**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Evolução de crostas superficiais sob chuva natural em diferentes solos da
região de Piracicaba, SP**

Selene Cristina de Pierri Castilho

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

**Piracicaba
2010**

Selene Cristina de Pierri Castilho
Bacharel em Gestão Ambiental

Evolução de crostas superficiais sob chuva natural em diferentes **solos da região de Piracicaba, SP**

Orientador:
Prof. Dr. **MIGUEL COOPER**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

**Piracicaba
2010**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Castilho, Selene Cristina de Pierri

Evolução de crostas superficiais sob chuva natural em diferentes solos da região de Piracicaba, SP / Selene Cristina de Pierri Castilho. - - Piracicaba, 2010.
72 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.
Bibliografia.

1. Chuva 2. Degradação do solo 3. Erosão 4. Escoamento superficial 5. Micromorfologia d
solo 6. Preparo do solo I. Título

CDD 631.45
C352e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais, Ivan e Isis por todo
amor, carinho e incentivo.

A minha irmã Aline pelo amor,
amizade e incentivo sempre.

OFEREÇO E DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Miguel Cooper pela confiança, cooperação, paciência, amizade e orientação.

Aos membros do Conselho de Pós-Graduação do Programa de Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade oferecida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida até o término da dissertação.

Ao Prof. Paulo Leonel Libardi pelo uso do laboratório de física, e aos seus orientados que prestaram auxílio na utilização dos equipamentos.

Aos Prof. Vicente José Maria Savino, Prof. Antônio Augusto Domingos Coelho e Prof. Durval Dourado Neto pelas áreas concedidas para o experimento, assim como a todos os funcionários.

Aos alunos de graduação Beltrão, Batatiña, Sã, Picles e Ariane por todo o apoio e colaboração nas atividades de campo e laboratório.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, Dorival e Jair pelo auxílio na execução do projeto em campo. Aos técnicos Luiz Silva, Anderson, e José Luiz pela assistência às análises realizadas.

Aos colegas da pós-graduação em especial ao Carlos, Raul, Renata, Tatiana, Jaqueline e João pelo incentivo.

A todos meus amigos os quais os nomes não estão aqui, mas que sempre estiveram comigo me ajudando direta ou indiretamente me dando força e coragem para continuar e desenvolver este trabalho.

E a minha família que por muitas vezes entenderam minha ausência em momentos importantes e me apoiaram em mais essa etapa de minha vida.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 DESENVOLVIMENTO.....	15
2.1 Revisão Bibliográfica	15
2.1.1 Erosão	15
2.1.2 Efeito do Preparo do Solo.....	17
2.1.3 Condições de Superfície do Solo.....	17
2.1.4 Escoamento superficial.....	18
2.1.5 Encrostamento superficial	19
2.1.6 Micromorfologia no estudo do encrostamento.....	20
2.2 Material e Métodos	20
2.2.1 Descrição do Local de Estudo	20
2.2.2 Variação Sazonal da Chuva.....	22
2.2.3 Realização dos Experimentos.....	23
2.2.4 Análises Físicas do Solo	24
2.2.4.1 Análise Granulométrica.....	24
2.2.4.2 Determinação da Rugosidade Superficial.....	25
2.2.4.3 Micromorfologia e Análise de Imagens	26
2.2.5 Análises Químicas do Solo.....	28
2.2.5.1 Determinação do pH em CaCl_2 0,01mol L ⁻¹	28
2.2.5.2 Determinação do pH em água e pH em KCl 1N	28
2.2.5.3 Determinação da Acidez Potencial.....	28
2.2.5.4 Determinação de Alumínio Trocável	29
2.2.5.5 Determinação da Matéria Orgânica.....	29
2.2.5.6 Determinação do Potássio – Mehlich 1	29
2.2.5.7 Extração de Cálcio, Magnésio e Fósforo.....	29
2.2.5.8 Determinação do Cálcio e Magnésio.....	30
2.2.5.9 Determinação do Fósforo	30

2.2.5.10 Determinação do Enxofre	31
2.2.5.11 Determinação de Fe, Mn, Cu e Zn	31
2.2.6 Análises Físico-hídricas	31
2.2.6.1 Curvas de Retenção de Água no Solo	31
2.2.6.2 Condutividade Hidráulica	32
2.2.7 Estatística	33
2.2.8 Construção dos Variogramas	34
2.3 Resultados e Discussão	34
2.3.1 Análise Granulométrica	34
2.3.2 Análises Químicas.....	35
2.3.3 Rugosidade Superficial	36
2.3.4 Análise Geoestatística da Rugosidade	41
2.3.5 Micromorfologia e Análise de Imagens.....	43
2.3.6 Condutividade Hidráulica	51
2.3.7 Curva de retenção.....	54
2.4 Discussão Geral.....	56
3 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS.....	60
ANEXOS	69

RESUMO

Evolução de crostas superficiais sob chuva natural em diferentes solos da região de Piracicaba, SP

O encrostamento superficial é um dos fatores de favorecimento da erosão e degradação dos solos. O estudo e monitoramento das crostas superficiais são importantes para o manejo e conservação do solo e da água, principalmente em regiões de clima tropical, onde a degradação do solo é mais intensa e percebe-se um descuido em relação à proteção do ambiente. O presente projeto teve como objetivo o monitoramento da formação e evolução das crostas superficiais para solos de texturas contrastantes. Foram monitoradas as modificações ocorridas nos solos escolhidos para cada evento chuvoso acima de 25 mm/h durante os meses de dezembro de 2008 a maio de 2009. O projeto foi composto por três tipos de solo Argissolo Vermelho-Amarelo de textura média, Latossolo Vermelho-Amarelo e Nitossolo Vermelho eutroférico argiloso e ocorreram concomitantemente em diferentes áreas. O delineamento experimental escolhido foi blocos ao acaso. Para monitoramento da formação de crosta associada a ocorrência de eventos chuvosos foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para análises físicas e químicas de rotina, medidas da densidade do solo, confecção de curvas de retenção de água e para análises micromorfológicas e de imagens. Em campo foi realizado o monitoramento da infiltração de água e da rugosidade superficial do solo. A redução na rugosidade do solo pode ser observada já nas primeiras chuvas e ocorreu de maneira rápida para todos os tipos de solo. As crostas superficiais foram formadas para todos os solos, porém sem causar modificações significativas na porosidade total, na condutividade hidráulica e nas curvas de retenção de água. Sendo assim, as crostas observadas para os solos estudados são formadas pela reorganização estrutural e mobilização do material do solo sem, no entanto, interferir nas características hídricas dos solos.

Palavras-chave: Encrostamento superficial; Rugosidade do solo; Micromorfologia

ABSTRACT

Superficial crusting evolution in natural rainfall in different type of soil in Piracicaba, SP.

Soil crusting is one of the main negative effects of human beings on soil degradation. This process of physical origin diminishes soil water infiltration increasing runoff and consequently soil loss by water erosion and soil degradation. The study and monitoring of soil crusts is important for soil management and conservation, mainly in tropical regions in which research is scarce in this field of study. The purpose of this study was to monitor the formation and evolution of crusts in soils with contrasting particle size distributions. Soil crusts were monitored on a sandy/sandy loam Argissolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludult), sandy loam Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox) and a clayey Nitossolo Vermelho eutroférico (Rhodic Kandiudalf). Sampling and soil data were taken after 0, 3, 5 and 10 rain storms with intensities above 25 mm.h⁻¹ during the period from December 2008 to May 2009. Soil routine chemical and particle size distribution analysis were performed for soil characterization. To monitor the soil changes caused by the rainfall determination of the soil roughness, hydraulic conductivity, soil water characteristic curves and micromorphological analysis were performed. The reduction of soil roughness and the formation of soil crusts were observed for all the studied soils during the different rainfall events. The formation of the soil crusts did not significantly change the total porosity and pore morphology and distribution, and, consequently, the hydraulic conductivity and soil water retention of the surface layers of the studied soils.

Keywords: Superficial crusting; Soil roughness; Micromorphology

1 INTRODUÇÃO

A erosão é um processo natural que ocorre em todos os solos e é responsável pela fragmentação das rochas, formação do solo e modificação do relevo. Nos solos protegidos por vegetação os processos erosivos ocorrem de maneira lenta e controlada. Quando esta camada de proteção do solo é removida e o solo é exposto diretamente à ação dos agentes erosivos essas alterações do relevo passam a ser mais rápidas e drásticas.

Os principais agentes responsáveis pela erosão são a água, o vento e as alterações na temperatura (congelamento e descongelamento). No Brasil, assim como em outros países tropicais, os índices pluviométricos são elevados e as chuvas concentradas em determinadas épocas do ano, fazendo com que as chuvas sejam a causa mais recorrente de erosão e encrostamento das áreas com solo descoberto (Pagliai, 2003).

O aumento da população mundial tem como uma de suas principais consequências a necessidade de aumento da produção de alimentos e insumos para suprir as necessidades de consumo da população. Visando suprir essa necessidade a produção das áreas agrícolas precisa ser intensificada, através de uma maior eficiência das áreas produtivas ou através da ampliação das áreas, com expansão e criação de novas áreas para plantio, criação de animais e produção de insumos para a indústria.

