densidade da água ρ_{ag} é igual a 1g/cm^3 , $E/g = V_{deslocado}$.
- A massa da parafina que envolve o agregado foi obtida pela expressão:

$$m_{par} = m_{agre+par} - m_{seca}$$
- O volume da parafina que envolve o agregado V_{par} pode ser determinado conhecendo-se a densidade da parafina d_{par} ($0,9\text{g/cm}^3$).

$$d_{par} = \frac{m_{par}}{V_{par}} \Rightarrow V_{par} = \frac{m_{par}}{d_{par}}$$
- Finalmente, o volume do agregado de solo foi determinado descontando-se do $V_{deslocado}$ o V_{par} , isto é: $V_{agr} = V = V_{deslocado} - V_{par}$

3.3 Densidade Global dos Agregados

De posse dos valores de m_s (determinada após a secagem do agregado em estufa) e de V (determinado pelo método da parafina), calculou-se o valor da densidade global do agregado. Para isso, utilizou-se a equação 1.4, apresentada no capítulo 1.

Com as informações de (h, θ) foi possível a determinação da curva de retenção dos agregados investigados. Os pontos (h, θ) experimentalmente obtidos foram interpolados com a utilização do programa computacional RETC (RETention Curve), do Salinity Laboratory, USDA (VAN GENUCHTEN et al., 1991), o qual utiliza o método dos mínimos quadrados para encontrar os parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (equação 1.19).

3.4 Densidade Global em Campo

Para a determinação da densidade foram coletadas três amostras de solo utilizando-se cilindros de Uhland. O diâmetro e altura desses cilindros eram de aproximadamente 5 cm.

Foi utilizado o método do anel volumétrico que consiste na introdução de um cilindro no solo, que possui um volume V . Depois de retirado do solo, cortou-se o excesso de solo nas extremidades a fim de se ter certeza de que o solo ocupa o volume V do cilindro. Levou-se o conjunto a uma estufa a 105°C , por 24h e determinou-se a massa m_s (REICHARDT & TIMM, 2004).

A densidade do solo foi determinada da forma usual, de acordo com a equação:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_t}$$

Onde ρ_s é a densidade do solo; m_s é a massa de solo seco e V_t é o volume do solo dado pelo volume do cilindro ($V_c = \pi r^2 \cdot h$).

3.5 Macroporosidade, Microporosidade e Porosidade Total dos Agregados

As medidas feitas para as curvas de retenção também foram utilizadas para o cálculo da macroporosidade, microporosidade e porosidade total dos agregados investigados.

A microporosidade é considerada como sendo o conteúdo volumétrico de água equilibrada a uma pressão de 60cm de coluna de água (EMBRAPA, 1979). Dessa maneira, obteve-se a microporosidade através da equação:

$$\text{microporosidade} = \frac{m(60\text{cm}) - m(\text{sec } a)}{V_{\text{total}}} \quad (3.4)$$

A porosidade da amostra foi calculada pela equação (EMBRAPA, 1979):

$$porosidade = \frac{m(saturada) - m(sec\ a)}{V_{total}} \quad (3.5)$$

A macroporosidade é o resultado da diferença entre a porosidade da amostra e a microporosidade (EMBRAPA, 1979), ou seja:

$$macroporosidade = porosidade - microporosidade \quad (3.6)$$

3.6 Macroporosidade, Microporosidade e Porosidade Total do Solo

Para a determinação da macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo também foram coletadas três amostras de solo de cada um dos pontos de medição utilizando-se cilindros de Uhland com diâmetro e altura de aproximadamente 5 cm.

As amostras colhidas foram saturadas seguindo o processo descrito em Reichardt & Timm (2004) e Libardi (2005). Este processo consiste basicamente em saturar gradativamente a amostra pelo processo de capilaridade.

Após saturadas, as amostras foram pesadas e a massa " m_{sat} " foi determinada. Essas amostras foram levadas a uma mesa de tensão e submetidas a uma tensão de 60 cm de coluna de água por 24 horas. Esta tensão é escolhida por ser a necessária para a drenagem da água retida nos macroporos da matriz do solo (poros com diâmetro médio maior que 100 μm). Para que não houvesse perda do solo das amostras submetidas a essa tensão, uma tela tipo "silk screen" foi presa no fundo de cada cilindro.

Após 24 horas na mesa de tensão, as amostras foram novamente pesadas e a massa " m_{60cm} " foi obtida. Na seqüência, as amostras foram secas em estufa a 105°C, por 24 horas. Após a retirada da estufa, a massa seca " m_s " de cada amostra foi determinada.

A microporosidade, macroporosidade e porosidade total do solo foram calculadas pelas equações 3.4, 3.5 e 3.6.

3.7 Textura do Solo

A textura do solo foi determinada pela análise mecânica ou granulométrica do solo realizada pelo método do densímetro (REICHARDT & TIMM, 2004), descrito a seguir:

- Colocou-se 25 g de solo peneirado a 2 mm em uma solução dispersante, formada por 50 ml de água destilada e 12,5 ml de NaOH a 1N (40 g de NaOH em 1 l de água destilada);
- Agitou-se bem essa mistura (cerca de 1 minuto) com bastão de vidro;
- Depois de agitada, a mistura foi deixada em repouso por no mínimo 12h;
- Em seguida, acrescentou-se água destilada a essa mistura, até se completar um volume de 300 ml;
- Colocou-se a mistura resultante em um agitador por ultra-som durante 30 minutos;
- Despejou-se, a mistura em uma proveta de 1 l;
- Completou-se a proveta com água destilada até 1 l;
- Calculou-se a concentração total " C_o " da suspensão com o auxílio de um densímetro;
- Após esta primeira medição da densidade, a solução foi novamente agitada por 20 segundos;
- Esperou-se o tempo de sedimentação relativo à queda da areia pelos primeiros 8 cm da solução (tempo que foi determinado pela Lei de Stokes o qual será descrito a seguir);
- Em seguida, retirou-se, por meio de uma pipeta, os primeiros 8 cm da solução, a qual, depois de se ter esperado o tempo de decantação da areia, contém apenas partículas de tamanho relativos a silte e argila;
- Esta alíquota foi colocada em uma outra proveta de 250 ml para que sua densidade fosse medida. Com este valor da densidade, calculou-se a concentração " $C_{\text{silte+argila}}$ ";
- Retornou-se essa solução à proveta de 1 l, e foi promovida uma outra agitação de 20 s desta solução;

- Esperou-se o tempo necessário à sedimentação do silte dos primeiros 8cm de solução (tempo também determinado pela lei de Stokes) ;
- Colheu-se os primeiros 8 cm de solução, a qual estava livre das frações areia e silte;
- Determinou-se a concentração desta solução e, utilizando-se o mesmo procedimento descrito para a areia, mediu-se a concentração de argila “ C_{argila} ”.

Com este procedimento, foi possível determinar as porcentagens de areia, silte e argila que compõem o solo analisado, conforme as equações (3.7), (3.8) e (3.9):

$$areia = \left(\frac{C_0 - C_{silte+argila}}{C_0} \right) \times 100\% \quad (3.7)$$

$$silte = \left(\frac{C_{silte+argila} - C_{argila}}{C_0} \right) \times 100\% \quad (3.8)$$

$$argila = \left(\frac{C_{argila}}{C_0} \right) \times 100\% \quad (3.9)$$

Onde C_0 é a concentração total da solução de solo; $C_{silte+argila}$ é a concentração de silte e argila presentes no solo e C_{argila} é a concentração de argila presente no solo.

As concentrações foram calculadas da seguinte forma:

$$C_0 = d_t - d_o \quad (3.10)$$

$$C_{silte+argila} = d_{silte+argila} - d_o \quad (3.11)$$

$$C_{argila} = d_{argila} - d_o \quad (3.12)$$

Nas quais d_t é a densidade total (solo + solução); d_o é a densidade da solução e $d_{\text{silte+argila}}$: é a densidade de silte + argila.

A densidade da solução (d_o) foi considerada a densidade da água, 1 g.cm^{-3} .

3.7.1 Lei de Stokes

Uma partícula esférica em queda livre dentro de um fluido encontra uma resistência proporcional a seu raio “ r ”, velocidade “ v ” e viscosidade do fluido “ η ” (REICHARDT & TIMM, 2004). Pela lei de Stokes, a força de fricção “ f_r ” é dada por:

$$f_r = 6\pi vr\eta \quad (3.13)$$

Devido a essa resistência, depois de algum tempo a partícula atinge velocidade constante de queda, isto é, sem aceleração. Nessas condições, o somatório de todas as forças que atuam sobre a partícula é nulo. Além da força de fricção, dirigida de baixo para cima, a partícula está sujeita a uma força de empuxo f_e também dirigida de baixo para cima, a qual é dada por:

$$f_e = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho_f g \quad (3.14)$$

Na qual, ρ_f é a densidade do fluido, g a aceleração da gravidade e $\frac{4\pi r^3}{3}$ o volume da partícula. A última força que atua sobre a partícula é o seu peso dado por:

$$f_p = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho_g g \quad (3.15)$$

Onde ρ_g é a densidade da partícula.

Fazendo o balanço das forças, obtém-se:

$$-6\pi vr\eta - \frac{4\pi}{3} r^3 \rho_f g + \frac{4\pi}{3} r^3 \rho_g g = 0 \quad (3.16)$$

Donde:

$$v = \frac{2}{9} \frac{r^2 g}{\eta} (\rho_g - \rho_f) = \frac{d^2 g}{18\eta} (\rho_g - \rho_f) \quad (3.17)$$

Sendo $d=2r$, o diâmetro da partícula. Como $v=h/t$, pode-se calcular o tempo necessário para uma partícula de diâmetro d percorrer em queda livre uma altura h pela equação:

$$t = \frac{18h\eta}{d^2 g (\rho_g - \rho_f)} \quad (3.18)$$

Onde η é a viscosidade do fluido; g é a aceleração da gravidade; ρ_g é a densidade da partícula e ρ_f é a densidade do fluido.

Considerando as partículas esféricas do solo, de densidade uniforme, que decantem individualmente, que o fluxo do fluido ao redor delas é laminar e que as partículas são grandes o suficiente para não serem afetadas pelos movimentos térmicos das moléculas do fluido, a lei de Stokes, representada pelas equações 3.17 e 3.18, pode ser empregada na determinação da distribuição das partículas do solo (REICHARDT & TIMM, 2004).

3.8 Condutividade Hidráulica dos Agregados

Para as medidas da condutividade hidráulica foi utilizado um equipamento baseado no que é apresentado em Leeds-Harrison & Youngs (1997), como mostra a figura abaixo:

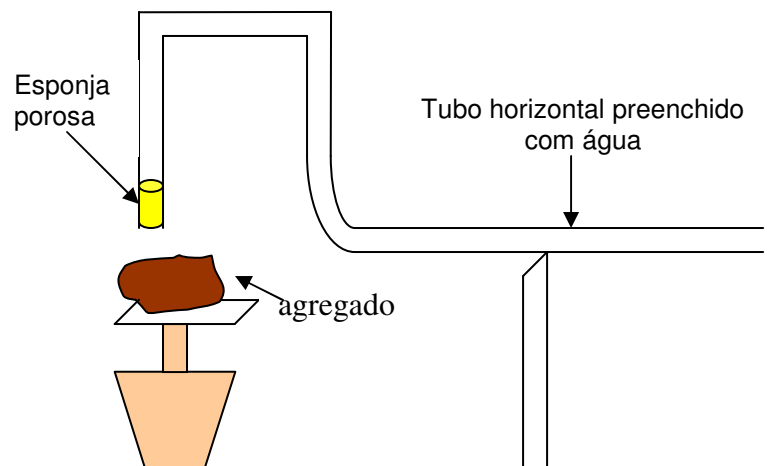


Figura 3.5: Esquema do arranjo experimental desenvolvido por Leeds-Harrison & Youngs (1997).

Conforme descrito no capítulo 1, a água do tubo horizontal é liberada para o solo através da esponja porosa contida no final do tubo cilíndrico de raio R . Para fazer as medidas da condutividade hidráulica usou-se o seguinte procedimento:

- Inicialmente o tubo com a esponja foi colocado no mesmo nível do tubo horizontal, o que manteve o sistema em equilíbrio.
- A ponta que continha a esponja foi posicionada a 0,5cm acima do tubo horizontal, criando-se assim uma pequena sucção na extremidade que continha a esponja;
- Em seguida, elevou-se o agregado até o contato com a esponja nessa condição;
- Mediu-se a taxa constante do fluxo de água que penetrava na superfície do agregado. Para isso, foi medido o volume ΔV de água absorvido pelo agregado em um determinado intervalo de tempo.
- Para se determinar esse volume ΔV , mediu-se o avanço linear Δx da água no tubo horizontal (succionada pelo agregado durante o intervalo de tempo analisado) e multiplicou-se pela área de secção transversal deste tubo. Como se trata de um tubo circular de raio igual a r , o volume de água pode ser calculado por: $\Delta V = \pi R^2 \cdot \Delta x$. Na qual, R é o raio do tubo circular.
- O fluxo de água que penetrou no agregado, em um determinado intervalo de tempo Δt foi dado por:

$$Q = \frac{\pi r^2 \Delta x}{\Delta t} \quad (3.19)$$

- Para cada sucção p_0 aplicada pelo equipamento, foram realizadas três medidas de fluxo Q . O valor da média dessas três medições foi adotado como sendo o fluxo Q para a pressão p_0 .
- A taxa constante do fluxo de água Q que penetra pela superfície do solo em condições de saturação se relaciona à pressão p_0 , ao raio R da esponja, à sortividade S_0 e condutividade hidráulica saturada do solo K_0 segundo a equação 1.23, mostrada no capítulo 1.
- Q está linearmente relacionado à p_0 , a pressão com que a água é liberada ao agregado e o gráfico de Q versus p_0 é uma reta com inclinação igual a $4RK_0$.
- Como R é conhecido (neste caso é igual ao raio da ponta que contém a esponja) e K_0 , é a condutividade hidráulica do agregado de solo na condição de saturação, pode ser determinada pela utilização da equação 1.25;
- E a condutividade hidráulica saturada k_0 do agregado é, portanto, dada por:

$$k_0 = \frac{1}{4R} \frac{\Delta Q}{\Delta p_0} \quad (3.20)$$

Foram realizadas 3 repetições de medidas para cada agregado, sendo que, após cada medida, os agregados eram levados à estufa a 105°C durante 24h para secar. Foram feitas medidas com pressões p_0 de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 cm de água.

Estas pressões foram usadas devido ao fato da esponja do sistema ser esvaziada em sucções maiores que 2cm de água.