A expansão das áreas agrícolas é foco de intensas discussões, principalmente quando envolvemos nesta expansão a criação de áreas produtivas sobre áreas antes florestadas. Quando as áreas de floresta são desmatadas e ocupadas por pastagens, ou cultivo de monoculturas, temos a redução da diversidade genética da área, redução da área de refúgio para a vida silvestre, prejuízos à macro, meso e microfauna da região, propensão ao aparecimento de novas pragas atraídas pela nova cultura, empobrecimento do fluxo energético e de ciclagem de nutrientes, além de fatores como modificação no regime hídrico, de ventos e maior exposição do solo aos agentes erosivos.

A mudança no uso do solo realizada pela expansão da fronteira agrícola e as recorrentes perturbações causadas pelas práticas produtivas adotadas são fatores de exposição e degradação do solo em suas propriedades físicas, químicas e biológicas. O preparo intensivo do solo pode prejudicar sua estrutura, porosidade e aeração, infiltração de água e a produtividade das culturas (Pagliai e Vignozzi, 2002). A exposição direta do solo ao impacto das gotas de chuva favorece o

aparecimento de crostas superficiais, sendo estas, um dos principais fatores de degradação do solo (Jones, 2002; Valentin e Bresson, 1997).

A formação das crostas pode ser prejudicial para a agricultura, pois causa alterações no solo prejudicando sua estrutura, a infiltração de água, modificando sua porosidade e rugosidade, aumentando o escoamento superficial e, consequentemente a erosão.

Essas mudanças estruturais sofridas pelo solo podem ser avaliadas e quantificadas através de medições de condutividade hidráulica, rugosidade superficial do solo e medições diretas do espaço poroso fornecendo dados de tamanho, forma e conectividade entre os poros (Ringrose-Voase e Bullock, 1984).

As medições de porosidade e rugosidade do solo fornecem dados de como a ocorrência de chuvas afeta a estrutura do solo e como o processo de formação de crostas se inicia e evolui ao longo da estação chuvosa em solos de diferentes texturas.

O entendimento de como os processos erosivos ocorrem é importante para que possamos criar e aplicar técnicas de controle da degradação da estrutura do solo e minimizar os impactos ambientais das atividades agrícolas.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivos:

- Objetivo principal:
  - Monitorar a evolução de crostas superficiais formadas em três tipos de solo após 10 períodos consecutivos de eventos de chuvas naturais.
- Objetivo secundário:
  - Avaliar os efeitos do encrostamento superficial sobre a porosidade, rugosidade superficial, infiltração de água e retenção de água no solo.

A pesquisa baseia-se na hipótese de que:

- A evolução da crosta superficial difere de acordo com a textura (e estrutura) de cada tipo de solo estudado;
- A crosta superficial reduz a rugosidade, a infiltração de água no solo, a porosidade e a continuidade entre os poros, aumentando consequentemente a perda de água e sedimentos por enxurrada;
- Solos de clima tropical com baixo conteúdo de silte também são susceptíveis ao encrostamento.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Erosão

A erosão é o processo natural de formação do relevo através da remoção, transporte e redeposição de partículas, causados pela ação da água, do vento e das variações de temperatura (Sparovek, 1996). Nos solos cobertos por vegetação a erosão é lenta e ocorre de maneira gradual, porém quando essa camada é removida o solo fica diretamente exposto à ação dos agentes erosivos e a erosão passa a ser abrupta, causando grandes modificações no relevo em um tempo reduzido.

A expansão das cidades, das áreas agrícolas e das áreas de pecuária sobre as áreas de floresta aceleram o processo de erosão, expondo o solo aos agentes erosivos, destruindo suas características físicas e empobrecendo as terras (Bertoni; Lombardi Neto, 2005).

O processo erosivo ocorre em etapas e tem início com o desprendimento das partículas do solo ou salpicamento (Morgan, 1977). O impacto das gotas de chuva ou da irrigação em solo nu destrói os agregados de superfície desprendendo partículas que ficam soltas na superfície do solo e propensas ao arraste (Rousseva et al., 2002). A composição química do solo e a forma como ele se deforma ao sofrer o impacto das gotas determinará a quantidade de partículas desprendidas (Huang et al., 1983; Le Bissonnais, 1996).

Os agregados de superfície, quando estáveis, sofrem menores alterações ao serem impactados pelas gotas, tornando o solo menos susceptível à erosão. A estabilidade dos agregados está relacionada diretamente às características primárias do solo, como textura, mineralogia da argila, conteúdo de matéria orgânica, teor de sódio e outros cátions, teor de óxidos de Fe e Al e teor de CaCO_3 . Outros fatores de favorecimento da remoção de partículas são teor de umidade inicial do solo, declividade do terreno e intensidade do evento chuvoso (Fox, 2004).

O transporte ocorre na fase subsequente à liberação das partículas e, em ambientes tropicais, é feito pela água. Quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração de água no solo a água se acumulará em superfície nas microdepressões do solo. Com a continuidade das chuvas as microdepressões ficam saturadas e passam a extravasar seu conteúdo

formando um fluxo de água superficial chamado de escoamento superficial ou “runoff” (Darboux et al, 2001).

O fluxo superficial formado terá uma determinada velocidade que dependerá da declividade do terreno e, esta velocidade dará a ele maior ou menor capacidade de transporte de partículas (Nearing et al., 1994). Fluxos com velocidades maiores transportam partículas maiores e fluxos com velocidades menores transportam materiais mais finos como argila e matéria orgânica.

A terceira e última etapa do processo erosivo é a deposição das partículas transportadas. Ela ocorre de maneira seletiva, sendo as partículas maiores e mais pesadas depositadas primeiro e as partículas mais finas e menores depositadas por último, conforme a enxurrada perde sua velocidade (Menten et al., 2001).

A deposição dos sedimentos pode ser um fenômeno local, realizado nas microdepressões do solo, entupindo poros e formando uma crosta superficial que reduz a infiltração, ou um fenômeno de maior escala, com deposição de sedimentos no fundo de vales longe de seu local de origem.

Os processos erosivos, dependendo da declividade do terreno e da velocidade com que ocorrem, podem ser classificados em laminar, voçorocas efêmeras e voçorocas. A erosão laminar ocorre suavemente, em terrenos de pouca declividade e abrange toda a superfície do terreno. As voçorocas efêmeras ocorrem devido a concentração do fluxo de água em determinada porção do terreno, abrindo caminhos conhecidos como sulcos de erosão. As voçorocas efêmeras são o estágio anterior às voçorocas e a diferença entre elas consiste em que as voçorocas efêmeras são superficiais e podem ser fechadas com o auxílio de maquinário agrícola. O aprofundamento das voçorocas efêmeras dá origem às voçorocas, nas quais a remoção do material do solo é feita de maneira rápida e profunda, impossibilitando as atividades agrícolas na área.

Apesar da erosão concentrada ser mais aparente e mais estudada (Auzet et al., 1992, 1995), a erosão laminar ou em sulcos também é significativa e pode ser mais ameaçadora ao ambiente (Le Bissonnais, 1998).

Independente do tipo ou grau de erosão que ocorre em uma área ela sempre ocasiona problemas intrínsecos e extrínsecos ao ambiente. Como problemas intrínsecos temos a perda de solo e de nutrientes, dificuldade de cultivo das áreas, aumento no uso de fertilizantes e corretivos químicos aumentando o custo de produção e até abandono das áreas erodidas. Como impactos

extrínsecos podemos citar impactos que normalmente possuem elevado custo social e ambiental como aterramento de fundos de vales, assoreamento dos cursos d'água pelo aporte de sedimentos, redução da capacidade de armazenamento de água em reservatórios, redução na capacidade de geração de energia elétrica em represas, necessidade de dragagem dos rios e reservatórios de água, eutrofização dos rios e lagoas, dentre outros impactos (Le Bissonnais, 1998; Pruski, 2006).

2.1.2 Efeito do preparo do solo

O preparo do solo é feito nas áreas agrícolas visando facilitar o plantio, um melhor desenvolvimento das raízes e eliminação e incorporação das plantas daninhas. Ele é usado para homogeneizar e distribuir o solo de maneira uniforme em uma superfície a ser plantada e pode ser realizado com diferentes implementos, dependendo das condições do solo a ser trabalhado e das condições exigidas para o plantio.

Um dos preparos de solo mais utilizados no Brasil é a aração seguida pela gradagem. O arado é utilizado para eliminar possíveis camadas adensadas e a gradagem é feita para destorroamento, incorporação de restos vegetais e nivelamento do solo.

O tipo de preparo utilizado no solo pode ser um fator facilitador da erosão, pois pode modificar os índices de infiltração de água no solo (Cressie e Horton, 1987) devido às modificações da porosidade induzidas pelo preparo (Lgsdon e Jaynes, 1996; Tsegaye e Hill, 1998). Para Allmaras (1966) quando o preparo é realizado com umidade próxima ao ponto de consistência plástica a aragem e a gradagem promovem um aumento da porosidade, porém em condições friáveis de preparo elas reduzem a porosidade.

O preparo do solo é um importante fator a ser considerado quando avaliamos taxas de erosão em áreas agrícolas, pois ele modifica a estrutura e organização das partículas do solo, modificando a porosidade e a capacidade de infiltração de água e ar, além de promover mudanças na rugosidade superficial do solo.

2.1.3 Condições de superfície do solo

A condição de superfície do solo é representada pelo conjunto de microelevações e microdepressões superficiais que formam o microrrelevo superficial do solo e tem importante

influência nas taxas de infiltração, geração de escoamento e erosão (Papy e Douyer, 1991; Auzet et al., 1995).

O microrrelevo do solo também chamado de rugosidade superficial é indicador de estrutura, pode ser natural ou causado pelo uso de implementos, e tem importante papel na prevenção da erosão hídrica formando pequenas bacias de contenção que retém a água da chuva (Dexter, 1977, Casenave e Valentin, 1989; Vidal Vázquez, 2005). A retenção de água no microrrelevo do solo pode atrasar ou acelerar o tempo de início do escoamento superficial, já que este se inicia quando as microdepressões estiverem saturadas e interconectadas pelo excesso de água presente (Allmaras, 1966, Cogo, 1983, Casenave e Valentin, 1989, Darboux, 2001).

A rugosidade do solo dependente de suas características primárias como textura, mineralogia, quantidade de matéria orgânica, tipo de solo (Fox e Le Bissonnais, 1998) é chamada de rugosidade aleatória (Castro et al., 2006). A rugosidade que depende de outras características como cobertura vegetal, atividade biológica, interações com fatores climáticos e fatores relacionados ao uso da terra (umidade do solo no momento do preparo, tipo e intensidade do preparo) dará origem à rugosidade orientada, que permite identificar a direção do preparo (Allmaras et al., 1966; Fox e Le Bissonnais, 1998; Kamphorst et al., 2000; Le Bissonnais, 2005, Castro et al., 2006).

As rugosidades orientada e aleatória podem ser reduzidas pelo preparo intensivo do solo que fragmentará agregados liberando partículas para o transporte, ou pelo salpicamento causado pelo impacto das gotas de chuva ou da irrigação sobre o solo (Castro et al., 2006).

As partículas soltas pelo preparo e pela chuva são transportadas e se depositam nas microdepressões do solo, causando uma modificação na microtopografia do terreno transformando o terreno rugoso em uma superfície mais lisa.

Desta maneira, com a ocorrência das chuvas temos a redução da rugosidade do solo, a redução na capacidade de armazenamento de água em superfície, a formação de escoamento superficial e o aumento das taxas de erosão.

2.1.4 Escoamento superficial

Quando a intensidade de chuva supera a capacidade de infiltração e de armazenamento de água nas microdepressões do solo forma-se o escoamento superficial.

A chuva, ao incidir sobre solo seco infiltra rapidamente através dos poros, executando um movimento descendente de água no perfil. Conforme os poros são saturados a capacidade de infiltração é reduzida, fazendo com que a água que atinge o solo não infiltre e seja acumulada em superfície nas microdepressões citadas no item anterior.

Com a saturação das microdepressões a água que chega é extravasada conectando diversas microdepressões aumentando a quantidade de água presente em superfície e formando um fluxo de água superficial.

2.1.5 Encrostamento superficial

A crosta superficial é uma camada lisa, algumas vezes endurecida, com partículas bem selecionadas que se forma na superfície do solo, podendo entupir poros, prejudicando ou mesmo impedindo a infiltração de água no solo (Valentin e Bresson, 1992; Fox e Le Bissonnais, 1998; Fox, 2004). Devido a essa característica de redução da taxa de infiltração do solo a crosta é reconhecida como um dos principais fatores de aumento das taxas de erosão (McIntyre, 1958a, b; Boiffin e Monnier, 1986; Casenave e Valentin, 1992; Valentin e Bresson, 1992).

O processo de encrostamento superficial do solo tem início com o impacto das gotas de chuva ou da irrigação sobre a superfície do solo, ocasionando o rompimento e dissolução dos agregados da superfície, liberando partículas do solo. Os solos com maior teor de silte e areia fina são mais susceptíveis ao encrostamento, pois formam agregados menos estáveis, liberando partículas mais facilmente (Le Bissonnais e Bruand, 1993).

As partículas soltas são transportadas e redepositadas em outras áreas. Concomitantemente ao rompimento e redeposição temos a ocorrência de outros processos como a compactação e rearranjo de partículas, alisamento e rebaixamento da superfície do solo e obstrução e preenchimento dos macroporos. Após o secamento essa camada sofre contração formando uma camada densa e dura, com elevada resistência à penetração, dificultando a germinação das sementes (Arndt, 1965; Assouline, 2004; Bajracharya e Lal, 1999; Hillel, 1980).

O encrostamento segue um padrão geral com o selamento da superfície por crosta estrutural e o desenvolvimento de uma crosta deposicional (Bresson e Boiffin, 1990). A crosta estrutural é formada no local, com a reorganização dos agregados e seleção das partículas, e a crosta deposicional é formada através da chegada de partículas durante o empoçamento.

O processo de encrostamento é favorecido pelo teor de umidade do solo, intensidade e duração do evento chuvoso, condições climáticas (Le Bissonnais e Bruand, 1993; Azooz e Arshad, 1996) e de fatores físicos, químicos e mineralógicos do solo (Mermut et al., 1995).

Para Brandão (2006) a avaliação do desenvolvimento das crostas pode ser feita através de medições das características físicas e hídricas do solo como infiltração e condutividade hidráulica (McIntyre, 1958a, b; Edwards e Larson, 1969) ou por observações morfológicas da crosta usando técnicas de microscopia.

2.1.6 Micromorfologia no estudo do encrostamento

O estudo das crostas e seus efeitos sobre as características do solo é bastante difícil, pois as crostas são camadas muito finas, sensíveis às perturbações mecânicas e com suas características se misturando às características do próprio solo, sendo sua análise bastante delicada

A análise micromorfológica parece ser o melhor método para entender as modificações realizadas na estrutura e porosidade do solo, já que as amostras são retiradas indeformadas e os blocos impregnados nos permitem fazer uma avaliação da porosidade da amostra tanto em superfície quanto em subsuperfície.

O uso da técnica de micromorfologia em crostas permite analisar sua espessura, macroporosidade, distribuição, forma e continuidade dos poros, além de analisar as modificações na porosidade do solo causadas pela chuva observando visualmente o que não é mensurável através de equipamentos de condutividade hidráulica e curva de retenção de água (Duley, 1939; Evans e Buol, 1968; Bresson e Boiffin, 1990; Brandão et al, 2006).

2.2 Material e métodos

2.2.1 Descrição do local de estudo

Os experimentos de campo foram instalados em três áreas diferentes pertencentes à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” / USP, no município de Piracicaba – SP –

Brasil. As áreas foram escolhidas com base na análise do mapa de solos ultradetalhado do campus (Vidal Torrado et al., 2004) (Figura 1).

A primeira área está localizada na latitude 22° 41' 47" sul e longitude 47° 37' 47" oeste, sobre Nitossolo Vermelho eutrófico típico de textura argilosa (Figura 2) denominada área D. A segunda área está localizada na latitude 22° 43' 04" sul e longitude 47° 36' 25" oeste, sobre Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico de textura média (Figura 3) denominada área C. A terceira área fica localizada na latitude 22° 42' 51" sul e longitude 47° 36' 44" oeste, sobre Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média (Figura 4) denominada área B.

Figura 1 – Mapa de solos do campus

Figura 2 – Área de Nitossolo

Figura 3 – Área de Argissolo

Figura 4 – Área de Latossolo

2.2.2 Variação sazonal da chuva

A Figura 5 apresenta os dados de pluviosidade mensal referente aos períodos de coleta de dados do experimento e abrange os anos de 2008 e 2009. Os dados de pluviosidade foram fornecidos pela estação automática do posto agrometeorológico do Departamento de Engenharia de Biosistemas ESALQ – USP, disponível no site (<http://www.lce.esalq.usp.br/postoaut.html>). O posto fica localizado na latitude 22° 42' 30" sul – longitude de 47° 38' 00" oeste, com altitude de 546 metros no município de Piracicaba –SP – Brasil.

Figura 5 - Gráfico da pluviosidade com base nos dados da estação meteorológica automática da ESALQ

O gráfico de chuvas (Figura 5) apresenta a distribuição das chuvas durante os anos de 2008 e 2009. A maior concentração de chuvas ocorre no período de verão (de dezembro a março) com picos acima de 100 mm mensais. Durante os meses de inverno as chuvas são de baixa intensidade ou mesmo ausentes.

O ano de 2008 apresenta pluviosidade de 1286,2 mm sendo os meses de verão responsáveis por 675,9 mm deste total. O mês de julho apresentou pluviosidade nula.

O ano de 2009 apresentou pluviosidade total de 1271 mm sendo os meses de janeiro a abril responsáveis por 432 mm. O ano foi atípico em relação às chuvas apresentando um período com poucas chuvas entre os meses de abril e maio e meses de inverno (julho a setembro) bastante

chuvosos em relação aos anos anteriores. Apesar disso a diferença nas chuvas não afetaram o andamento do experimento, já que as coletas de campo se encerraram no início de abril.

2.2.3 Realização dos experimentos

A homogeneidade das condições de superfície dos solos no momento da implantação dos experimentos foi garantida pela realização de um preparo inicial com a simulação das condições de plantio de uma cultura anual ou pastagem. Para o preparo do solo foi utilizada grade pesada para destorroamento e posteriormente grade niveladora. A fim de manter o solo descoberto durante todo o período de realização dos experimentos foi utilizado herbicida de amplo espectro (glifosato) para eliminar a cobertura vegetal original.

Os experimentos foram conduzidos em três unidades experimentais de 5 x 5 m, sendo uma para cada tipo de solo, delimitadas por cerca de arame de aço galvanizado fixada por mourões de eucalipto tratado, para evitar acesso de pessoas não autorizadas ou de animais. Foi avaliado o efeito das chuvas naturais sobre a formação das crostas superficiais através de 4 coletas sendo uma logo após o preparo do solo (T0), uma após a ocorrência de três eventos chuvosos (T3), uma após cinco eventos chuvosos (T5) e a última após 10 eventos chuvosos (T10). Foram contabilizadas chuvas com intensidade acima de 25 mm/h que são chuvas consideradas erosivas para países de clima tropical e subtropical (Hudson, 1973; Carvalho et al., 2005).