3.9 Condutividade Hidráulica em Campo

As medidas de condutividade hidráulica saturada foram realizadas utilizando-se o Permeômetro de Guelph. O esquema ilustrativo deste tipo de permeômetro é apresentado na figura abaixo:

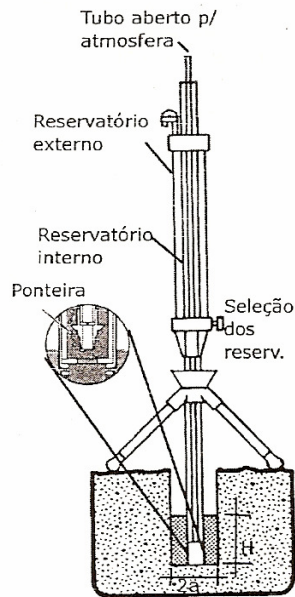


Figura 3.6: Esquema ilustrativo do permeômetro de Guelph

Conforme o “2800KI OPERATING INSTRUCTIONS” (Manual de Instruções do Permeômetro de Guelph) o procedimento usado foi o seguinte:

- Em cada ponto da grade amostral, utilizando-se um trado apropriado, foi feito um poço para instalação do permeômetro. Tal poço possuía aproximadamente 6 cm de diâmetro e 10 cm de profundidade;
- As medidas de taxas de infiltração foram realizadas em cargas constantes de 5 cm (R_1) e 10 cm (R_2) de água;
- As leituras de taxas de infiltração foram determinadas em intervalos de tempo de aproximadamente 1 minuto. A experiência mostrou que para os solos investigados, o estado estacionário de infiltração era atingido em cerca de alguns minutos do início do teste de infiltração. Estado estacionário é o estado em que a taxa de queda de água no reservatório não muda significativamente em intervalos de tempos

sucessivos. Nesse caso, é considerado três intervalos de tempos sucessivos.

A condutividade hidráulica saturada do solo foi calculada pelas equações 3.21 ou 3.22, dependendo de se ter utilizado a opção de reservatório combinado ou interno:

Para o reservatório combinado

$$K_{sat} = (0,0041)(X)(R_2) - (0,0054)(X)(R_1) \quad (3.21)$$

e para o reservatório interno.

$$K_{sat} = (0,0041)(Y)(R_2) - (0,0054)(Y)(R_1) \quad (3.22)$$

Nas quais K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada; R_1 é a taxa de infiltração de água, determinada pelo permeâmetro, para uma carga constante de 5 cm de água; R_2 é a taxa de infiltração de água, determinada pelo permeâmetro, para uma carga constante de 10 cm de água e X e Y são constantes fornecidas pelo fabricante do permeâmetro.

No caso do permeâmetro utilizado, as constantes X e Y são, respectivamente, 35,22 e 2,15 cm².

3.10 Função Capacidade de Água (FCA)

A equação 1.21, mostrada no capítulo 1, chamada de equação de van Genuchten apresenta 4 parâmetros de ajuste independentes (θ_s , θ_r , α e n). Em geral, θ_s e θ_r são estimados e α e n ajustados com base nos valores obtidos para a curva de retenção.

Como mencionado no capítulo 1, a partir desses parâmetros de ajuste obtém-se a “Função de Capacidade de Água” (FCA), representada pela equação 1.21 (capítulo 1), a qual reflete a distribuição de poros no interior de uma amostra de solo.

Para que pudessem ser comparadas, as FCAs dos diferentes tratamentos foram modificadas de forma a que todas elas possuíssem o mesmo valor máximo. Esse procedimento foi realizado dividindo-se todos os valores da FCA pelo seu valor máximo.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos, com base na revisão bibliográfica, os resultados obtidos em campo e em laboratório.

Nas tabelas 1 e 2 são apresentados os valores encontrados para a condutividade hidráulica saturada, a densidade global, a porosidade total, a macroporosidade e microporosidade para o solo em condições de campo e para os agregados de solo, ambos retirados da área sob o sistema de Plantio Convencional:

Tabela1: Valores para a condutividade hidráulica saturada, densidade global, porosidade total, a macroporosidade e microporosidade para o solo sob plantio convencional.

Ponto	K_{sat} (cm/s)	$d(g/cm^3)$	Porosidade Total	Micro	Macro	areia	silte	argila
1	4.954E-03	1.09	0.59	0.42	0.17			
2	1.108E-03	1.02	0.62	0.39	0.23			
3	3.580E-03	1.05	0.59	0.40	0.19			
4	3.930E-03	1.04	0.60	0.39	0.21			
MÉDIA	3.40E-03	1.05	0.60	0.40	0.20	9,23	27,70	63,07
DES PAD	1.41E-03	0.03	0.01	0.01	0.02	0,28	5,21	5,34

Tabela2: Valores para a condutividade hidráulica saturada, densidade global, porosidade total, a macroporosidade e microporosidade para os agregados de solo sob plantio convencional.

Ponto	K_{sat} (cm/s)	$d(g/cm^3)$	Porosidade Total	Micro	Macro
1	2.45E-04	1.29	0.49	0.45	0.04
2	9.95E-04	1.26	0.57	0.48	0.09
3	3.47E-04	1.58	0.80	0.60	0.21
4	3.09E-04	1.43	0.61	0.52	0.08
MÉDIA	4.74E-04	1.39	0.62	0.51	0.11
DES PAD	3.03E-04	0.13	0.11	0.06	0.06

Nas tabelas 3 e 4 são apresentados os valores encontrados para a condutividade hidráulica saturada, a densidade global, a porosidade total, a

macroporosidade e microporosidade, para o solo em condições de campo e para os agregados de solo, ambos retirados da área sob o sistema de Plantio Direto:

Tabela3: Valores para a condutividade hidráulica saturada, densidade global, porosidade total, a macroporosidade e microporosidade para o solo sob plantio direto.

Ponto	Kfs (cm/s)	d(g/cm ³)	Porosidade Total	Micro	Macro	Areia	Silte	Argila
1	1.687E-03	0.92	0.65	0.48	0.17			
2	1.398E-03	0.99	0.62	0.46	0.16			
3	3.418E-03	1.06	0.59	0.49	0.10			
4	1.652E-03	1.15	0.57	0.51	0.06			
MÉDIA	2.04E-03	1.03	0.61	0.49	0.12	9,52	28,69	61,69
DES PAD	8.04E-04	0.09	0.03	0.02	0.05	0,59	3,19	3,24

Tabela4: Valores para a condutividade hidráulica saturada, densidade global, porosidade total, a macroporosidade e microporosidade, para os agregados de solo sob plantio direto.

Ponto	K(cm/s)	d(g/cm ³)	Porosidade Total	Micro	Macro
1	2.43E-04	1.334	0.63	0.58	0.05
2	9.39E-05	1.159	0.66	0.59	0.07
3	1.62E-04	1.240	0.71	0.64	0.07
4	1.80E-04	1.272	0.63	0.59	0.04
MÉDIA	1.7E-04	1.25	0.66	0.60	0.06
DES PAD	5.3E-05	0.06	0.03	0.02	0.01

4.1 Macroporosidade e Densidade – campo X agregados

Os resultados mostram que as medidas de campo, para os dois sistemas de plantio investigados, apresentam em média um valor maior para a macroporosidade do solo quando comparados ao valor desta propriedade para os agregados do mesmo solo (tabelas 1, 2, 3 e 4).

Em particular, para os dois sistemas de manejo, verifica-se que em média a macroporosidade das amostras de solo em condições de campo é aproximadamente o dobro da observada para os agregados de solo.

Os agregados de solo possuem pequena ou nenhuma quantidade de macroporos. Dessa forma, quando comparados ao mesmo solo em condições de

campo, os agregados possuem, naturalmente, uma maior densidade. Além disso, verifica-se experimentalmente que a densidade de agregados aumenta à medida que eles diminuem de tamanho.

Na literatura (NOLLA, 1982; SCHERPINSKI, 2003) há o relato de que maiores valores da macroporosidade do solo, em geral são acompanhados de menores valores da densidade do solo. Neste trabalho, obtiveram-se resultados que concordam com esses trabalhos. Nos agregados de solo sob plantio convencional obteve-se um valor médio de $(1,39 \pm 0,13) \text{ g/cm}^3$ para a densidade e um valor médio menor de macroporosidade $(0,11 \pm 0,06) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Já para o solo em condições de campo no mesmo tipo de plantio, um valor de $(1,05 \pm 0,03) \text{ g/cm}^3$ para a densidade e um valor médio de macroporosidade maior de $(0,20 \pm 0,06) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Em relação ao plantio direto foi obtido resultado semelhante. Os valores das densidades seguidos das porosidades do solo em forma de agregados e em condições de campo foram respectivamente: $(1,03 \pm 0,09) \text{ g/cm}^3$ e $(0,12 \pm 0,05) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; e $(1,25 \pm 0,06) \text{ g/cm}^3$ e $(0,06 \pm 0,01) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

4.2 Correlação da Condutividade Hidráulica com os Parâmetros Físicos do Solo – Campo X Agregados

Como mostrado nas tabelas 1 e 2, a condutividade hidráulica saturada média K_{sat} para o solo sob plantio convencional foi de $(3,39 \pm 1,41) 10^{-3} \text{ cm/s}$ para o solo em condições de campo e de $(4,74 \pm 3,03) 10^{-4} \text{ cm/s}$ para os agregados de solo. Para o sistema de plantio direto, esses valores ficaram em torno de: $(2,0 \pm 0,8) 10^{-3} \text{ cm/s}$ (campo) e $(1,7 \pm 0,5) 10^{-4} \text{ cm/s}$ (agregados).

Esses resultados mostram que os valores de K_{sat} para os solos em condições de campo superaram em aproximadamente uma ordem de grandeza os valores da K_{sat} para os solos em forma de agregados.

Como, em maior parte a infiltração de água no solo em condições de saturação é devida aos macroporos do solo (BORGES et al., 1999), provavelmente tenha sido por esta razão que a condutividade hidráulica saturada tenha sido em

média maior para o solo em condições de campo, que apresentou maior macroporosidade, do que nos agregados (BRADY, 1983; MBAGWU, 1995).

A seguir, nas figuras 4.1 e 4.2, são mostrados os gráficos que apresentam o comportamento da condutividade hidráulica saturada do solo e dos agregados em função da densidade do solo.

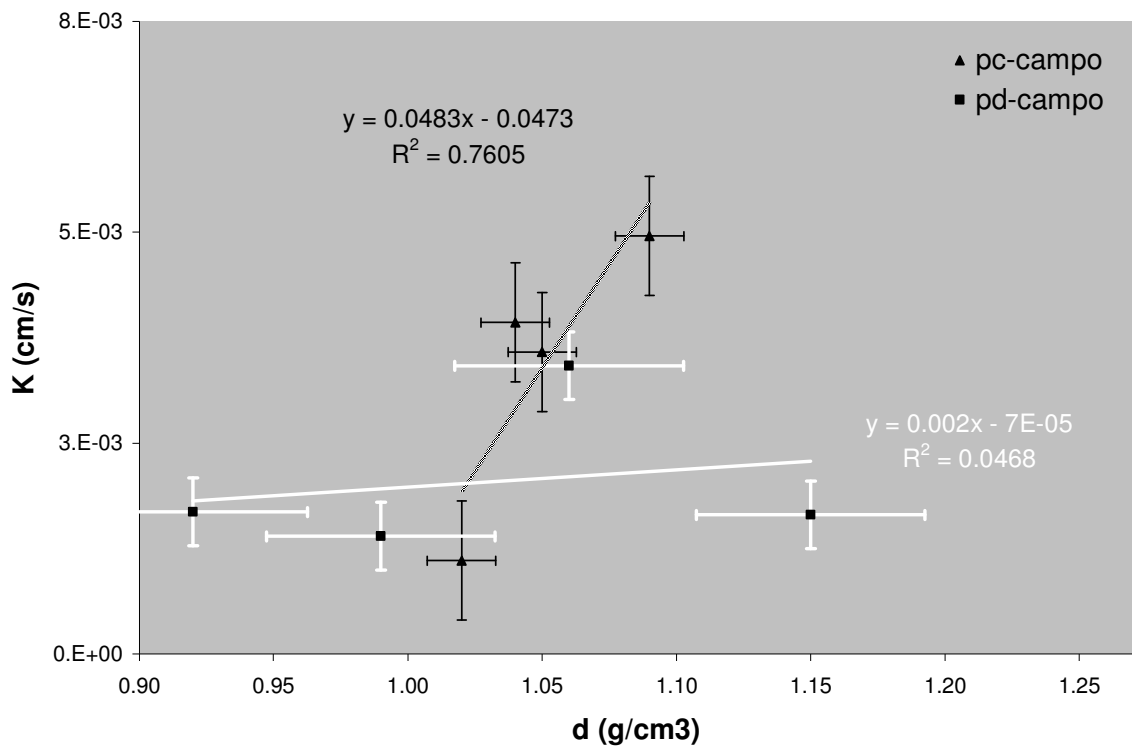


Figura 4.1: Condutividade hidráulica saturada em função da densidade para os solos sob plantio convencional e direto em condições de campo.

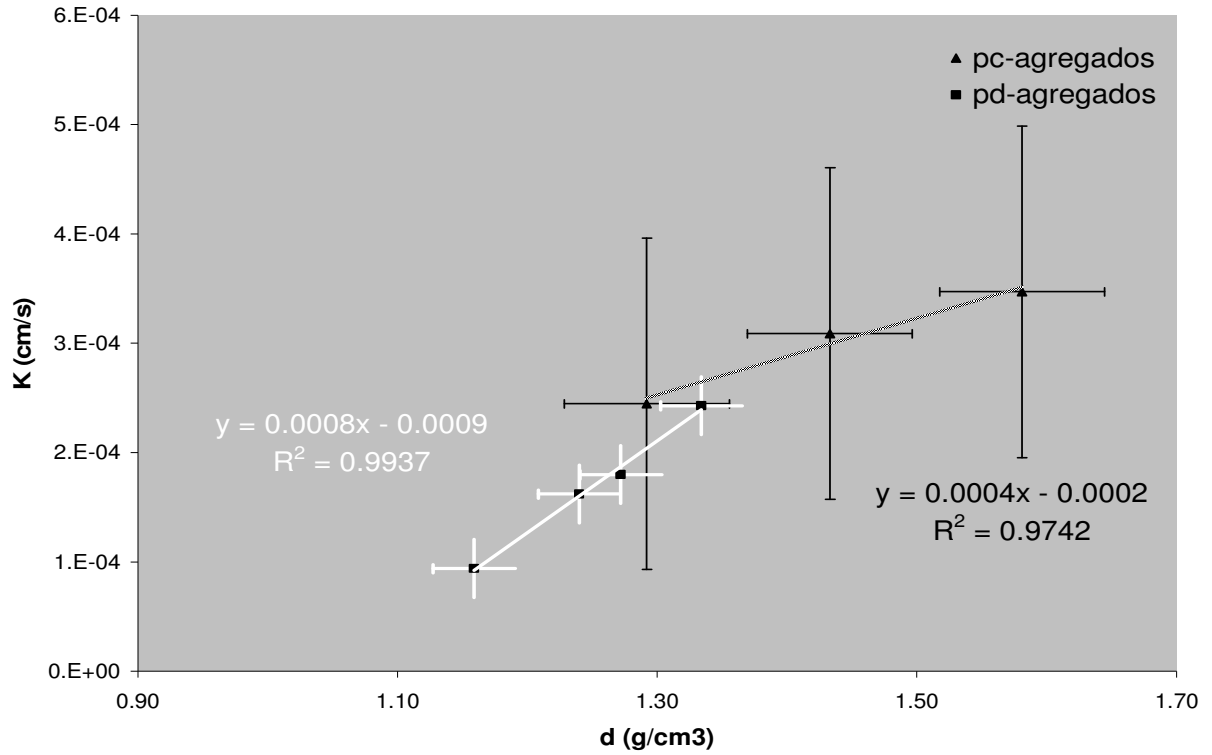


Figura 4.2: Condutividade hidráulica saturada em função da densidade para os agregados de solo sob plantio convencional e direto.