Figura 6 - Preparo da área C

Figura 7 - Área D preparada

A tabela a seguir apresenta o cronograma das atividades desenvolvidas.

Tabela 1 - Atividades desenvolvidas durante o experimento

Atividade desenvolvida	Dia	Mês	Ano
Preparo das áreas e instalação das cercas	20	dezembro	2008
Primeira coleta (T0)	20	dezembro	2008
Segunda coleta (T3)	4	fevereiro	2009
Terceira coleta (T5)	2	março	2009
Quarta coleta (T10)	3	abril	2009

2.2.4 Análises físicas do solo

2.2.4.1 Análise granulométrica

Para a caracterização inicial e análise granulométrica do solo foram coletadas amostras deformadas na profundidade de 0 a 0,05 m e de 0,10 a 0,15 m. A análise granulométrica foi realizada no laboratório do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP seguindo metodologia proposta por Camargo et al. (1986), onde 50 g de solo são misturadas à solução de hidróxido e hexametáfosfato de sódio. Após agitação horizontal por 16 horas, são separadas as frações granulométricas da TFSA (terra fina seca ao ar) pelo método do densímetro.

Devido aos diferentes tamanhos dos materiais do solo, a velocidade de decantação das partículas é diferente, desta maneira, através da medição da densidade da suspensão a cada intervalo de tempo pré-determinado, pode-se descobrir a porcentagem de cada partícula presente na suspensão. A densidade lida aos 40 segundos será a densidade do líquido + argila dispersa + silte, após duas horas será a densidade do líquido + argila dispersa. Sabendo a massa de solo dispersa na solução (50 g) e a densidade do líquido, é possível estabelecer a contribuição de cada fração granulométrica para a suspensão.

Figura 8 - Coleta das amostras deformadas

Figura 9 - Material disperso para análise granulométrica

2.2.4.2 Determinação da rugosidade superficial

A evolução da rugosidade superficial, orientada e aleatória (Darboux, 1999) foi medida em três subparcelas de 1 x 1 m fixas dentro de cada unidade experimental após cada chuva. As leituras foram feitas utilizando um distanciômetro a laser em um rugosímetro portátil, adaptado de Arvidsson e Bölenius (2006) com resolução de 0,05 mm na vertical e um “grid” de 2,00 mm na horizontal, totalizando 500.000 pontos por parcela, interpolados geostatisticamente. O erro em repetibilidade dos dados é de 1%.

Os dados são fornecidos pelo rugosímetro em milivolts e transformados em milímetros com auxílio de um fator de conversão conforme representado a seguir.

$$P1 = x \times 10 \quad (1)$$

$$P2 = y \times 10 \quad (2)$$

$$P3 = \frac{z \times 1,5}{4096} \quad (3)$$

Os valores transformados em milímetros são plotados no programa Sigmaplot® e transformados em gráficos de superfície representativos da rugosidade do solo.

Para avaliar a evolução na rugosidade de cada parcela após cada chuva foram construídos variogramas com o auxílio do programa geoestatístico GS+®.

Figura 10 - Rugosímetro digital a laser

Figura 11 - Detalhe do rugosímetro digital a laser

2.2.4.3 Micromorfologia e análise de imagens

Para análise micromorfológica foram coletadas amostras indeformadas em caixas de papel cartão de 0,12 x 0,07 x 0,05 m orientadas em relação à superfície do solo e devidamente identificadas. A parte superior das amostras foi protegida com algodão para evitar que a crosta se rompesse durante o transporte ou durante o processo de impregnação. Para cada coleta foram retiradas duas repetições na profundidade de 0 a 0,5 m afim de caracterizar o encrostamento em superfície.

Os blocos de solo coletados foram secos ao ar por 15 dias e em seguida secos em estufa a 40°C com ventilação forçada por 48 horas. Uma vez secas, as amostras foram colocadas individualmente em potes plásticos e acondicionadas em dessecadores ligados a uma bomba de vácuo para facilitar a penetração da solução para impregnação conforme Castro et al. (2003).

A impregnação foi feita de acordo com a metodologia apresentada por Murphy (1986) onde são misturados uma parte de resina poliéster “cristal” e uma parte de monômero de estireno. O monômero é utilizado para reduzir a viscosidade da resina e facilitar a penetração da solução na amostra (Castro et al., 2003). Também foram adicionados à amostra pigmento fluorescente Uvitex OB (Ciba-Geigy®) (Murphy; Bullock; Turner, 1977) na proporção de 5 kg em 1 m³ de monômero e um catalisador para controle do endurecimento da solução (Ringrose-Voase, 1991), neste caso, peróxido orgânico (Butanox M50) em 4 gotas por 10⁻³ m³ de solução.

A solução é adicionada vagarosamente aos potes plásticos ligando-se a bomba de vácuo a cada nova adição por pelo menos 30 minutos. O procedimento é repetido até que a amostra esteja totalmente coberta pela solução. O período em que a amostra permanecia em solução era de no mínimo 24 horas (Ringrose-Voase, 1991).

Depois de impregnados e secos os blocos foram cortados com serra de diamante, lixados com auxílio de um disco rotatório e carbureto de silício preto de granulação grosseira (220 mesh, com grãos de 53-62 μm) e polidas com um disco rotatório e carbureto de silício verde, mais fino (600 mesh, grãos de 18-22 μm), mantendo a amostra sempre úmida em contato com o material abrasivo. Após serem lixados e polidos os blocos foram usados para estudos de análise de imagem no Laboratório de Microscopia do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP, onde sob luz ultravioleta e em ambiente escuro, o espaço poroso (mais claro) foi destacado da matriz do solo (mais escura) pelo pigmento fluorescente utilizado.

As imagens dos blocos foram adquiridas utilizando uma câmera digital em cores (Sony®, modelo DFW-X700), em sistema “charged couple device” (CCD), conectada a uma lupa com polarizador (Zeiss®). As imagens foram digitalizadas em 1024 x 768 pixels, com resolução espectral de 256 tons de cinza, em aumento de 10x, igualando um pixel a 156,25 μm^2 . A identificação dos poros na imagem foi feita através das macros desenvolvidas no software Noesis®Visilog 5.4.

O processo de classificação e quantificação da porosidade total foi realizado segundo os critérios definidos por Cooper e otimizado por macros desenvolvidas em linguagem Visual Basic no Microsoft® Excel (Juhász, 2007).

Também foram adquiridas imagens digitais dos blocos com uma câmera digital Sony Cyber-Shot DCS-H1 para visualizar as crostas desenvolvidas durante a chuva.

Figura 12 - Coleta das amostras indeformadas

Figura 13 - Amostra disposta em caixas plásticas

Figura 14 - Amostra disposta no dessecador

Figura 15 - Amostra impregnada

2.2.5 Análises químicas

Amostras deformadas foram coletadas em três repetições nas profundidades de 0 a 0,05 m e de 0,10 a 0,15 m para caracterização química inicial dos solos. As análises foram feitas nos Laboratórios de Fertilidade do Solo e Análise Química em Solos do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP.

2.2.5.1 Determinação do pH em CaCl_2

A determinação do pH foi realizada a partir da medida da atividade dos íons de hidrogênio (H^+) com eletrodo de vidro e referência, na suspensão de terra em CaCl_2 0,01 mol L^{-1} .

A solução de cloreto de cálcio foi preparada dissolvendo 1,47 g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ em água destilada ou deionizada, diluindo em 1000 mL em balão volumétrico e agitando. O pH da solução deve ser ajustado entre 5,0 e 6,5 usando quando necessário $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 0,1% ou HCl 0,1 mol L^{-1} .

O procedimento analítico consiste em transferir 10 cm^3 de terra para um frasco de plástico, adicionar 25 mL da solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} e agitar a suspensão por 5 minutos. Após o repouso de 30 minutos foi realizada a leitura.

2.2.5.2 Determinação do pH em água e em KCl

Para a determinação de pH em água e KCl 1N, foram substituídas as soluções usadas, seguindo o mesmo procedimento descrito para o pH em CaCl_2 .

2.2.5.3 Determinação da Acidez Potencial

Após a leitura do pH em CaCl_2 , foi adicionado 5 mL da solução tampão SMP. A suspensão foi agitada por 15 minutos e em seguida colocada em repouso por 1 hora. A seguir foi feita a leitura. Esse método coloca a acidez da amostra em contato com a solução tampão SMP, provocando um decréscimo do valor original do pH da solução.

Cálculo: $23504 \times \text{Exp}^{(-1,0537 \times \text{Leitura})}$

2.2.5.4 Determinação do alumínio trocável

Para determinar alumínio trocável foi adicionado 5 cm³ de terra a 50 mL de KCl 1 mol L⁻¹ e agitou-se por 10 minutos. Em seguida a solução foi filtrada e deixada para secar durante a noite. Após a secagem retirou-se uma alíquota de 25 mL do filtrado transferindo-a para um erlenmeyer para titulação com solução de NaOH 0,025 mol L⁻¹ adicionando 3 gotas de fenoftaleína. Foi observado o ponto de viragem (cor rosa).

Cálculo: Leitura x 10.

2.2.5.5 Determinação da Matéria Orgânica

A matéria orgânica foi determinada adicionando 1 cm³ de terra a 10 mL de solução de Na₂Cr₂O₇ 4 N em H₂SO₄ 10 N. Essa mistura foi agitada por 15 minutos e em seguida colocada em repouso por 1 hora. Foi adicionado 50 mL de água deionizada e agitado novamente com um bastonete de vidro ficando em repouso por mais 12 horas. Em seguida o líquido sobrenadante foi transferido para o tubo de colorímetro com filtro de transmissão máxima de 650 nm e realizada a leitura.

Cálculo: Leitura x 0,093 x 10.

2.2.5.6 Determinação do Potássio – Mehlich 1

Para determinação do potássio foi adicionado a um frasco de plástico 2,5 cm³ de terra e 25 mL de solução Mehlich 1. Agitou-se por 5 minutos e foi retirada uma alíquota de 10 mL para leitura no fotômetro de chama.

Cálculo: ((0,1996 x Leitura + 0,0274) x 10)/39,1.

2.2.5.7 Extração de Cálcio, Magnésio e Fósforo

Foi usado o método de extração por resina, proposto por Raij et al., (1987). A mistura de resina catiônica com a resina aniônica favorece a extração do fósforo e permite também, a

extração dos elementos catiônicos absorvidos em concentrações maiores pelas plantas (Ca^{2+} , Mg^{2+}), adsorvidos à fração coloidal do solo.

Foi colocado $2,5 \text{ cm}^3$ de terra, 25 mL de água deionizada e uma bolinha de vidro em um frasco plástico. Agitou-se por 15 minutos e em seguida a bolinha foi retirada. Foi acrescentado $2,5 \text{ cm}^3$ de resina e agitou-se a solução por mais 16 horas.

2.2.5.8 Determinação de Cálcio e Magnésio

O cálcio e magnésio são determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Para a calibração das leituras do aparelho foram feitas leituras das soluções padronizadas para a construção da reta de absorbância em função da concentração dos elementos. Com isso foi determinado o fator de conversão entre a leitura dada pelo aparelho de absorção atômica e a concentração do elemento no solo.

Para o cálcio e magnésio, foi transferida uma alíquota de 1 mL do extrato da resina para um tubo de ensaio, acrescentando 10 mL da solução de óxido de lantânio a 0,1% e agitado.

Cálculo: Leitura x 10.

2.2.5.9 Determinação do Fósforo

A determinação do fósforo foi feita através da colorimetria. A solução ácida de molibdato contém íons ortofosfatos formando complexo fosfomolibdico, que pode ser reduzido por ácido ascórbico a um composto azul. Quanto maior a concentração de fósforo na solução, maior a intensidade da coloração azul. Obtendo-se a reta através da leitura das soluções padrão, o fator de conversão das leituras nos extratos foi determinado.

Para o procedimento analítico foi diluído 4 mL do extrato de resina em 16 mL da solução diluída de molibdato de amônio. A solução foi agitada e colocada em repouso por 30 minutos. Em seguida a leitura foi realizada em colorímetro a 660 nm.

Cálculo: Leitura x 0,35.

2.2.5.10 Determinação do Enxofre

Foi realizada transferindo-se 10 cm³ de terra, 25 mL de fosfato monocálcico e 0,25 g de carvão ativado para um erlenmeyer de 125 mL. A solução foi agitada por 30 minutos e filtrada com papel de filtro. Foi retirada uma alíquota de 10 mL e adicionado 1 mL de solução ácida e um cachimbo de cloreto de bário. A mistura foi agitada e a leitura realizada em seguida no colorímetro.

Cálculo: $116,28 \times (\text{Leitura} - 0,045)$.

2.2.5.11 Determinação de Fe, Mn, Cu e Zn.

A extração dos micronutrientes foi realizada dissolvendo 10 cm³ de terra em 20 mL da solução DTPA e agitando por 2 horas. Em seguida a solução foi filtrada em papel de filtro faixa azul durante uma noite. A leitura foi realizada diretamente do extrato obtido, sendo feita uma por uma e calibrando o equipamento para cada solução padrão.

Cálculo: $\text{Leitura} \times 2$.

2.2.6 Análises Físico-hídricas

2.2.6.1 Curva de retenção de água no solo

Após cada evento chuvoso foram coletadas amostras indeformadas em cilindros de 100 cm³ para obtenção de curvas características de retenção de água no solo. As amostras não foram trabalhadas na parte superior para que a crosta não fosse prejudicada. Para evitar possíveis perdas de solo e melhorar o contato entre a amostra e a placa porosa, uma tela “silk screen” 100 fios foi fixada na parte inferior de cada anel após a coleta das amostras. O método do funil de Haines (Figura 16) foi utilizado para determinar os potenciais de 1, 3, 5, 6, 8 e 10 kPa e as câmaras de Richards foram usadas para determinação dos potenciais de 33, 50, 70 e 100 kPa. Ambos os procedimentos foram realizados no laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ-USP.

As placas porosas dos funis foram previamente saturadas até que se formasse uma fina camada de água sobre a placa. As amostras foram dispostas no funil exercendo uma leve pressão para facilitar o contato entre a placa e a amostra estabelecendo um contínuo de água.

A saturação das amostras foi feita dentro do funil elevando-se gradativamente o nível de água até atingir 2/3 da altura da amostra. Neste ponto as amostras foram deixadas em repouso por 24 horas. A saturação foi realizada somente para a primeira tensão, sendo que, para as demais tensões foi realizada somente a ressaturação, forçando uma saturação de baixo para cima até formar uma lâmina de água sobre a placa porosa e recolocando as amostras sobre a placa. Após a estabilização nas tensões as amostras foram pesadas em balança de precisão (2 dígitos).

Para as câmaras de Richards os procedimentos foram seguidos segundo metodologia descrita em EMBRAPA (1997).

Seguindo esses procedimentos foi possível correlacionar os potenciais matriciais e suas umidades para a superfície do solo. Desta forma foram construídas curvas de retenção de água no solo onde o eixo do potencial matricial é dado em pF, cujo antilogaritmo corresponde ao potencial em cca (cm de coluna d'água).

O ajuste das curvas de retenção foi feito para o modelo de Van Genuchten (1980), a partir do software SWRC®, versão 2.00 (Dourado Neto et al., 2000).

Figura 16 - Funis de Haines

Figura 17 - Detalhe do funil de Haines

2.2.6.2 Condutividade hidráulica

A medição de infiltração de água no solo foi realizada com o infiltrômetro de disco apresentado por Perroux e White (1988) (Figura 18).

Para proceder a leitura da condutividade hidráulica a superfície do solo deve ser preparada com uma pequena quantidade de areia fina para aplainamento da superfície do solo, já que as crostas não podem ser rompidas, e também para facilitar a colocação do infiltrômetro. Este procedimento é adotado para melhorar o contato entre a placa porosa e o solo.

Três potenciais foram aplicados durante as medidas de infiltração: -1,0; -3,5 e -10 cm. A descrição detalhada do aparelho e seu funcionamento é dada por Ghiberto (1999).

O protocolo de cálculo utilizado neste trabalho é apresentado por Ankeny et al. (1991) baseado na equação de Wooding (1968). Este protocolo é simplificado utilizando as medidas obtidas com o infiltrômetro com um disco e permite estimar a condutividade hidráulica $K(\psi)$.

Figura 18 - Aparelho multidisco para medição da condutividade hidráulica

Figura 19 - Detalhe do contato do aparelho com o solo

2.2.7 Estatística

O delineamento experimental utilizado para cada solo é em blocos ao acaso com 4 tratamentos representados pelas chuvas T3, T5, T10 e a testemunha (T0). Foram analisadas as porosidades totais e a condutividade hidráulica para cada solo.

Na tabela 2 temos os coeficientes de variação para a análise individual de cada solo.

Tabela 2 - Coeficiente de variação para cada solo

C.V.	G.L.
Blocos	1
Chuvas	3
Resíduo	3
Total	7

2.2.8 Construção dos variogramas

O cálculo e ajuste do modelo de semivariograma que melhor se correlaciona com o comportamento espacial das alturas da rugosidade do solo observadas foram realizados através do programa GS+® (Gamma Design Software, St. Plainwell, MI). As semivariâncias foram plotadas no programa de gráficos SigmaPlot®.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada no início do experimento após o preparo do solo para caracterização da composição mineralógica dos solos nas camadas superficiais de 0 a 0,05 m e 0,10 a 0,15 m. Os valores de argila, silte e areia para o Latossolo e Argissolo são semelhantes, sendo cerca de 20% de argila, 7% de silte e cerca de 70% de areia e pouco alterados em subsuperfície para ambos os solos.

Para o Nitossolo a porcentagem de argila presente no perfil foi maior que para os outros solos com cerca de 50% e a quantidade de areia menor (cerca de 40%). Deve ser destacado que a quantidade de silte presente no Nitossolo foi cerca de 10%, um pouco maior que para os outros solos que fica em torno de 7%.