A seguir, nas figuras 4.3 e 4.4, são mostrados os gráficos que apresentam o comportamento da condutividade hidráulica saturada do solo e dos agregados em função da macroporosidade do solo.

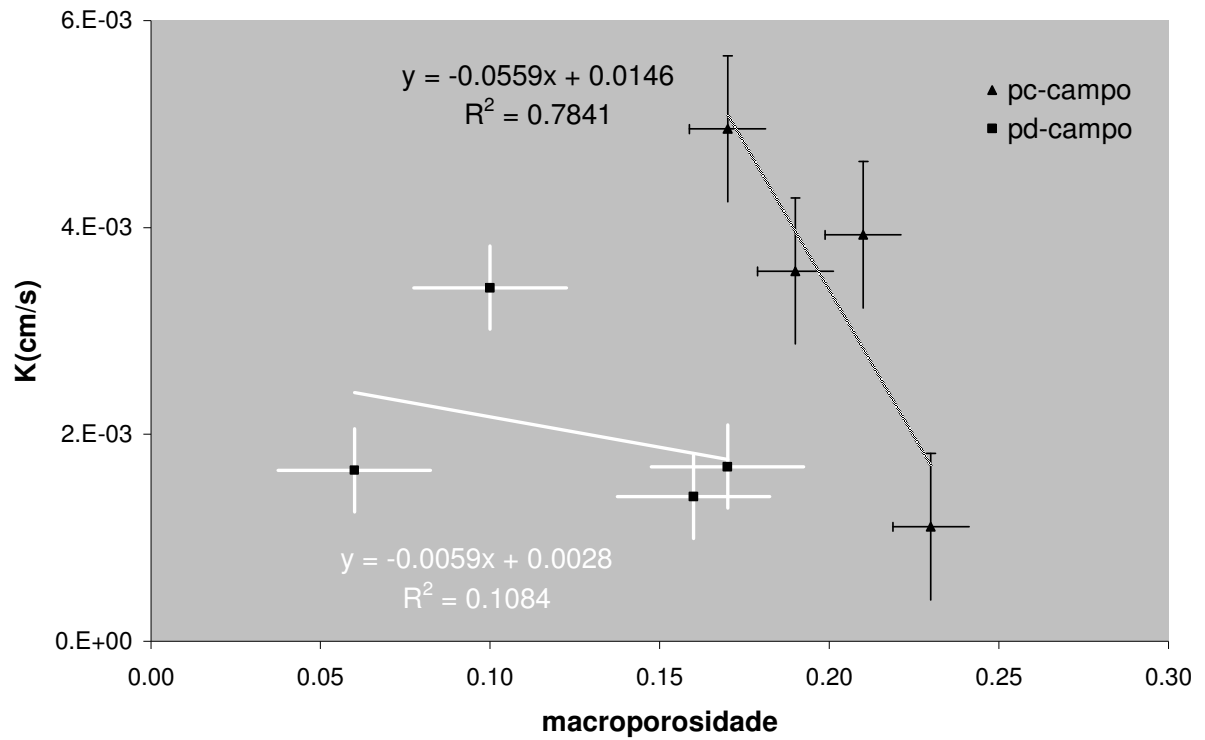


Figura 4.3: Condutividade hidráulica saturada em função da macroporosidade para os solos sob plantio convencional e direto em condições de campo.

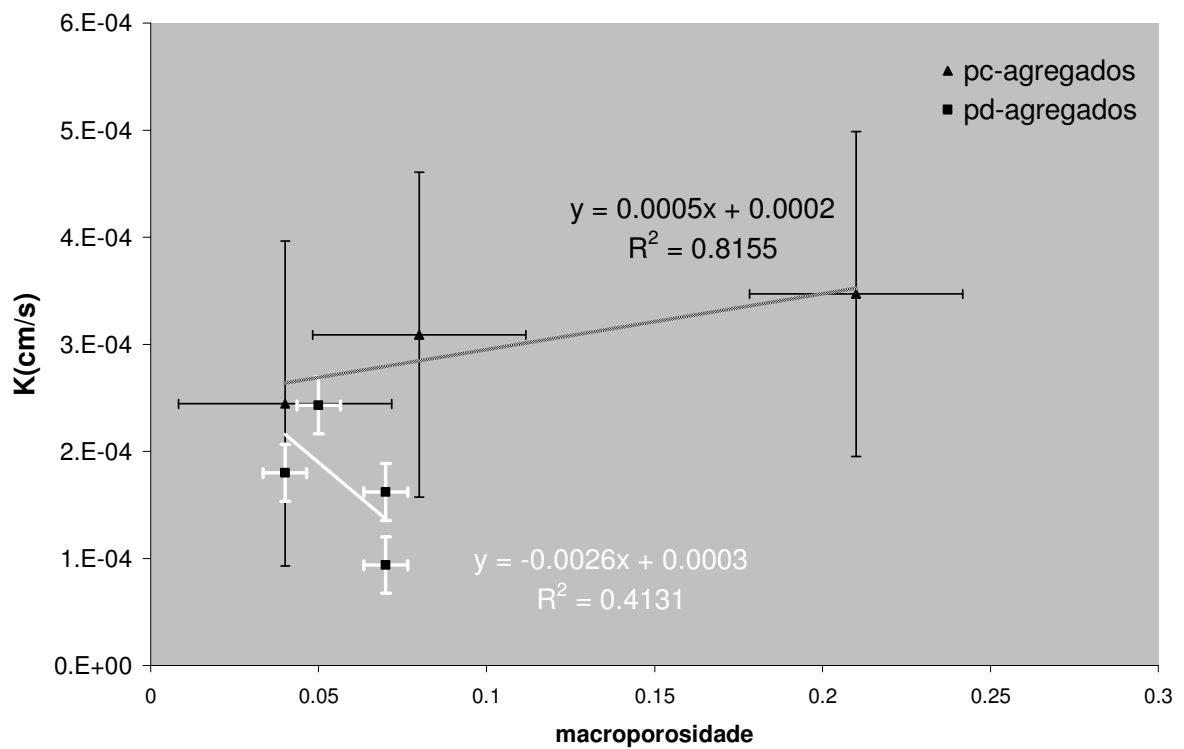


Figura 4.4: Condutividade hidráulica saturada em função da macroporosidade para os agregados de solo sob plantio convencional e direto.

Nota-se que houve diferenças consideráveis entre os gráficos com os dados obtidos em campo e com agregados.

Segundo Mesquita & Moraes (2004) geralmente há maior variação na densidade nas camadas superficiais do solo devido ao tipo de manejo nele empregado. Isso pode propiciar a formação de poros com diâmetros maiores, os quais permitem maiores valores de condutividade hidráulica em campo. Em contrapartida, o tráfego de máquinas e implementos agrícolas na superfície do solo também causa a redução no tamanho dos poros de agregados do solo. Isso resulta em uma baixa macroporosidade e em um aumento da densidade dos agregados em comparação com o solo como um todo (NDIAYE et al, 2007; VIANA et al., 2004).

Observando as figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 percebe-se: 1) uma leve diminuição da condutividade hidráulica saturada com o aumento da macroporosidade do solo e; 2) um aumento da condutividade hidráulica saturada do solo com o aumento de sua densidade global.

Pereira et al. (2001), Green et al (2003) e Aimrun (2004) relacionam em seus estudos um aumento da condutividade hidráulica com o aumento da macroporosidade do solo, resultado que contradiz o que foi aqui obtido. No entanto, Sillon et al. (2003), Tamari (1994) e Gupta et al. (1989) mencionam que o aumento da densidade global do solo, com conseqüente diminuição de sua porosidade, pode produzir o aumento da condutividade hidráulica do solo.

Essa aparente contradição é explicada pelos autores, considerando-se que os agregados em um solo mais compactado estão mais próximos uns dos outros. Segundo os autores, isso aumenta a superfície de contato entre esses agregados, o que torna mais efetiva a transmissão de água de um ponto a outro no interior desse solo. Esse fato pode explicar o aumento da condutividade hidráulica do solo e dos agregados com o aumento de suas densidades (figuras 4.1 e 4.2).

Já Mbagwu (1995), ao investigar três sítios distintos, observou um aumento da condutividade hidráulica saturada com o aumento da macroporosidade do solo e, verificou uma diminuição da K_{sat} com o aumento da densidade global do solo, em apenas dois destes sítios. Segundo ele a propriedade que mais influencia a K_{sat} é a macroporosidade do solo.

Malone et al, 2003 apontam que o manejo, ao mesmo tempo em que pode aumentar a macroporosidade do solo, pode também fazer com que a continuidade dos macroporos do solo seja destruída.

O maior revolvimento do solo do plantio convencional contribui para o aumento da quantidade de macroporos do solo, o que implica, em geral, em uma maior condutividade hidráulica devido ao aumento da macroporosidade do solo (HOLANDA et al. (2003); MBAGWU, (1995)).

Segundo Corsini (1974), citado por Pereira et al. (2001), comparando a condutividade hidráulica em campo e em laboratório concluiu que a macroporosidade influenciou decisivamente nos valores obtidos para K_{sat} nas diferentes profundidades avaliadas. Para Corsini (1974) a condutividade hidráulica é uma das propriedades do solo que melhor indica as diferenças estruturais nas diversas camadas que constituem um perfil.

Coutadeur et al. (2002) encontraram maiores valores para a condutividade hidráulica para um solo de canteiros de semente e para um solo não cultivado quando em comparação a um solo arado. Segundo eles, na camada arada houve redução da condutividade hidráulica pelo fato do sistema de manejo promover o rompimento da continuidade dos macroporos do solo, discordando dos resultados obtidos neste trabalho, onde a condutividade hidráulica apresentou um valor médio maior no plantio convencional comparado com o plantio direto (tabelas 1, 2, 3 e 4).

Segundo Mesquita & Moraes (2004) os valores da condutividade hidráulica do solo podem diferir entre si, de várias ordens de grandeza, mesmo em posições tomadas muito próximas, e isto é devido ao fato de que K_{sat} é uma propriedade que é mais dependente da estrutura do que da textura do solo.

Mesquita et al. (2002), ao fazerem um estudo sobre as distribuições de probabilidade mais adequadas para representar K_{sat} do solo, verificaram que essa propriedade apresentou alta variabilidade (ABREU et al. (2003); ASSIS & LANÇAS (2005); EGUCHI et al. (2003); GUIMARÃES (2000); SCHERPINSKI (2003)). Este fato foi observado neste trabalho uma vez que os valores de K_{sat} foram obtidos em pontos distintos dos campos sob plantio direto e convencional.

Neste trabalho, verificou-se uma diminuição da K_{sat} com o aumento da macroporosidade do solo, figuras 4.3 e 4.4. No entanto, se forem analisados os valores médios dessas propriedades em campo, verifica-se que o solo sob plantio convencional apresenta um valor de K_{sat} 66% maior que a do solo sob plantio direto e uma macroporosidade que é aproximadamente o dobro da macroporosidade do plantio direto.

Para os agregados ocorre a mesma tendência, qual seja: a macroporosidade dos agregados de solo sob plantio convencional é aproximadamente o dobro da que é encontrada nos agregados de solo sob plantio direto e sua K_{sat} é aproximadamente 180% maior que a dos agregados de solo sob plantio direto.

Desta forma, não é claro que uma maior macroporosidade esteja relacionada a uma maior condutividade hidráulica do solo. Em geral, isso é verdade. No entanto, o sistema de manejo ao mesmo tempo em que produz um aumento na macroporosidade do solo, pode produzir uma diminuição da conectividade entre os macroporos e poros pré-existentes na matriz do solo.

A seguir, nas figuras 4.5 e 4.6, são mostrados os gráficos que apresentam o comportamento da condutividade hidráulica saturada do solo e dos agregados em função de sua porosidade.

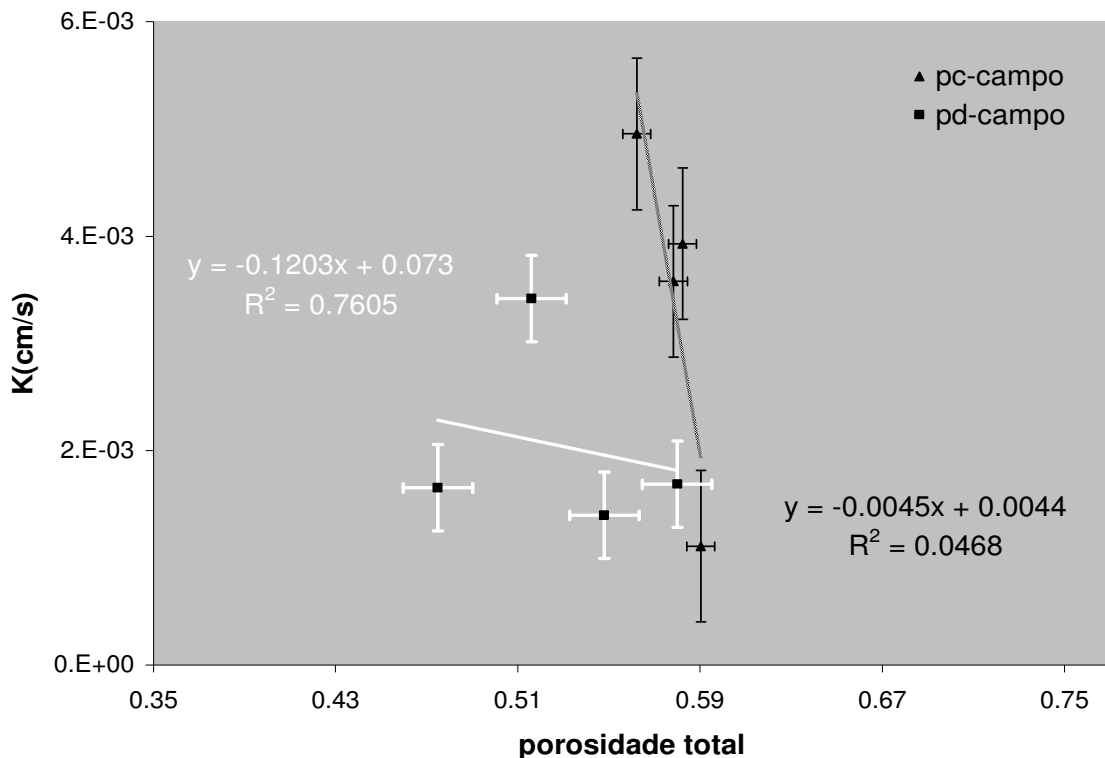


Figura 4.5: Condutividade hidráulica saturada em função da porosidade total para os solos sob plantio convencional e direto em condições de campo.