Os resultados para a granulometria são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 3 - Granulometria das parcelas

	Argila	Silte	Areia Total
	T0	T0	T0
Parcela B - Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico			
Superfície (0 a 0,05m)	21	7	72
Subsuperfície (0,10 a 0,15m)	24	7	69
Parcela C - Argissolo Vermelho Amarelo distrófico típico			
Superfície (0 a 0,05m)	22	7	71
Subsuperfície (0,10 a 0,15m)	19	7	74
Parcela D - Nitossolo Vermelho eutroférico típico			
Superfície (0 a 0,05m)	50	11	39
Subsuperfície (0,10 a 0,15m)	45	13	42

2.3.2 Análises químicas

As análises químicas foram realizadas visando caracterizar os solos utilizados durante o experimento. A Tabela 4 apresenta a caracterização química das parcelas após o preparo (T0). Todos os elementos, exceto os valores de pH, delta pH, V% e m% estão expressos em mmol.kg⁻¹.

O Latossolo apresenta boa fertilidade para a camada superficial com V% de 42%, matéria orgânica de 22 mmol.kg⁻¹, soma de bases de 27 mmol.kg⁻¹ e CTC de 68 mmol.kg⁻¹. Estes valores apresentaram uma ligeira queda para as camadas subseqüentes, exceto para os valores de V% e m% que passaram para 51 e 11 %, respectivamente.

O Argissolo é mais fértil para a camada superficial que o Latossolo com V% de 55%, matéria orgânica de 22 mmol.kg⁻¹, soma de bases de 27 mmol.kg⁻¹ e CTC de 51 mmol.kg⁻¹. Para as camadas subseqüentes os valores foram ligeiramente menores, exceto para V% e m% que passaram para 68 e 14% respectivamente.

O Nitossolo apresentou melhor fertilidade sendo o V% 83%, a matéria orgânica 22 mmol.kg⁻¹, a soma de bases 27 mmol.kg⁻¹ e a CTC 76 mmol.kg⁻¹. Para as camadas subseqüentes os valores foram ligeiramente menores, exceto para m% que passou de 0,52% para 1,11%.

Tabela 4 - Análise química das parcelas

Parcela		B		C		D	
Prof. (cm)		0-5	10-15	0-5	10-15	0-5	10-15
pH CaCl ₂		4.39	4.40	4.63	4.35	5.82	5.80
pH KCl 1N		4.45	4.60	4.85	4.63	6.15	6.10
pH H ₂ O		5.44	5.47	5.65	5.35	6.59	6.67
Delta pH		-0.99	-0.87	-0.80	-0.72	-0.44	-0.56
SB		27.73	24.80	27.88	21.74	64.10	58.13
CTCe (t)	mmol.kg ⁻¹	30.86	27.86	29.61	25.37	64.44	58.76
CTC (T)		68.51	48.54	51.74	34.81	76.56	72.31
V%	%	42.03	51.22	55.30	68.65	83.75	80.28
m%		10.46	11.08	6.13	14.17	0.52	1.11
H + Al		40.78	23.74	23.86	13.07	12.46	14.18
Al ⁺³		3.13	3.07	1.73	3.63	0.33	0.63
Ca		21.76	20.43	21.60	19.06	43.12	39.49
Mg		4.77	3.35	4.30	1.84	17.64	15.80
K		0.96	0.63	1.67	0.53	3.04	2.46
Na	mmol.kg ⁻¹	0.23	0.38	0.31	0.31	0.31	0.38
P		4.55	3.50	4.43	2.80	38.97	27.07
S		5.39	5.23	8.33	7.60	9.30	0.97
Cu		1.20	0.95	1.10	0.95	1.81	1.82
Zn		1.21	0.55	1.39	0.34	4.18	3.39
Mn		8.99	8.59	33.56	28.64	40.88	37.73
Fe		77.49	62.07	43.96	25.30	14.49	17.42
MO		22.63	19.53	22.32	15.81	22.32	21.39

2.3.3 Rugosidade superficial

A evolução da rugosidade da superfície dos solos ao longo de 10 eventos chuvosos pode ser observada nas Figuras 20 a 28 que comparam a evolução da rugosidade no tempo zero (T0), após três chuvas (T3), cinco chuvas (T5) e dez chuvas (T10). A tendência observada para os três solos após 10 chuvas é de um alisamento ou uma diminuição importante na rugosidade superficial do solo.

Como resultado do preparo do solo, o Latossolo apresentou pequena concentração de agregados em superfície (Figura 21), devido à grande quantidade de areia presente neste solo que

foi responsável pela elevada pulverização dos agregados após o preparo. Deve-se ressaltar que, apesar da elevada pulverização dos agregados durante o preparo (T0) a superfície do Latossolo apresentava-se bastante rugosa e com uma microtopografia bastante acidentada (Figura 20).

Após a terceira chuva (T3) podemos observar uma mudança na conformação da superfície sendo que o solo já se apresentou menos rugoso que T0 e com um microrrelevo um pouco menos ondulado. Entre a terceira e quinta chuvas (T5) as medições foram semelhantes, mostrando que, apesar de algumas modificações na microtopografia o solo foi pouco afetado entre essas chuvas. A mudança mais brusca na rugosidade do solo ocorre com o tempo e acúmulo das chuvas. Após a décima chuva (T10) o gráfico da rugosidade do solo apareceu bastante diferente dos gráficos anteriores mostrando uma superfície bastante alisada (Figura 21 e 22).

A redução da rugosidade foi acompanhada por um rebaixamento da superfície do solo que pode ter ocorrido em decorrência da perda de material do solo ou pelo colapso da estrutura e pode ser percebida ao observarmos o eixo Z do gráfico de rugosidade que passa de valores de cerca de 1,1mm em T0 para cerca de 1,0mm em T10 (Fig. 20).

Figura 20 - Evolução da rugosidade para o Latossolo Vermelho-Amarelo

Figura 21 – Aspecto da rugosidade superficial do Latossolo após o preparo (T0)

Figura 22 - Aspecto da rugosidade superficial do Latossolo após 10 eventos chuvosos (T10)

A evolução da rugosidade para o Argissolo Vermelho-Amarelo pode ser observada na Figura 23. O Argissolo apresentou superfície com maior concentração de agregados que o Latossolo após o preparo (T0) e também bastante rugosa (Figura 24). A redução da rugosidade seguiu o mesmo padrão que o Latossolo, observou-se um declínio bastante acentuado entre T0 e T10 e menos acentuado entre T0, T3 e T5 (Figura 23 e 25).

Também pode ser observado um rebaixamento da superfície do Argissolo que passou de uma elevação de aproximadamente 1,1 mm em T0 para 0,9 mm em T10 (Figura 23).

Figura 23 - Evolução da rugosidade para o Argissolo Vermelho-Amarelo

Figura 24 – Aspecto da rugosidade superficial do Argissolo após o preparo (T0)

Figura 25 - Aspecto da rugosidade superficial do Argissolo após 10 eventos chuvosos (T10)

As alterações mais expressivas foram observadas para o Nitossolo. A grande quantidade de argila deste solo faz com que as alterações causadas na rugosidade ocorram não só pela remoção de material das áreas mais altas e deposição nas depressões, mas também pela compressão do solo devido a pressão exercida pelas gotas de chuva que causam o assentamento

do material do solo mais rapidamente. Somado a isso, as partículas finas de argilas desprendidas são mais facilmente transportadas em suspensão na água por serem partículas mais leves.

Em T0 o Nitossolo apresentava superfície bastante rugosa e com a presença de torrões de diversos tamanhos (Figuras 26 e 27) e foi bastante reduzida com a ocorrência das chuvas como pode ser observado nos gráficos (Figura 26) e nas fotos de campo (Figuras 27 e 28). A superfície ficou bastante alisada após a ocorrência das chuvas e com a presença de fissuras características de solos argilosos devido à expansão e contração do material.

Concomitantemente à perda de rugosidade pode-se observar o rebaixamento da superfície do solo passando de cerca de 1,0 mm em T0 para cerca de 0,9 mm em T10.

Figura 26 - Evolução da rugosidade para o Nitossolo Vermelho

Figura 27 – Aspecto da rugosidade superficial do Nitossolo após o preparo (T0)

Figura 28 – Aspecto da rugosidade superficial do Nitossolo após 10 eventos chuvosos (T10)

A redução na rugosidade dos solos pode ter ocorrido devido ao colapso da estrutura do solo pela pressão exercida no momento de impacto das gotas contra o solo ou pela remoção de partículas de superfícies mais elevadas, transporte e redeposição destes sedimentos nas depressões do solo. Esse processo de retirada e redeposição dos sedimentos causa a redução no tamanho dos torrões em superfície e a redução na profundidade das depressões, causando o alisamento da superfície do solo e possível aumento das taxas de erosão devido a redução no tempo de formação de enxurrada e perda na capacidade de retenção de água e sedimento nas microdepressões do solo.

2.3.4 Análise Geoestatística da Rugosidade

A análise geoestatística é utilizada quando os valores dos pontos medidos não podem ser considerados independentes entre si e existem evidências de que pontos próximos apresentam valores similares. Para esta análise são construídos variogramas que indicam a medida da variância das diferenças nos valores da variável regionalizada entre pontos separados por certa distância, ou seja, a variância entre pontos próximos será pequena devido à correlação entre eles (Krüger, 2005).

O variograma para o Latossolo (Figura 29) mostra que as chuvas T0 e T3 apresentam dependência espacial entre os pontos observados. Desta forma, os pontos próximos entre si são semelhantes e à medida que a aumenta a distância, aumenta a heterogeneidade entre as medidas. Esta maior heterogeneidade entre as medições indica que o solo está com rugosidade elevada e bastante heterogênea.

Para as chuvas T5 e T10 a dependência espacial é menor, indicando que as medidas são mais homogêneas, ou seja, mais parecidas e com reduzida variabilidade entre elas.

Figura 29 – Semivariogramas representativos da rugosidade superficial para o Latossolo

O variograma representativo da rugosidade do Argissolo (Figura 30) mostra T0 com elevada dependência espacial mostrando rugosidade heterogênea com diferenças importantes entre os pontos medidos. Para as outras chuvas a dependência espacial não ocorre indicando que as medições são parecidas para qualquer distancia, mostrando uma homogeneidade das medições com valores semelhantes de rugosidade superficial.

Figura 30 – Semivariogramas representativos das rugosidades para o Argissolo

Os variogramas para o Nitossolo (Figura 31) mostram elevada dependência espacial para T0 e pequena dependência espacial para as chuvas (T3 a T10), indicando elevada heterogeneidade entre as medições de T0 e pequena heterogeneidade para as outras chuvas. A dependência espacial elevada em T0 indica que a rugosidade superficial apresentou diferenças

importantes entre as medições, mostrando um solo mais rugoso, com pontos mais heterogêneos. As medições para as chuvas apresentaram pouca dependência espacial indicando um solo mais homogêneo, mais liso com poucas diferenças entre as medições independentemente da distância entre os pontos.

Figura 31 – Semivariogramas representativos das rugosidades para o Nitossolo

2.3.5 Micromorfologia e Análise de imagens

A análise de imagens foi realizada para as quatro coletas de chuva e os macro e mesoporos foram quantificados conforme a classificação de Bullock et al. (1985). Estes autores classificaram os mesoporos como poros que possuem diâmetro entre 50 e 500 μm e os macroporos como poros de diâmetros de 500 a 5000 μm . As Figuras 32 a 34 apresentam os resultados da quantificação da porosidade para cada chuva. As imagens do bloco impregnado mostram a evolução do encrostamento de acordo com a ocorrência das chuvas.

O Latossolo apresentou porosidade total e número de poros elevados para T0 com a presença de poucos poros complexos ocupando uma grande área indicando elevada conectividade entre os poros presentes. Após a ocorrência de três eventos chuvosos (T3) percebe-se poucas alterações na porosidade total e quantidade de poros, porém pode-se notar a perda de poros alongados pequenos (20-50 μm). Para T5 e T10 poucas mudanças são observadas com a perda de alguns poros complexos e alongados. As alterações na porosidade total não apresentaram diferença estatística significativa entre as chuvas (Tabela 5).

As imagens tiradas dos blocos impregnados iluminados com luz ultravioleta (Figura 32) mostram que a quantidade de agregados presentes no solo é rapidamente reduzida com a

ocorrência das chuvas e evidenciam a formação de uma camada superficial encrostada composta por material selecionado e aparentemente mais fino que o material abaixo dessa camada.

Apesar da perda de poros complexos e alongados não influenciar a porosidade total ela indica uma degradação das propriedades do solo mostrando perda da conectividade entre os poros, o que pode, em longo prazo prejudicar a condutividade hidráulica e a retenção de água para as plantas.

A estabilidade dos agregados influencia diretamente a erodibilidade dos solos e é influenciada diretamente pelos teores de argila e matéria orgânica (Le Bissonnais, 1996; Zobeck e Onstad, 1987). Quanto maiores as quantidades de argila e matéria orgânica no solo maior seria a estabilidade dos agregados formados e, portanto, menor a quebra desses agregados. Sendo assim, a pequena quantidade de argila presente no Latossolo facilitaria a pulverização do solo e a mobilização e reorganização das partículas durante as chuvas. A energia cinética das chuvas atua no solo reorganizando os grãos de quartzo e modificando sua porosidade. Como a porosidade no Latossolo é representada basicamente pela porosidade intergrãos, ela sofre modificações entre as chuvas, porém sem alterar o tamanho das partículas e, portanto sem alterações significativas na porosidade total.

Tabela 5 - Análise da porosidade para o Latossolo

----- Solo -----		
Tratamentos	Latossolo	
Chuvas	-- % --	
0	60.44	a
3	42.75	a
5	43.52	a
10	50.16	a

Médias seguidas de letras minúsculas diferentes, dentro de cada coluna, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Figura 32 - Distribuição do número de poros e porosidade total em classe de diâmetro de poros para o Latossolo Vermelho-Amarelo. NTP = número total de poros e PT = porosidade total

O Argissolo apresentou porosidade total elevada em T0 com a presença de poucos poros complexos ocupando grande área (Figura 33) indicando elevada conectividade entre os poros

presentes. Poucas alterações foram observadas para a porosidade total e número total de poros para T3, porém foi percebida uma redução no número de poros complexos e um aumento nos poros alongados. Após a ocorrência de cinco chuvas (T5) há aumento na porosidade total e redução no número de poros com perda de poros complexos e alongados. Para T10 a porosidade total diminuiu e o número total de poros aumentou com ganho de poros complexos e alongados.

Apesar de não haver diferença estatística para a porosidade total entre as chuvas (Tabela 6) é possível perceber modificações no tipo, tamanho e quantidade de poros presentes. Assim como o Latossolo o Argissolo é susceptível às mobilizações causadas pelas gotas de chuva devido às pequenas quantidades de argila no perfil. A porosidade total é representada por poros intergranulares pouco modificados pela ocorrência de chuvas, porém a quantidade e tipo de poros são alterados a cada evento chuvoso pela acomodação do material do solo.

As imagens tiradas dos blocos iluminados com luz ultravioleta (Figura 33) mostram o adensamento do material do solo e perda de agregados com a ocorrência das chuvas além da formação de uma camada superficial evidenciando a deposição de um material bem selecionado e aparentemente mais fino que o material na camada abaixo.

Tabela 6 - Análise da porosidade para o Argissolo

----- Solo -----		
Tratamentos	Argissolo	
Chuvas	-- % --	
0	45.06	a
3	51.87	a
5	55.26	a
10	58.6	a

Médias seguidas de letras minúsculas diferentes, dentro de cada coluna, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Figura 33 - Distribuição do número de poros e porosidade total em classe de diâmetro de poros para o Argissolo Vermelho-Amarelo. NTP = número total de poros e PT = porosidade total

O Nitossolo apresentou as maiores reduções na porosidade com a ocorrência das chuvas (Figura 34), porém também não apresentou diferença estatística para a porosidade total entre as chuvas (Tabela 7). Seguindo o mesmo comportamento dos dois solos anteriormente analisados, o

Nitossolo também apresenta uma elevada área ocupada por poros ($> 30\%$). Mas, este solo, quando comparado com o Latossolo e o Argissolo, apresenta um comportamento mais homogêneo a medida que transcorrem as chuvas. A área ocupada por poros decresceu com o acúmulo de eventos chuvosos, com exceção de T10. A principal explicação para este decréscimo é a redução da área dos poros complexos e um pequeno incremento dos poros arredondados e alongados. Esta diminuição da área ocupada pelos poros complexos se traduz em um aumento no número destes poros e também no aumento do número de poros alongados. Este aumento no número de poros alongados se traduz em uma maior fissuração do material encrostado, como pode ser observado nas imagens das Figuras 27 e 28, sugerindo que processos de expansão e contração estejam modificando a estrutura das crostas formadas. Uma explicação para o aumento dos poros complexos na chuva T10 é o incremento da quantidade de poros alongados (fissuras) que podem se coalescer transformando-se em poros complexos (sem formato definido) que podem desestruturar a crosta previamente formada.

Apesar de ser um solo que geneticamente apresenta uma maior estabilidade estrutural, podemos supor que as maiores modificações na porosidade total são devido as maiores concentrações de argila no perfil. Os maiores teores de argila podem causar alterações na porosidade tanto pelo entupimento dos poros pelo transporte e deposição do material fino quanto pela compressão do material causado pela pressão exercida pelas gotas de chuva sobre a superfície do solo. Mas este material que durante alguns ciclos de chuva sofre encrostamento na sua superfície pode, em função de ciclos de umectação e dessecação do solo, sofrer uma fissuração intensa revertendo o adensamento provocado pelo processo de encrostamento.

Tabela 7 - Análise da porosidade para o Nitossolo

----- Solo -----		
Tratamentos	Nitossolo	
Chuvas	-- % --	
0	41.14	a
3	40.68	a
5	28.31	a
10	35.70	a

Médias seguidas de letras minúsculas diferentes, dentro de cada coluna, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Arr.
 Along.
 Compl.

Figura 34 - Distribuição do número de poros e porosidade total em classe de diâmetro de poros para o Nitossolo Vermelho. NTP = número total de poros e PT = porosidade total

2.3.6 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica indica a capacidade com que a água é conduzida pelo espaço poroso de um solo. A classificação dos solos em relação à capacidade do solo em conduzir água foi realizada por Reynolds e Elrick (1986) que definem valores na ordem de 10^{-5} m.s^{-1} para meios porosos de elevada permeabilidade e valores de 10^{-6} m.s^{-1} para meios de permeabilidade intermediária.

O monitoramento da condutividade hidráulica para o Latossolo pode ser observado na Figura 35. Observa-se que o Latossolo apresenta permeabilidade elevada durante toda a condução do experimento e pequena variabilidade entre as medições, sem diferenças estatísticas significativas. A maior condutividade hidráulica observada foi em T0 já que o solo de textura média estava recém-preparado, bastante solto sem apresentar impedimentos à drenagem de água. O rearranjo da porosidade para T3, T5 e T10 (Figura 32) faz com que a condutividade hidráulica deste solo seja um pouco menor que T0 devido a uma perda pequena de porosidade efetiva de drenagem.