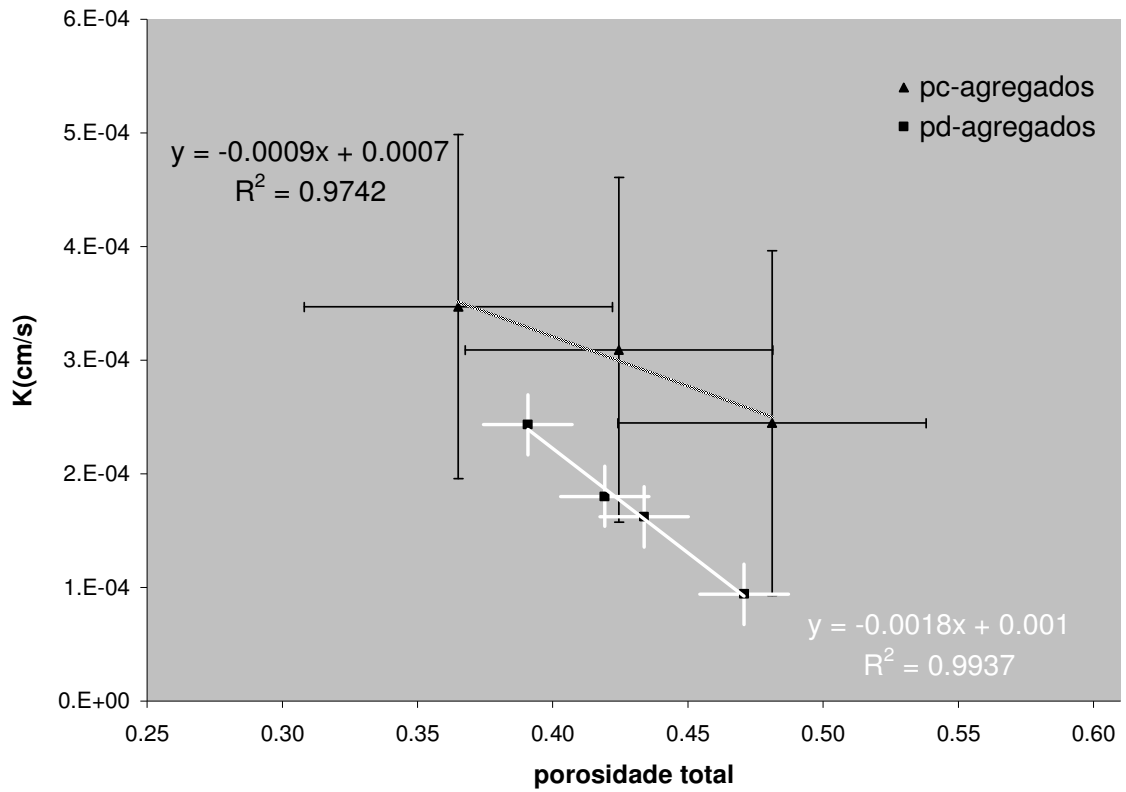


Figura 4.6: Condutividade hidráulica saturada em função da porosidade total para os agregados de solo sob plantio convencional e direto.

A seguir, nas figuras 4.7 e 4.8, são mostrados os gráficos que apresentam o comportamento da condutividade hidráulica saturada do solo e dos agregados em função da microporosidade do solo.

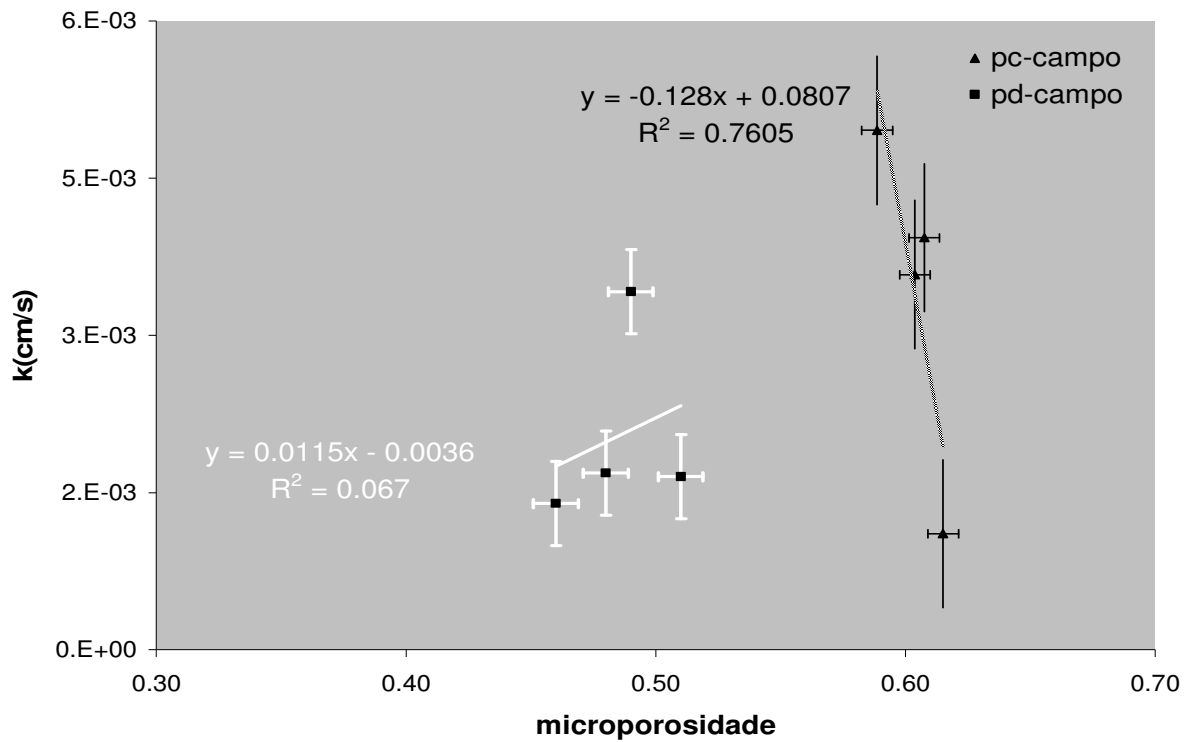


Figura 4.7: Condutividade hidráulica saturada em função da microporosidade para os solos sob plantio convencional e direto em condições de campo.

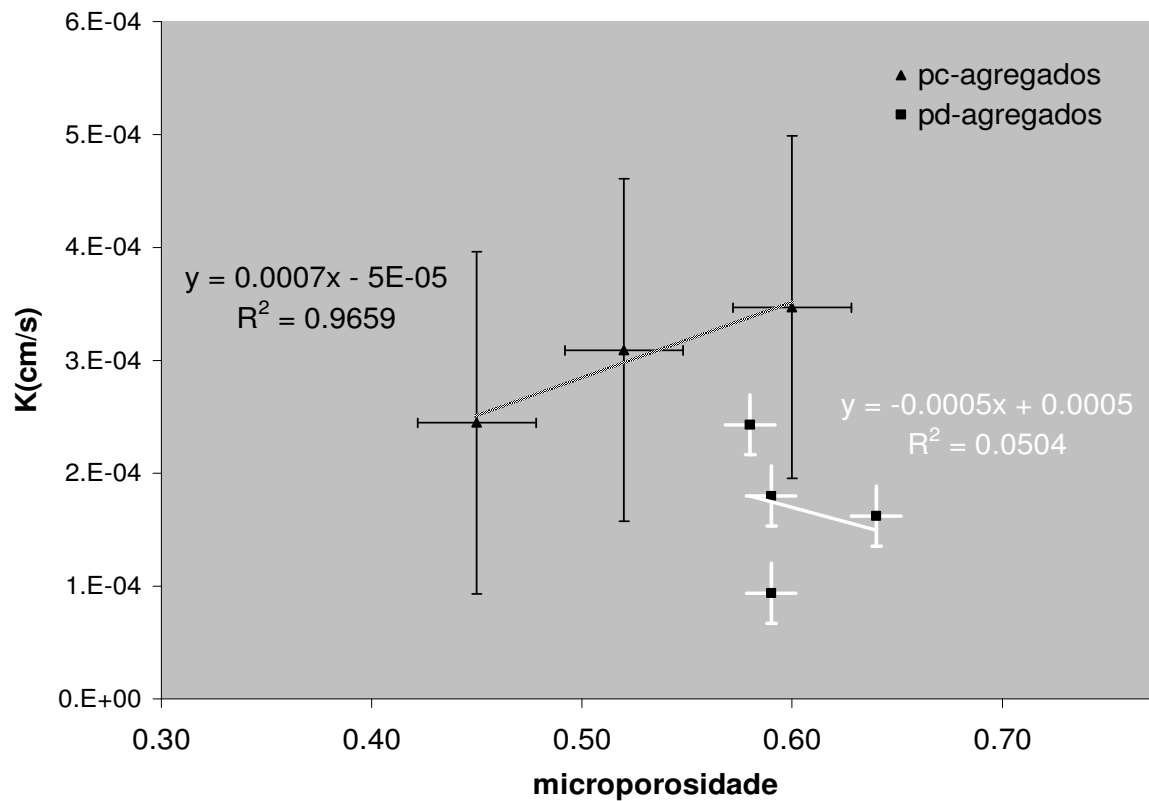


Figura 4.8: Condutividade hidráulica saturada em função da microporosidade para os agregados de solo sob plantio convencional e direto.

Em relação à correlação da K_{sat} com a porosidade total do solo observa-se que: o valor médio da porosidade total nos agregados do plantio direto é 1,06 vezes maior quando comparado ao plantio convencional. Nota-se, portanto, que tanto a densidade como a porosidade total tiveram pouca variação entre os dois tipos de manejo.

Segundo Mbagwu (1995) a porosidade em si não é um parâmetro adequado para um bom prognóstico da K_{sat} . Eles apontam uma boa correlação entre a K_{sat} e a macroporosidade do solo. Jarvis et al, 2002, reafirmam esta informação uma vez que não encontraram correlação significativa entre a K_{sat} e a porosidade do solo, esta última, segundo eles, uma propriedade bastante sujeita a erros de determinação.

Albuquerque et al. (2001), também descartam a porosidade do solo como um parâmetro a ser correlacionado com a K_{sat} . Em seus estudos, confirmando o que foi mencionado anteriormente, indicam que a K_{sat} é muito mais relacionada à macroporosidade do solo do que a porosidade em si, e essa correlação foi muito mais acentuada em solos de floresta que em solos submetidos aos plantios direto e convencional.

Nos solos sob plantio direto e convencional, tanto ao nível de campo quanto de agregados, houve tendência de uma ligeira diminuição da K_{sat} com o aumento da macroporosidade do solo. Resultados que contradizem os que são observados na literatura.

A microporosidade apresentou um valor médio de 1,1 vezes maior no plantio direto comparada ao sistema de plantio convencional. As tabelas 1 e 2 mostram que o valor da microporosidade foi de $(0,40 \pm 0,01) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para o solo sob plantio convencional em campo e $(0,51 \pm 0,06) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para os agregados do mesmo plantio. Já no plantio direto (tabelas 3 e 4) essa propriedade apresentou valores que ficaram entre $(0,49 \pm 0,02) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ em condições de campo e $(0,59 \pm 0,02) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para os agregados.

Segundo Guimarães (2000) e Scherpinski (2003), que também encontraram um valor médio maior no plantio direto para esta propriedade, isto se deve ao fato de que neste sistema de plantio é comum ocorrer um maior número de microporos no solo, devido a ele estar mais compactado.

Vieira & Muzilli (1984) e Corrêa (1985) afirmam que o solo no sistema de plantio direto geralmente apresenta maiores valores de densidade e microporosidade e menores valores de macroporosidade e porosidade total em comparação com o preparo convencional. Segundo esses autores, isto é decorrente do não revolvimento do solo e da movimentação de máquinas e implementos agrícolas utilizados no preparo do solo.

Observando as figuras 4.7 e 4.8 percebe-se uma tendência de aumento da K_{sat} com o aumento da microporosidade em solo sob plantio direto em condições de campo. A mesma tendência é observada nos agregados de solo sob plantio convencional. Esses resultados discordam de Cooper et al. (2005), pois segundo eles, o aumento da microporosidade contribui para uma menor condutividade hidráulica do solo.

Segundo Dexter et al. (2004) os macroporos e os mesoporos são os poros que mais contribuem para o aumento na condutividade hidráulica. No entanto, Bodhinayke et al. (2004) afirmam que uma alta macroporosidade e mesoporosidade não necessariamente implicam em uma condutividade hidráulica alta.

Segundo Marques (2004) o volume maior de microporos está diretamente relacionado com a capacidade de retenção da água no solo. De acordo com Guimarães (2000) no plantio direto a microporosidade é mais uniforme que no plantio convencional o que proporciona um maior armazenamento de água para a planta. Resultados que concordam com essa afirmação foram obtidos neste trabalho. Isso pode ser observado pela inspeção das curvas de retenção e das curvas de distribuição de poros obtidos para os solos sob esses dois tipos de plantio, como será visto a seguir.

Em média, a microporosidade nos agregados do solo sob plantio direto foi 10 vezes maior do que sua macroporosidade, enquanto que no plantio convencional essa relação foi de apenas 4,6 vezes. Isto indica que o plantio direto apresenta uma capacidade de retenção de água maior quando comparado ao plantio convencional.

4.3 Curvas de Retenção e FCAs

As figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 mostram as curvas de retenção normalizadas (θ/θ_s versus h) e as FCAs para cada plantio investigado:

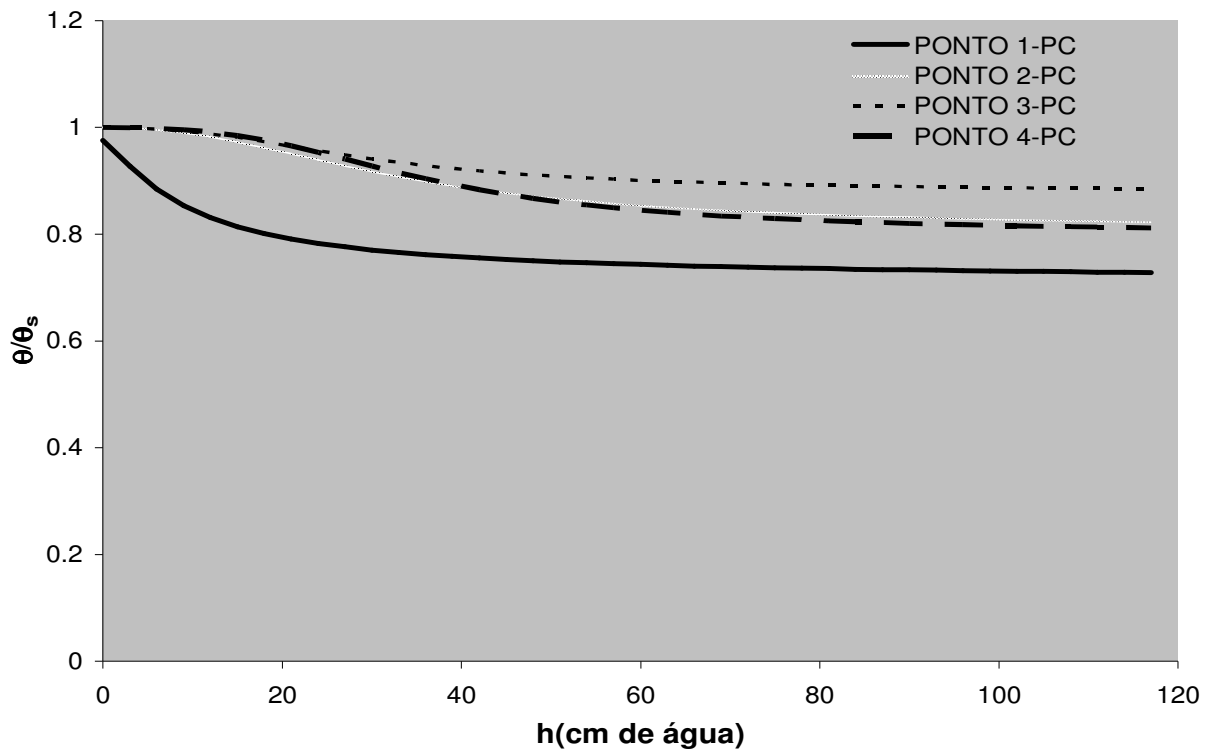


Figura 4.9: Curva de retenção normalizada para os agregados do plantio convencional.

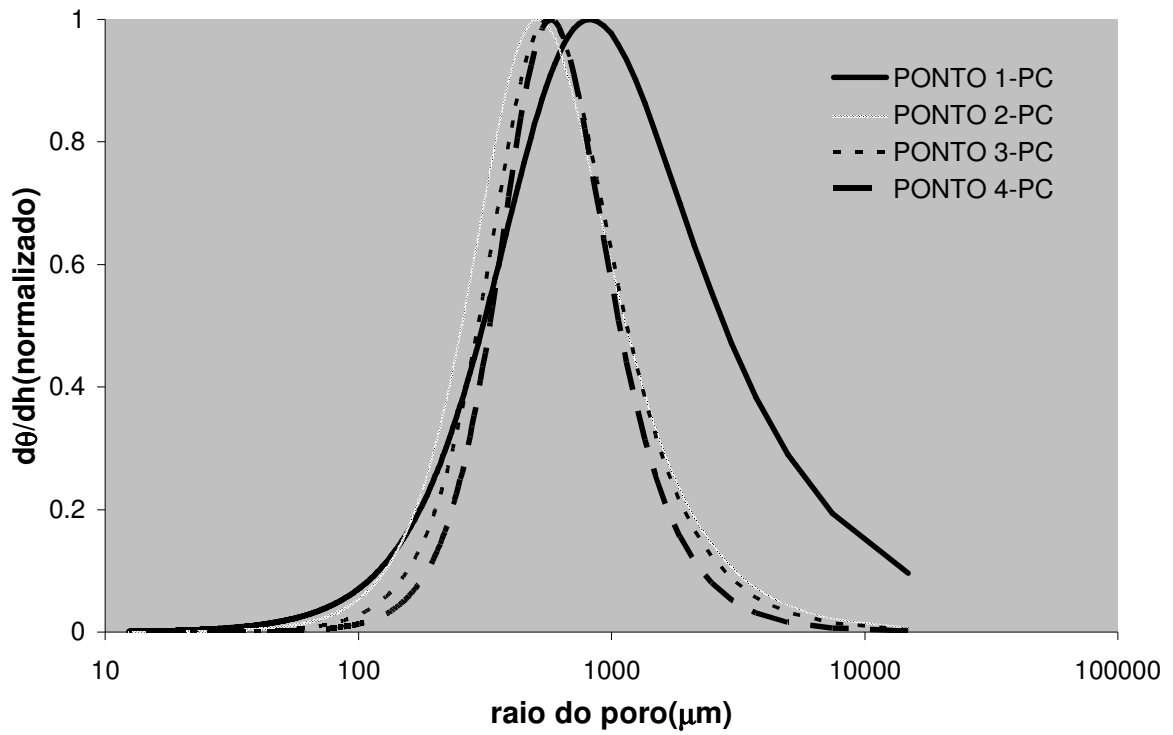


Figura 4.10: FCAs para os agregados do plantio convencional.

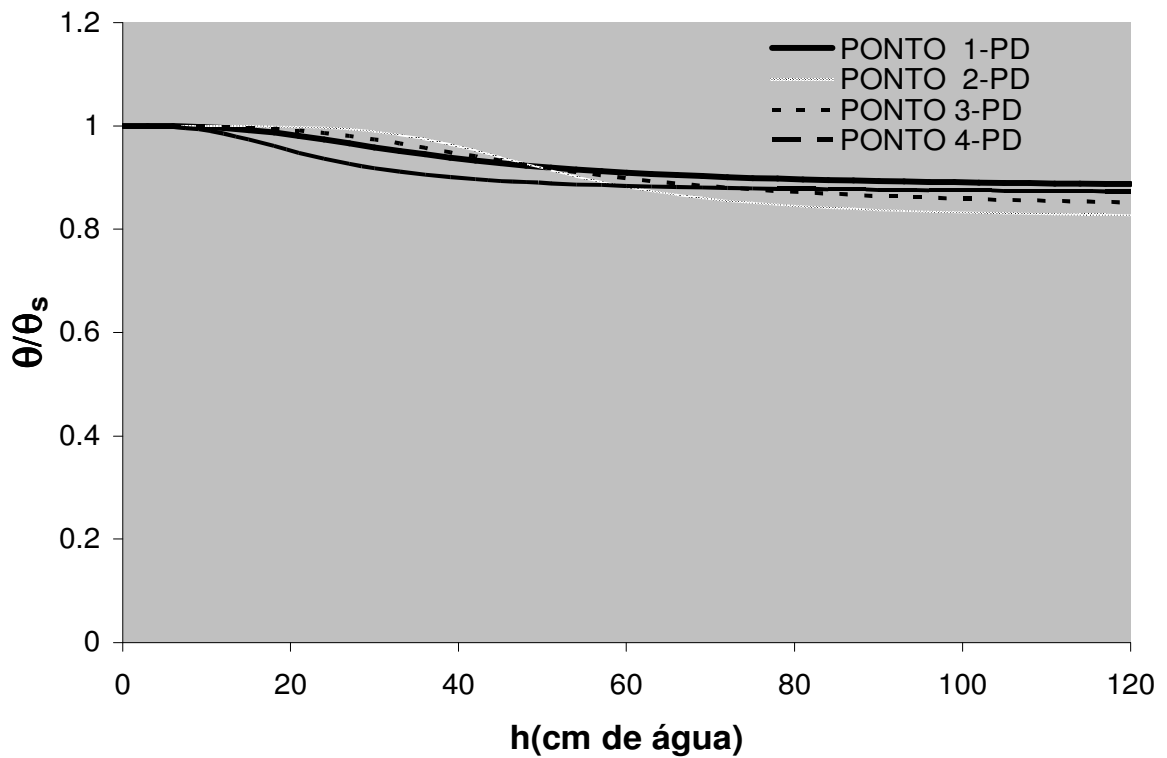


Figura 4.11: Curva de retenção normalizada para os agregados do plantio direto.

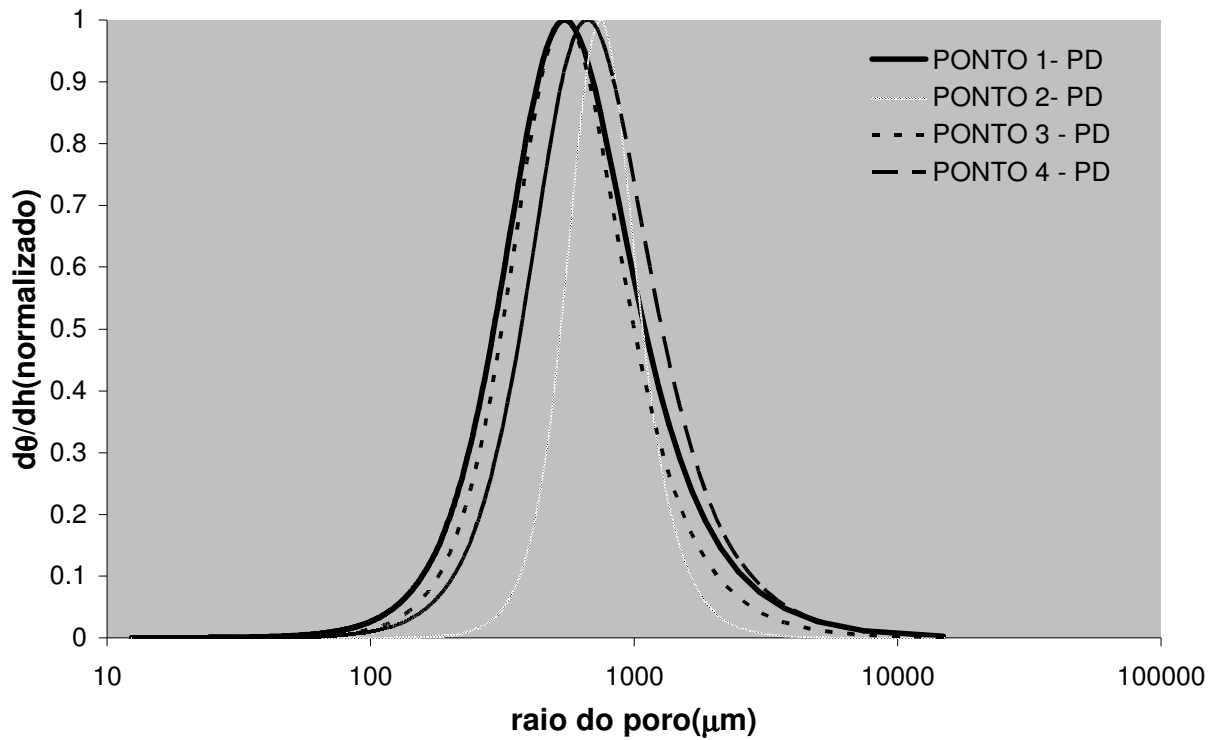


Figura 4.12: FCAs para agregados do plantio direto.

Com a finalidade de se fazer uma comparação entre as curvas de retenção e as FCAs dos dois tipos de tratamentos investigados, obteve-se um valor médio dos parâmetros da equação de van Genuchten, os quais foram obtidos nos diferentes pontos investigados. Os resultados obtidos pela consideração dos valores médios são apresentados nas figuras 4.13 e 4.14.

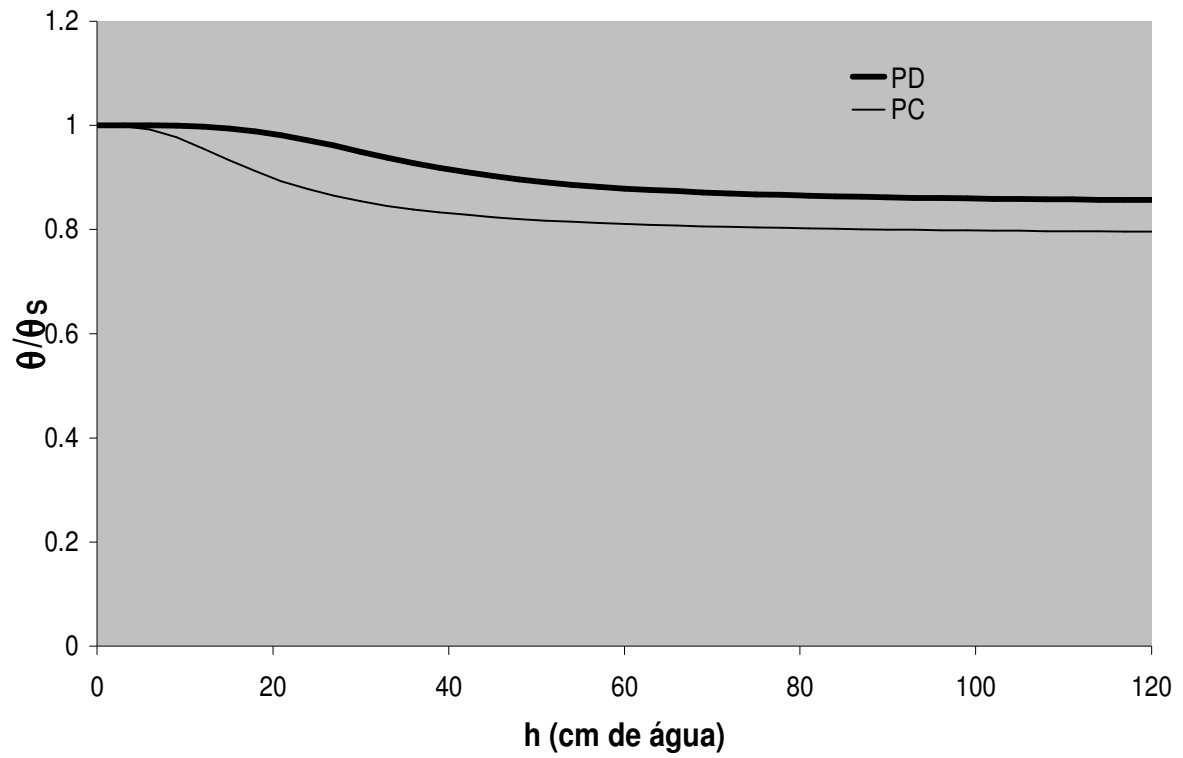


Figura 4.13: Curva de Retenção normalizada para os valores médios dos parâmetros da equação de van Genuchten

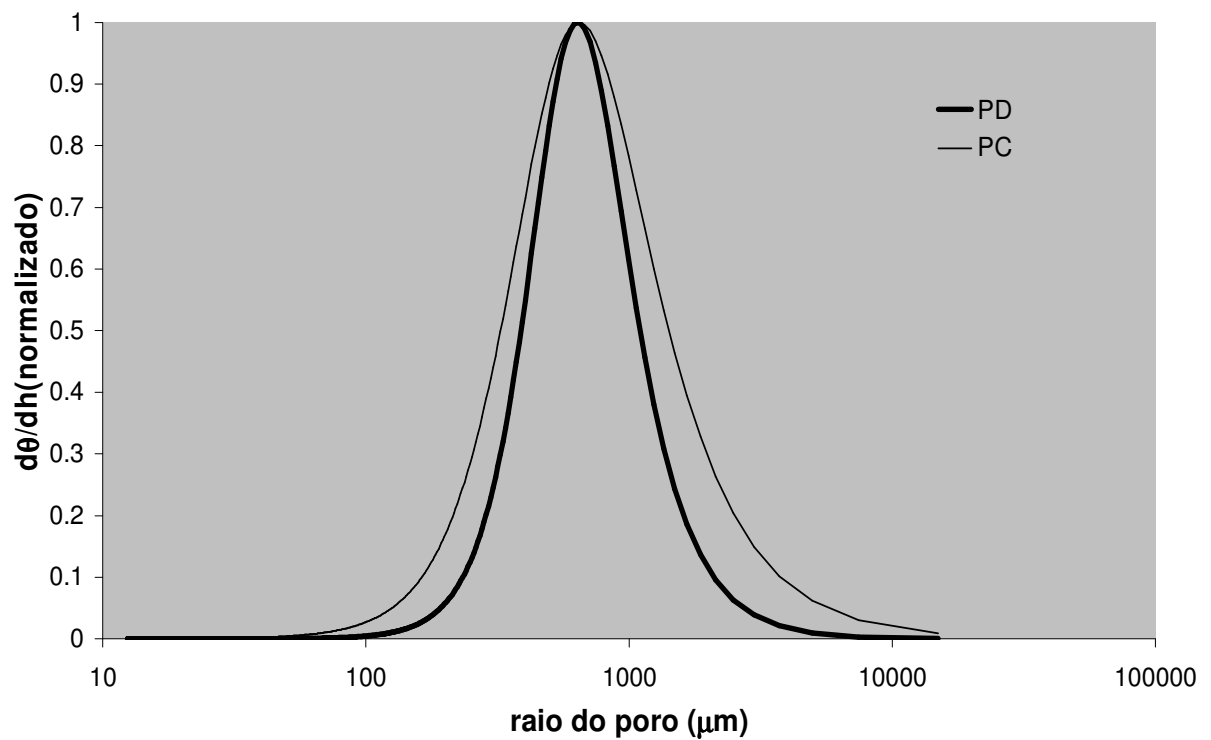


Figura 4.14: FCAs utilizando-se os valores médios para os dois plantios investigados.

Analisando as curvas de retenção médias (figura 4.13) percebe-se que o plantio direto apresentou maior capacidade de retenção de água quando comparado ao plantio convencional.

Este resultado é confirmado pelas curvas de distribuição de poros, as quais mostram que, em média, uma maior quantidade de poros de dimensões maiores no plantio convencional. A ocorrência de poros de pequenas dimensões no sistema de plantio direto, em geral, está relacionada à maior compactação produzida no solo deste tipo de plantio (ARAUJO et al., 2004; ASSIS & LANÇAS, 2005; PAGLIAI et al., 2004; SILVA & KAY, 1997; STONE et al., 2001).

A compactação provocada pelo uso agrícola, normalmente ocasiona uma drástica redução na macroporosidade do solo, podendo haver, em muitos casos, maior volume de microporos o que aumentaria a capacidade de armazenamento de água pelo solo sob este tipo de manejo (BERTOL & SANTOS, 1995; SILVA et al., 1986; SOLER DA SILVA et al., 2005).

Na figura 4.14, percebe-se uma “quase” coincidência do valor máximo da curva de distribuição de poros. No entanto, analisando-se mais detalhadamente a equação diferencial pode-se ver que existe uma pequena diferença nos valores encontrados.

A FCA para a restrição de Muallen ($m = 1 - \frac{1}{n}$) é dada por:

$$FCA = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r)(n-1)(-\psi)^{n-1}}{[1 + \alpha(-\psi)^n]^{2-\frac{1}{n}}}$$

Fazendo-se:

$$n-1 = N$$

$$2 - \frac{1}{n} = N'$$

$$\alpha(\theta_s - \theta_r) = M$$

A expressão da FCA fica dada por:

$$FCA = \frac{MN\psi^N}{(1 + \alpha\psi^{N+1})^{N'}}$$

A primeira derivada da FCA é apresentada a seguir:

$$\frac{dFCA}{d\psi} = MN \left[N\psi^{N-1}(1 + \alpha\psi^{N+1})^{-N} - N'\alpha(N+1)(1 + \alpha\psi^{N+1})^{-N'-1}\psi^{2N} \right]$$

Fazendo-se $dFCA/d\psi=0$ chega-se ao seguinte resultado:

$$\frac{(1 + \alpha\psi^{N+1})}{\psi^{N+1}} = \frac{N'\alpha(N+1)}{N}$$

Substituindo-se os valores de N e N', a expressão anterior torna-se:

$$\frac{(1 + \alpha\psi^n)}{\psi^n} = \alpha \left(\frac{2n - \alpha}{n - 1} \right)$$

Cuja solução fornece para o potencial h o seguinte valor:

$$h = \sqrt[n]{\frac{n-1}{\alpha n}}$$

Substituindo-se os valores médios de α e n das tabelas 5 e 6, os seguintes valores de h são obtidos:

$h = 2,3$ para o plantio convencional

$h = 2,3$ para o plantio direto

Que correspondem aos seguintes raios de poro:

$r_{pc} = 644,4 \mu m$

$r_{pd} = 637,9 \mu m$

Estes resultados mostram que o máximo da FCA é praticamente igual para os dois sistemas de plantio.

4.4 Parâmetros da Equação de van Genuchten

As tabelas 5 e 6 mostram os parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) usados para traçar as curvas de retenção:

Tabela 5: Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten para análise das curvas de retenção do plantio convencional

Ponto	er	es	α	n	m
1	0.55	0.80	0.15	2.0	0.48
2	0.49	0.61	0.03	2.7	0.63
3	0.43	0.49	0.04	3.0	0.65
4	0.45	0.56	0.03	3.3	0.69
MÉDIA	0.48	0.60	0.06	2.8	0.61
DES PA	0.06	0.10	0.06	0.6	0.09
CV (%)	11.6	20.4	94.0	20.0	15.3

Tabela 6: Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten para análise das curvas de retenção do plantio direto

Ponto	er	es	α	n	m
1	0.56	0.63	0.03	3.0	0.66
2	0.54	0.66	0.02	5.3	0.73
3	0.59	0.71	0.02	3.4	0.70
4	0.55	0.63	0.05	3.2	0.61
MÉDIA	0.60	0.70	0.03	3.7	0.67
DES PA	0.02	0.03	0.01	0.9	0.04
CV (%)	3.61	4.76	37.7	24.1	6.60

Tabela 7: Parâmetros médios da equação de van Genuchten para o sistema de plantio convencional e direto

	er	es	α	n	m
PC	0.48 ± 0.06	0.6 ± 0.1	0.06 ± 0.06	2.8 ± 0.6	0.61 ± 0.09
PD	0.56 ± 0.02	0.65 ± 0.03	0.03 ± 0.01	3.7 ± 0.9	0.67 ± 0.04

Exceto pelo parâmetro α , verifica-se que em média o plantio convencional foi o que apresentou os menores valores dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980). Verifica-se também que dentre todos, o parâmetro α é o que apresentou o maior coeficiente de variação.

Mello et al. (2005) encontraram também um alto coeficiente de variação para o parâmetro α , 49,6%, para solo sob plantio convencional, o qual, segundo estes autores, pode estar relacionado ao alto conteúdo de matéria orgânica encontrado no solo por eles investigado.

Os gráficos a seguir mostram a correlação entre os parâmetros da equação de van Genuchten e algumas das propriedades físicas analisados neste estudo. A fim de visualizar melhor esta correlação foram utilizados todos os valores medidos em campo e com os agregados em ambos os plantios.

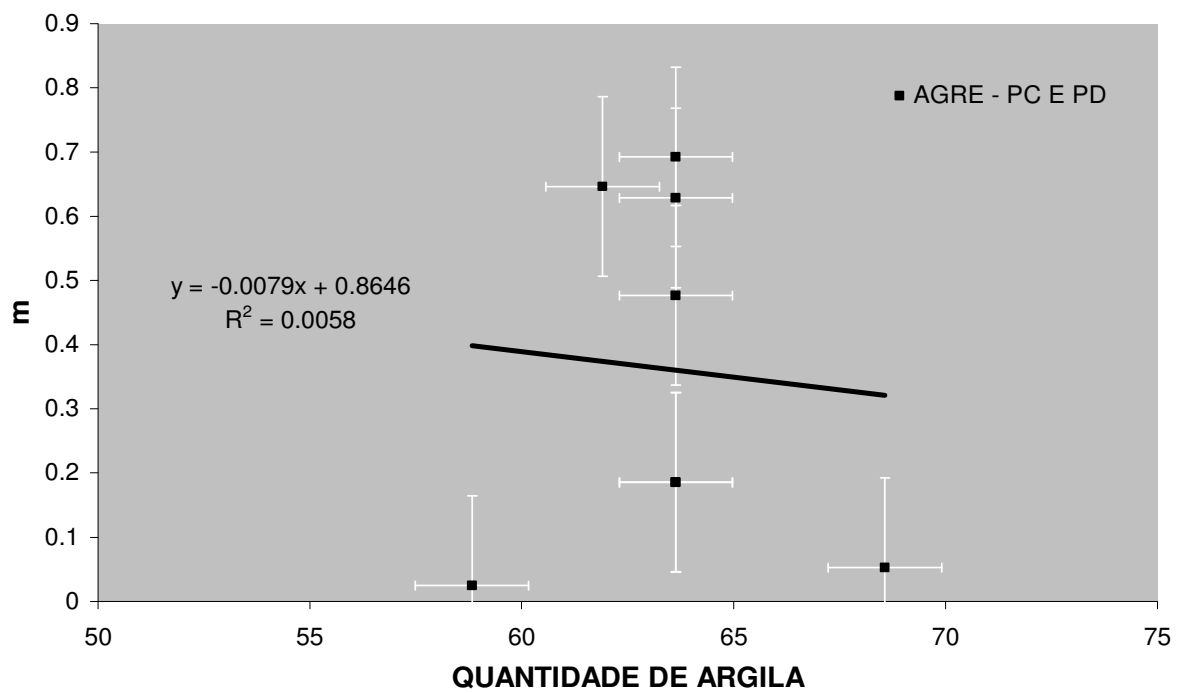
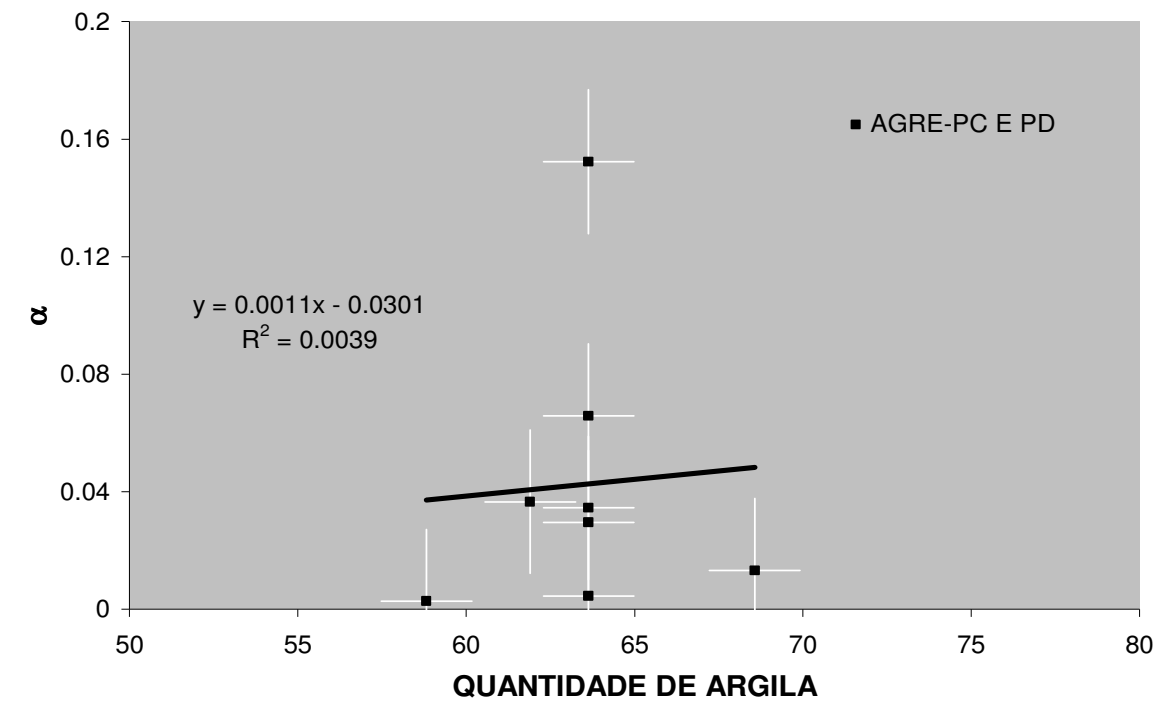


Figura 4.15: Parâmetros da equação de van Genuchten em função da quantidade de argila.

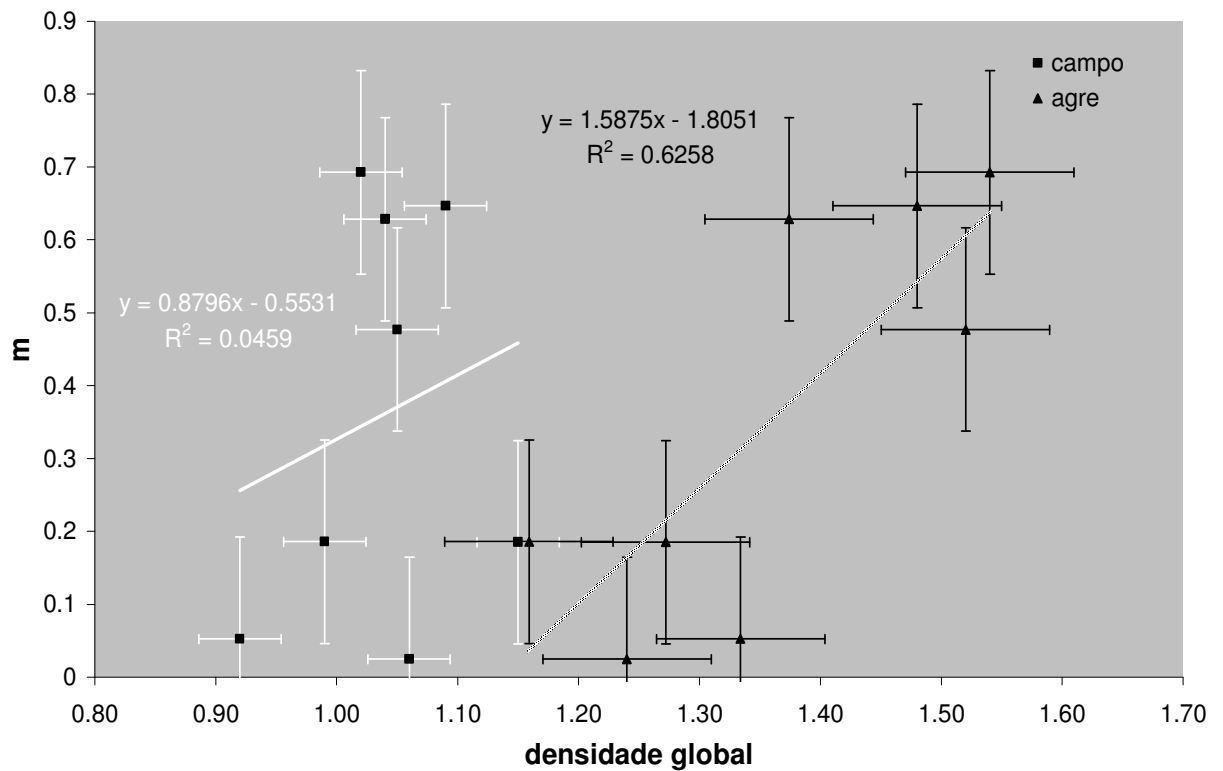
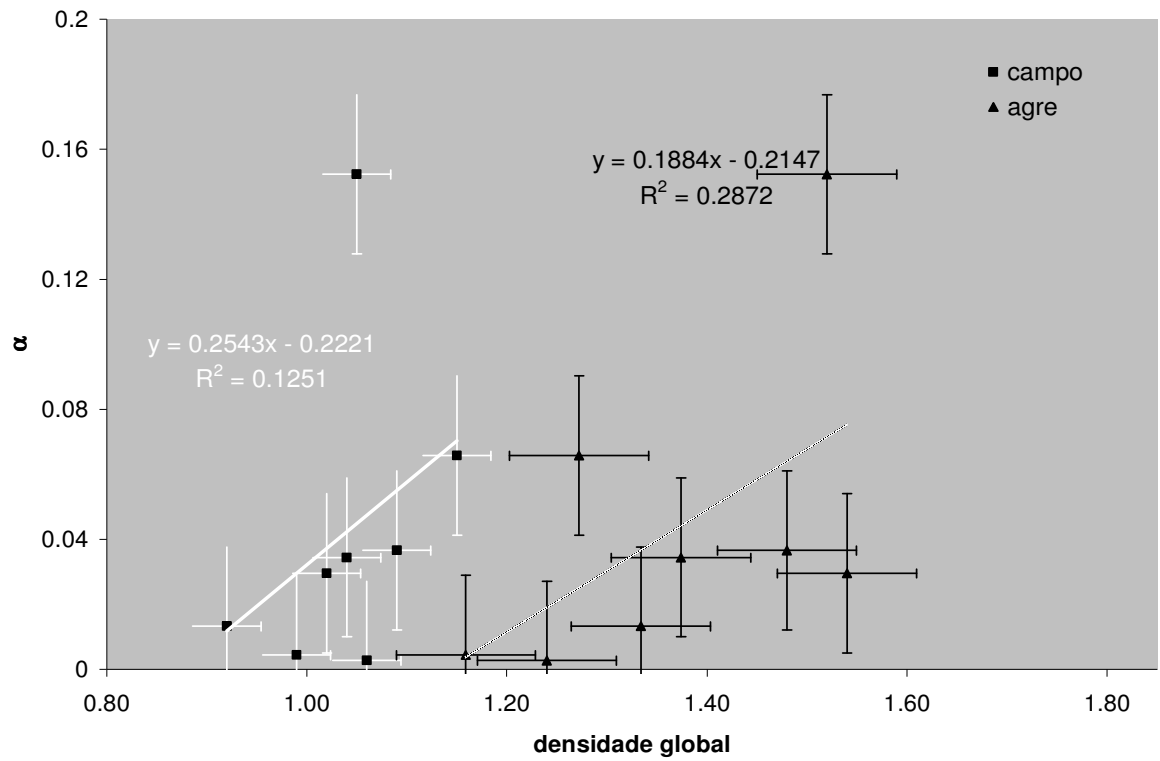


Figura 4.16: Parâmetros da equação de van Genuchten em função da densidade global.

O parâmetro α está basicamente relacionado com o inverso do valor da sucção “h”, correspondente à média da umidade entre θ_s e θ_r .

A figura 4.15 mostra uma pequena tendência de aumento do parâmetro α com o aumento da quantidade de argila no solo. Minasny et al. (2004) encontraram a mesma tendência. Contrariando esses resultados, Vieira et al. (1992) encontraram que o parâmetro α aumenta com o aumento da quantidade de partículas grossas presentes no solo. Estes autores ressaltam também que esse parâmetro apresenta um alto coeficiente de variação e é muito pouco influenciado pela estrutura do solo.

Ainda em relação ao parâmetro α , percebe-se, pela figura 4.16, uma tendência de aumento deste parâmetro com a densidade do solo. A mesma tendência é observada para o parâmetro m .

A figura 4.15 mostra um ligeiro decréscimo do parâmetro m com o aumento da quantidade de argila presente no solo.

As tabelas 1 e 3 mostram que não houve diferenças consideráveis na quantidade de argila entre os dois sistemas de manejo ($63 \pm 5\%$, para o plantio convencional e $62 \pm 3\%$, para o plantio direto). Segundo Souza et al. (2004), argila e areia dos latossolos são atributos estáveis, ou seja, modificam-se pouco ao longo do tempo, seja por ação do intemperismo ou do manejo do solo. Segundo Guimarães (2000), é de se esperar que essas frações granulométricas apresentem valores médios estatisticamente iguais para os sistemas PD e PC. Ele afirma que as frações granulométricas são pouco dependentes do uso e manejo a que o solo é submetido. Que são atributos fixos provenientes da formação natural do solo e que, portanto, seriam modificadas em uma longa escala de tempo.

4.5 Influência da Densidade Global nas Curvas de Retenção e FCAs

Para que se fosse feita uma análise da influência da densidade do solo nas curvas de retenção e nas FCAs, dentre todos os agregados investigados nos dois plantios, foram separados os que apresentaram as maiores e menores densidades.

No plantio convencional, foram separados os agregados dos pontos 31 e 11, respectivamente, os que apresentaram a maior e a menor densidade e no plantio direto foram separados os agregados dos pontos 1 e 7.

Os gráficos a seguir mostram as curvas de retenção e as FCAs para esses agregados nos dois sistemas de plantio investigados.

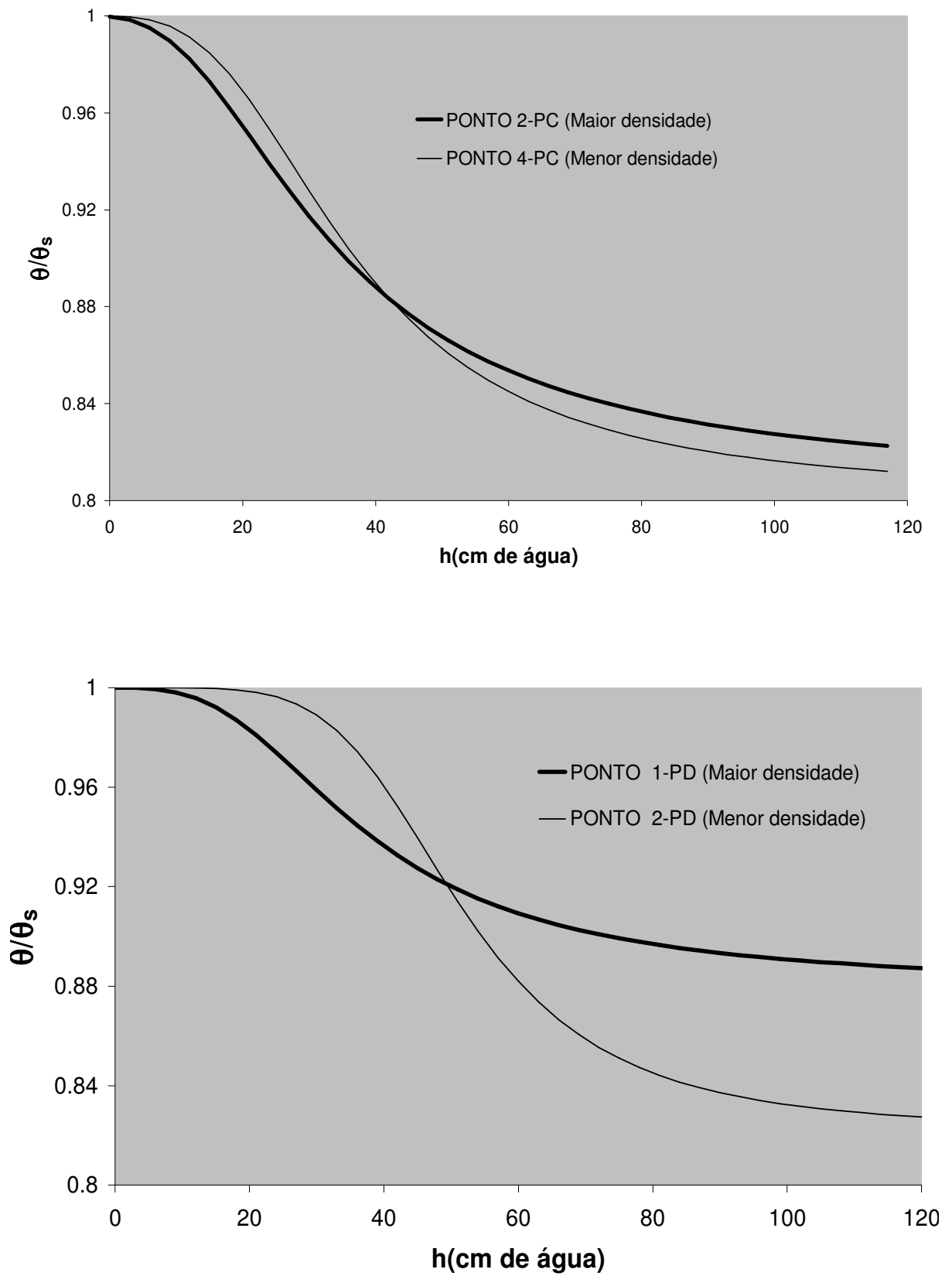


Figura 4.17: Curvas de retenção para agregados do solo, com maior e menor densidade dentre os investigados, tanto no plantio convencional quanto no direto.

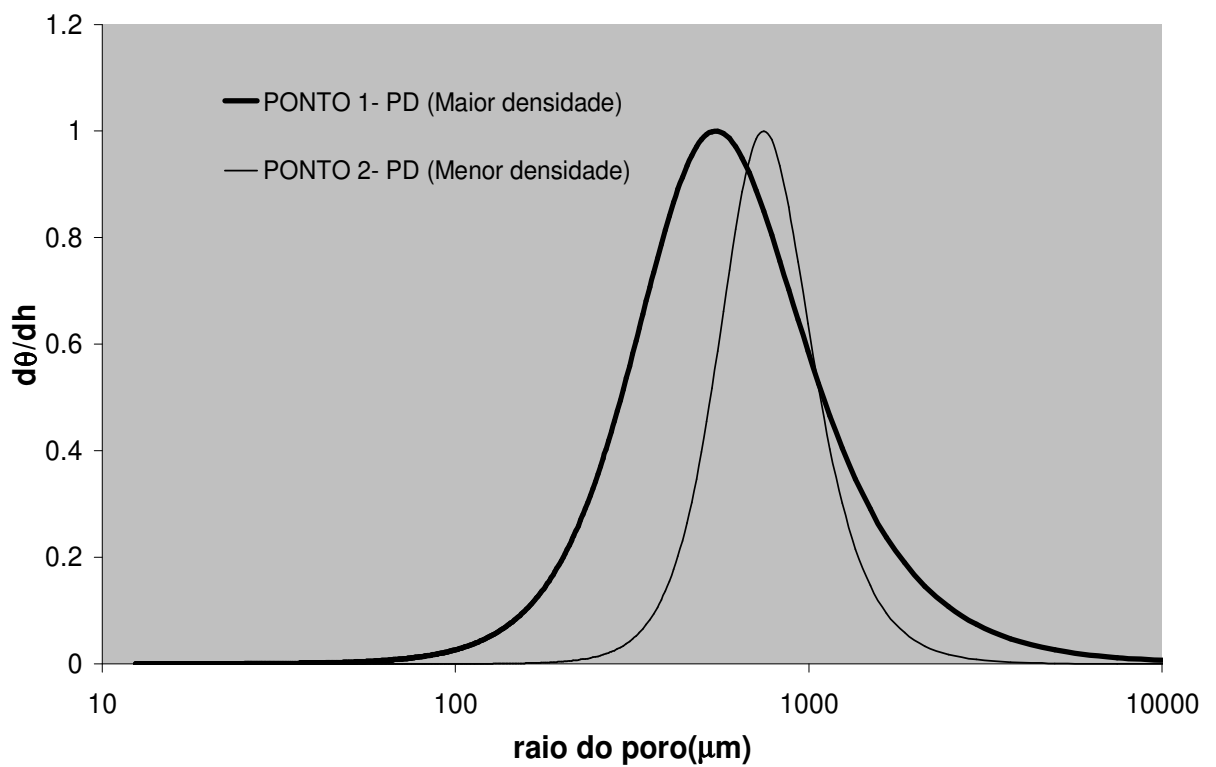
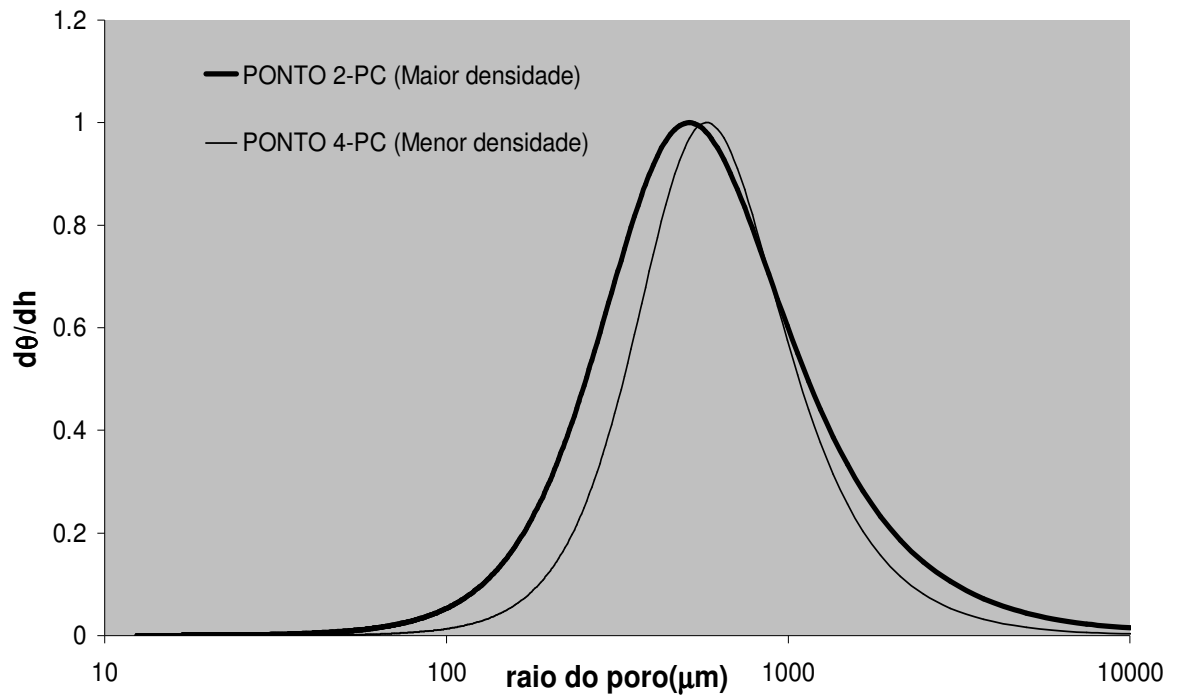


Figura 4.18: FCAs para agregados de solo do plantio convencional e direto.

A figura 4.17 mostra que é mais fácil retirar água do interior dos agregados de menor densidade. Isto pode ser facilmente visualizado pela diminuição de θ_r nas curvas de retenção desses agregados, nos dois plantios investigados.

Por inspeção das figuras, não é difícil ver também que o h correspondente ao valor médio ($h_{médio}$) entre θ_r e θ_r , o qual é utilizado para se determinar α ($\alpha = 1/h_{médio}$), é mais alto para os agregados de maiores densidades. Então, $h_{médio}$ é maior para agregados de menor densidade, portanto, α para estes agregados é menor. Ou seja, o parâmetro α e a densidade do solo são diretamente relacionados. Isso implica que um aumento na densidade do solo produz um aumento de α e vice-versa. Esta foi exatamente a tendência observada para este parâmetro em relação à densidade do solo.

Este fato é corroborado pelas FCAs dos agregados com maior e menor densidade (figura 4.18). Verifica-se que em média as FCAs dos agregados de maior densidade estão deslocadas para regiões de raios de poros menores.

4.6 Resumo dos Resultados

Em síntese o equipamento utilizado, proposto por Leeds-Harrison & Yongs (1997), foi capaz de verificar diferenças entre os valores da K_{sat} para os agregados dos dois sistemas de manejo investigados. Os valores desta propriedade em condições de campo superaram em aproximadamente uma ordem de grandeza os valores obtidos nos agregados, como mostra a tabela abaixo:

Tabela 8: Valores médios para as propriedades analisadas nos dois sistemas de plantio.

	CAMPO		AGREGADOS	
	PC	PD	PC	PD
$K_{sat}(cm/s)$	0.0034±0.00141	0.00204±0.0008	0.000474±0.0003	0.00017±0.000053
$d(g/cm^3)$	1.05±0.03	1.03±0.09	1.39±0.13	1.25±0.06
Por. Total	0.60±0.01	0.61±0.03	0.62±0.11	0.66±0.03
Micro	0.40±0.01	0.49±0.02	0.51±0.6	0.60±0.02
Macro	0.20±0.02	0.12±0.05	0.11±0.06	0.06±0.01

As medidas em campo em ambos os plantios (PC e PD) apresentaram em média um valor maior para a macroporosidade e menor densidade global quando comparados aos valores destas propriedades para os agregados destes mesmos solos.

Mesmo ao nível de agregados de solos, a condutividade hidráulica saturada apresenta uma grande variabilidade, conclusão que pode se tirada observando-se o alto coeficiente de variação obtido para esta propriedade.

CONCLUSÕES

A contribuição da metodologia apresentada neste trabalho, proposta por Leeds-Harrisson & Youngs (1997), visa uma análise quantitativa da condutividade hidráulica do solo e de como esta propriedade é modificada pelo tipo de manejo empregado no solo. Os dados obtidos em laboratório, associados aos de campo proporcionam uma melhor compreensão dos processos de condução e retenção da água no solo.

O plantio convencional apresentou em média maior valor da condutividade hidráulica saturada comparada com o plantio direto, tanto em condições de campo como na forma de agregados. Esse tipo de manejo pode propiciar a formação de poros com diâmetros maiores, os quais, em princípio, permitem maiores valores de K_{sat} . No entanto, devido à desestruturação imposta às amostras de solo, nada se pode afirmar a respeito da continuidade desses tipos de poros.

Já as curvas de retenção e de distribuição de poros mostraram que o plantio direto apresenta uma capacidade de retenção maior, comparada com o plantio convencional, provavelmente devido ao maior número de microporos encontrado neste tipo de plantio. O número grande de poros pequenos, no plantio direto, pode também ter determinado seu menor valor de condutividade hidráulica saturada.

A macroporosidade e a densidade global foram as propriedades que mostraram maior correlação com K_{sat} enquanto a microporosidade está mais relacionada a retenção de água no solo.

PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Aperfeiçoar o equipamento proposto por Leeds-Harrison & Youngs (1997) a fim de suportar pressões acima de 2cm de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R.; REINERT, J. D.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigos em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, mar./apr. 2003.

AIMRUN, W.; AMIN, M. S. M.; ELTAIB, S. M. Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. **Geoderma** 121: 197-203, 2004.

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19: 115-119, 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**, 25: 717-723, 2001.

ALLISON, F. E. Soil organic matter and its role in crop production. Amsterdam, **Elsevier**, p.215-345, 1973.

SANTOS, R. A. **Propriedades de retenção de água por espaços porosos não homogêneos: Experimentos de laboratório e simulação computacional**. 2005. 117p. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.

ARAUJO, 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**, 28: 337-345, 2004.

ARINGHERI, R. Saturated flow proprieties of diferent soil-sand systems as related to their particle and micropore-size distributions: A comparative study. **Soil Science**, 171: 448-455, jun. 2006.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho Distrófico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 29: 515-522, jul./ago. 2005.

BASSO, C. J. & REINERT, D. J. Variação da agregação induzida por plantas de cobertura de solo no inverno e plantio direto de milho em um solo Podzólico. **Ciência Rural**, 28:567-571, 1998.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN, W. A. 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, jan./fev. 2004.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J. M.; REIS, E. F. & DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, 30: 91-95, 2000.

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

BESCANSA, P.; IMAZ, M. J.; VIRTO, I.; ENRIQUE, A.; HOOGMOED, W. B. Soil Water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. **Soil & Tillage Research**, 87: 19-27, 2006.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**, Botucatu, v. 8, n. 3, 242-249, set./dez. 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; ANDRIOLI, I. Efeito da compactação do solo na estabilidade de agregados e no conteúdo gravimétrico de água. **Acta Sci. Agro.**, v.27, n.2, p. 193-198, abr/jun. 2005.

BHATTACHARYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; GUPTA, H. S. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. **Soil & Tillage Research**, 86: 129-140, 2006.

BODHINAYAKE, W.; BING, C. S.; XIAO, C. New method for determining water-conducting macro and mesoporosity from tension infiltrometer. **Soil Science Society of America**, 68: 760-769, 2004.

BORGES, E.; ANTONINO, A. C. D.; DALL'OLIO, A.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C. J. G. Determinação da condutividade hidráulica e da sortividade de um solo não-saturado utilizando-se permeâmetro a disco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 11, nov. 1999.

BRADY, N. C. **Natureza e Propriedades dos Solos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. 647p.

BUCKINGHAM, E. Studies of Movement of Soil Moisture. United States Department Agricultural Bureal, **Soil Bulletin**, 38, 1907.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. Efeitos da Compactação em Atributos do Solo. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C4/Comp4.htm>. Acesso em: 14/08/ 2006.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R. & CASSOL, L. C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:386-391, 1999.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J. & PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19: 121-126, 1995.

CARPENEDO, V. & MIELNICZUK, J. Estado de agregação e quantidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 14: 99-105, 1990.

CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. S.; COSTA, L. M. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 257-265, fev. 1999.

CARVALHO, J. M.; LIMA, L. A. Influência da adição de hidróxido de sódio na retenção de água de um Latossolo Vermelho-Escuro. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 24, n. 2, p. 450-457, abr./jun. 2000.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 527-538, jul./set. 1998.

CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23: 997-1003, 1999.

COOPER, M.; TORRADO, P. V. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizontes B nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, jul./ago. 2005.

CORRÊA, J. C. Características físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso (Typic Acrorthox) do estado do Amazonas, sob diferentes métodos de preparo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 12, p. 1381-1387, dez. 1985.

CORSINI, P. C. Modificações de características físico-hídricas em perfis de série Jaboticabaal e Santa Teraza, ocasionadas pelo cultivo intensivo. **Científico**, Jaboticabal, v. 2, n. 2, p. 49-61, 1974.

COSTA, F. S. **Propriedades físicas e produtividade de culturas de um Latossolo Bruno sob sistemas de manejo do solo em experimentos de longa duração**. 2001. 98p. (Tese de Mestrado). Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27: 527-535, 2003.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Aumento de matéria orgânica num Latossolo Bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, mar./abr. 2004.

COUTADEUR, C.; COQUET, Y.; ROGER-ESTRADE, J. Variation of hydraulic conductivity in a tilled soil. **European Journal of Soil Science**, 53: 619-628, dez. 2002.

CUNHA, T. J. F.; MACEDO, J. R.; RIBEIRO, L. P.; PALMIER, F.; FREITAS, P. L.; AGUIAR, A. C. Impacto do manejo convencional sobre propriedades físicas e substâncias húmicas de solos sob cerrado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 27-36, 2001.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A.; GATE, O. P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. **Soil & Tillage Research**, 79: 185-189, 2004.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas "in situ". **Ciências Agrotécnica**, Lavras. Edição especial, p. 1607-1613, dez. 2003.

EMPRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1979. não paginado.

FERNANDES, M. A. **Alterações na estrutura de Latossolos Argilosos submetidos ao uso agrícola**. 1993. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

FERREIRA, F. P.; SILVA, V. R.; SECCO, D.; REICHERT, J. M.; REINERT, J. D. Condutividade hidráulica saturada, infiltração de água e compactação do solo no sistema plantio direto.

GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 223-227, fev. 2002.

GREEN, T. R.; AHUJA, L. R.; BENJAMIN, J. G. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. **Geoderma**, 116: 3 -27, 2003.

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. 89p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GUPTA, S.; SHARMA, P. P.; DEFRANCHI, S. A. Compaction effects on soil structure. **Adv. Agron.**, 42: 311-338, 1989.

HOLANDA, F. S. R.; PEDROTTI, A.; AGUIAR, J. F.; SANTOS, V. P. Sistema de manejo de água e solo com tecnologia de prevenção da salinização e reabilitação de solos salinados, no Perímetro Hidroagrícola do Califórnia-Semi-Árido Sergipano. **Anais do Seminário de Pesquisa FAP-SE**, 2003.

HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water retention parameter for temperate and tropical soil: a new water retention pedo transfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, 108: 155-180, 2002.

JARVIS, N. J.; ZAVATTARO, L.; RAJKAI, K.; REYNOLDS, W. D.; OLSEN, P. A.; MCGECHAN, M.; MECKE, M.; MOHANTY, B.; LEEDES-HARRISON, P. B.; JACQUES, D. Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. **Geoderma**, 108: 1-17, 2002.

JURY, A. W.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. 5 ed. New York, John Wiley & Sons, 1991. 328p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26: 857-867, 2002.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade Hidráulica de um Latossolo Roxo, Não saturado, sob diferentes Sistemas de uso e Manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Santa Maria, v. 32, n. 6, nov./dez. 2002.

KÖHNE, J. M.; KÖHNE, S.; GERKE, H. H. Estimating the Hydraulic Function of Dual permeability models from Bulk Soil Data. **Water Resources Research** 38 (7): 26, 2002.

LAURANI, R. A.; RALISCH R.; TAVATERES FILHO, J.; SOARES, D. S.; RIBON, A. A. Distribuição de poros de um Latossolo Vermelho Eutrófico na fase de implementação de um sistema de plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, mai./ago. 2004.

LEEDS-HARRISON, P. B.; YOUNGS, E. G. Estimating the hydraulic conductivity of aggregates conditioned by different tillage treatments from sorption measurements. **Soil & Tillage Research**, 41: 141-47, 1997.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Adv. Soil Sci.**, 1:277-294,1985.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005, 335 p.

LUCARELLI, J. R. F. **Alterações em características de um latossolo roxo submetido a diferentes sistemas de manejo**. 1997. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas,

MARQUES, J. D. O.; LIBARDI, P. L.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M. Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um Latossolo Amarelo, na região Amazônica. **Acta Amazônica**, 34(2): 145-154, 2004.

MBAGWU, J. S. C. Saturated hydraulic conductivity in relation to physical properties of soils in the Nsukka Plains, southeastern Nigeria. **Geoderma**, 68: 51-65, 1995.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M.; LOPES, D. Modelos para a determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten para um Cambissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 23-29, 2005.

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, 2004.

MESQUITA, G. B. F.; MORAES, S. O.; CORRENTE, J. E. More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity. **Scientia Agrícola**, v. 59, n 4, p. 789-793, out./dez. 2002.

MINASNY, B.; HOPMANS, J. W.; HARTER, T.; ECHING, S. O.; TULI, A.; DENTON, M. A. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soil using multistep outflow data. **Soil Science Society of America**, 68: 417-429, 2004.

NAIME, J. M. **Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, na infiltração da água na região não saturada do solo**. 2001. 146p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

NAKANO, K.; MIYAZAKI, T. Predicting the saturated hydraulic conductivity of compacted subsoils using the non – similar media concept. **Soil & Tillage Research**, 84: 145-153, 2005.

NDIAYE, B.; MOLÉNAT, J.; HALLAIRE, V.; GASCUEL, C.; HAMON, Y. Effects of agricultural practices on hydraulic properties and water movement in soil in Brittany (France). **Soil & Tillage Research**, 93: 251-263, 2007.

NDIAYE, B.; ESTEVES, M.; VANDERVAERE, J. P.; LAPETITE, J. M.; VAUCLIN, M. Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties and runoff generation for a sandy loam soil. **Soil & Tillage Research**, 307: 294-311, 2005.

NOLLA, D. **Erosão do solo o grande desafio**. Porto Alegre: Secretaria de Agricultura, Divisão de divulgação e informação rural, 1982. 412p.

OSUNBITAN, J. A.; OYEDELE, D. J.; ADEKALU, K. O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. **Soil & Tillage Research**, 82: 57 – 64, 2005.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Soil structure and pedotransfer functions. **European Journal of Soil Science**, 54: 443-451, set. 2003.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 2, p. 131-143, dez. 2004.

PEREIRA, F. A. C.; FONSECA, A. A. O.; ALMEIDA, E. C.; MOREIRA, C. S.; MACEDO, D. J. B.; CRUZ, J. D. Comparação entre condutividade hidráulica saturada determinada em campo e laboratório. **Magistra**, Cruz das Almas - BA, v. 13, n. 1, jan./jun. 2001.

PORTELA, J.C.; LIBARDI, P. L.; VAN LIER, Q. J. Retenção da água em solo sob diferentes usos no ecossistema tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 49-54, 2001.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A. Soil consistence and structure as predictors of water retention. **Soil Science Society of America**, 66: 1115-1126, jul./ago. 2002.

REICHARDT, K. **Dinâmica da Matéria e da Energia em Ecossistemas**. 2. ed. São Paulo: USP / ESALQ, 505p,1996.

REICHARDT, K. **Solo em águas agrícolas**. São Paulo: Santuário, 1993.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos Processos e Aplicações**. São Paulo: MANOLE, 478p, 2004.

RICHARD, G. *et al.* Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 52, p. 49-58, 2001.

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. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

SHIPILATO, M. J.; DICK, W. A.; EDWARDS, W. M. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. Amsterdam, **Soil & Tillage Research**, v. 53, p. 167-83, 2000.

SILLON, J. F.; RICHARD, G.; COUSIN, I. Tillage and traffic effects on soil hydraulic properties and evaporation. **Geoderma**, 116: 29-46, 2003.

SILVA, A. L.; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; BACCHI, O. O. S.; TIMM, L. C.; OLIVEIRA, J. C. M.; DOURADO-NETO, D. On the use of soil hydraulic conductivity functions in the field. **Soil and Tillage Research**, 93: 162-170, 2004.

SILVA, A.P. *et al.* Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, p.91-95, 1986.

SILVA, A. P. & KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883, 1997.

SILVA, E. B.; LIBARDI, P. L. Propriedades hidráulicas de um solo não saturado utilizando-se o permeâmetro a disco. **Scientia Agrícola**, v. 57, n. 3, jul./set. 2000.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLACANEUX, P. Sistemas de Manejo e Qualidade Estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, dez. 2000.

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*, 20:113-117, 1997.

SOARES, J. L. N.; ESPINHOLA, C. R.; CASTRO, S.S. Alteração física e morfológica em solos cultivados sob sistema tradicional de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, nov./dez. 2005.

SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina, v. 7, n. 2, mai./ago. 2003.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms**. Madison: SSSA, 1997.

SOLER DA SILVA, M. A.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. 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. 544-552, mai./jun. 2005.

STONE, F. L.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura de feijoeiro I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.

TAMARI, S. Relations between pore-space and hydraulic properties in compacted beds o silty-loam aggregates. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 7, p. 57-73, 1994.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n. 6, nov./dez. 2004.

VAN DER BERG, M.; KLAMT, E.; VAN REEUWIJK, L. P.; SOMBROEK, W. G. Pedotranfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, 78: 161-180, 1997.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A Closed – Form Equation for Predicting the Hidraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, 44:892 – 898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. Th.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils**. U. S. Salinity Laboratory, Riverside – California, 1991. 85p.

VENTRELLA, D.; LOSAVIO, N.; VONELLA, A. V.; LEIJ, F. J. Estimating hydraulic conductivity of a fine-textured soil using tension infiltrometry. **Geoderma**, 124: 267-277, 2005.

VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, 2004.

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.; CASTRO, O. M.; TOPP, G. C. Spatial variability of some soil physical properties in three soils of São Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 27 (2): 333 – 341, 1992.

WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 5, 2004.