Apesar da tendência de redução na condutividade hidráulica com a ocorrência de chuvas devemos ressaltar que as diferenças não foram significativas e que a condutividade permanece elevada para todas as medições, indicando que, ao contrário das observações feitas por Valentin e Bresson, 1992, Fox, 2004, Brandão 2006, entre outros a formação de crostas não interfere na condutividade hidráulica do Latossolo estudado. As modificações na porosidade e condutividade pela formação de crostas podem não ser responsáveis pela aceleração da formação de enxurrada, mas sim a ocorrência de chuvas de alta intensidade que superariam a capacidade de infiltração de água neste solo e causariam o acúmulo de água em superfície. A perda de rugosidade observada para o Latossolo (Figura 20) seria responsável pela redução da capacidade de armazenamento de água na superfície e, portanto, favorecimento do escoamento superficial, formando enxurrada e conseqüentemente aumentando a erosão.

Figura 35 - Condutividade hidráulica do Latossolo em 2009

A condutividade hidráulica para o Argissolo (Figura 36) é considerada elevada com valores da ordem de 10^{-5} m.s^{-1} e não apresenta diferença estatística entre as chuvas. Entretanto, observa-se que a condutividade hidráulica no decorrer das chuvas apresenta uma pequena diferença com os maiores valores de condutividade observados para T0, já que o solo de textura média estava recém preparado, bastante solto e sem apresentar impedimentos para a condutividade hidráulica.

As medições realizadas em T3, T5 e T10 apresentam valores menores que para T0 apesar da pequena modificação observada para a porosidade total (Figura 33), o que pode ser explicado pela reorganização do material do solo com a ocorrência das chuvas causando uma perda na porosidade efetiva de drenagem.

As diferenças observadas na condutividade são pequenas e a condutividade permanece elevada durante todo o período analisado, indicando que a redução da condutividade hidráulica para o Argissolo estaria mais relacionada ao rearranjo da porosidade que ocorre durante a formação de crostas. Assim como para o Latossolo, a formação de escoamento superficial no Argissolo parece estar mais relacionada às chuvas de elevada intensidade e perda da rugosidade superficial que à redução de condutividade hidráulica pelas crostas.

Figura 36 - Condutividade hidráulica do Argissolo em 2009

As maiores modificações na condutividade hidráulica foram observadas para o Nitossolo (Figura 37) que, apesar de apresentar alta variabilidade entre as medições, estas não apresentaram diferença estatística entre as chuvas.

Os valores medidos para T0 foram bastante superiores aos valores medidos para as chuvas, superiores inclusive aos valores medidos para os outros solos, apesar do Nitossolo ser bastante argiloso com cerca de 50% de argila. Grandes quantidades de argila dispersa em um solo podem ser prejudiciais à condutividade, uma vez que são partículas de tamanho reduzido, hidrofílicas e com menor espaço intergrãos. Entretanto, quando esse material fino se arranja sob a forma de agregados a porosidade e permeabilidade deste solo se torna maior, devido à formação de espaços entre os agregados que auxiliam na drenagem aumentando a condutividade hidráulica do solo. Agregados com elevadas quantidades de argila são estáveis e levam mais tempo para sofrer alterações que os agregados formados em solos de textura média (Le Bissonnais, 1996).

No Nitossolo, as chuvas causam mudanças na área total ocupada por poros, no número total de poros (Figura 34), e no tamanho e tipo de poros causando alterações na condutividade hidráulica do solo. Em função das chuvas, a superfície deste solo passa de ser um meio de permeabilidade elevada e passa para um meio de permeabilidade intermediária (Reynolds e Elrick, 1986).

Apesar das diferenças na condutividade hidráulica para o Nitossolo não serem significativas estatisticamente elas mostram uma grande redução com a ocorrência das chuvas fazendo com que a condutividade em T3, T5 e T10 sejam bastante inferiores às medidas em T0.

Figura 37 - Condutividade hidráulica do Nitossolo em 2009

2.3.7 Curva de retenção

As curvas de retenção de água para o Latossolo (Figura 38) não apresentaram grande variabilidade entre as medições e sua forma em todas as chuvas não foi modificada pela formação da crosta. As curvas não mostraram mudanças significativas na distribuição dos poros e nos padrões de retenção de água. Este comportamento da retenção de água no solo no decorrer das chuvas é função da morfologia e distribuição dos poros descrita acima pela análise de imagens. A dominância de poros complexos na distribuição de poros deste solo explica o comportamento da curva de retenção no decorrer das chuvas. Da mesma forma que no caso da condutividade hidráulica, a formação de crostas não interfere nos padrões de retenção de água deste solo.

Figura 38 - Curva de retenção para o Latossolo em 2009

O Argissolo não apresentou diferenças significativas entre as medidas para a curva de retenção de água (Figura 39). O comportamento observado nas curvas de retenção é de um solo bem drenado com uma macroporosidade bem desenvolvida que no decorrer das chuvas não sofre alteração das suas características. Como no caso do Latossolo, não foram observadas modificações nos padrões de retenção de água neste solo provocadas pela formação da crosta. O observado no estudo da morfologia dos poros explica a forma das curvas de retenção à medida que os eventos de chuva se sucederam.

Figura 39 – Curva de retenção para o Argissolo em 2009

As curvas de retenção para o Nitossolo apresentaram maior variabilidade que as curvas para os outros solos estudados. Coincidindo com o comportamento da morfologia dos poros após dez eventos chuvosos erosivos, as curvas de retenção também apresentaram mudanças à medida que as chuvas se sucederam. As curvas mostraram um aumento na retenção de água em todos os potenciais medidos entre o T0 e T10. A evolução da morfologia dos poros entre T0 e T10 para este solo, mostrou uma diminuição de poros complexos entre T0 e T5 com um aumento em T10. Ao mesmo tempo maior quantidade de poros alongados e arredondados se formaram. O incremento na retenção de água, principalmente nos potenciais entre pF 1,5 e 3, é reflexo dessa modificação na morfologia dos poros. A transformação de poros de condução (complexos e alongados grandes) em poros de retenção (arredondados e alongados médios e pequenos) explicaria esta maior retenção nesses potenciais. Por outro lado, o aumento da quantidade de poros alongados e a provável coalescência destes formando poros complexos após T10 provocou o aumento de retenção nos potenciais mais baixos (saturação até pF1), mas de magnitude inferior ao aumento observado nos potenciais acima de pF 1,5.

Figura 40 - Curva de retenção para o Nitossolo em 2009

2.4 Discussão geral

O Latossolo apresentou textura média com cerca de 70% de areia e 20% de argila em sua composição (Tabela 3). O reduzido teor de argila e matéria orgânica (Tabela 4) pode ter sido responsável pela menor estabilidade dos agregados presentes no solo (Le Bissonnais, 1996)

fazendo com que o preparo tivesse grande poder de desagregação deixando o solo bastante pulverizado, com partículas soltas e disponíveis para o transporte.

O impacto das gotas de chuva sobre o solo é responsável pela mobilização e rearranjo de seu material a cada evento chuvoso ocorrido, sem alterar a porosidade total, o que resulta numa pequena alteração no comportamento hídrico deste solo, com poucas modificações na condutividade hidráulica e na curva de retenção de água.

Ao contrário das observações encontradas na bibliografia (Valentin e Bresson 1992, Fox et al., 2004; Brandão et al., 2006 entre outros) a formação da crosta superficial não reduziu a condutividade hidráulica para o Latossolo, provavelmente devido às grandes quantidades de areia que mantém a porosidade relativamente estável e, portanto a circulação de água pouco alterada.

As constatações de reduzidas alterações na porosidade e condutividade hidráulica do Latossolo indicam que o aumento do escoamento superficial pode estar mais relacionado à perda da rugosidade superficial do que à redução da condutividade hidráulica pela formação de crostas. A rugosidade superficial é um importante fator de atraso no início da enxurrada já que as microdepressões no solo atuam como locais de retenção temporária de água e sedimentos (Cogo, 1983, Zoebeck e Onstad, 1987 e Kamphorst, et al., 2000). A perda dessa rugosidade afetaria substancialmente o tempo de formação do fluxo superficial e a quantidade e velocidade da enxurrada, já que o escoamento teria início tão logo a intensidade da chuva supere a capacidade de infiltração de água no solo.

Assim como para o Latossolo o Argissolo apresentou textura média 70% de areia e 22% de argila em superfície (Tabela 3) o que favoreceu sua pulverização pelo preparo liberando partículas susceptíveis ao transporte e conferindo a este solo elevada porosidade e condutividade hidráulica.

O impacto das gotas de chuva sobre o Argissolo causou o rearranjo do material do solo modificando o arranjo da porosidade sem, no entanto modificar a morfologia desses poros. Alterações na porosidade total e no número de poros não foram significativas, e não provocaram alterações na condutividade hidráulica e na curva de retenção para o Argissolo.

As reduzidas alterações na porosidade e condutividade hidráulica para o Argissolo indicam que a formação de crostas não deveria ser responsabilizada pela formação de enxurrada para este solo, uma vez que a formação da crosta não causou redução na condutividade hidráulica. A formação da enxurrada estaria mais relacionada à perda da rugosidade superficial,

reduzindo os locais de retenção de água e sedimentos iniciando a enxurrada tão logo a intensidade de chuva supere a capacidade de infiltração do solo.

O Nitossolo utilizado era bastante diferente dos outros dois solos com cerca de 50% de argila em superfície, o que poderia representar um fator que afeta negativamente a condutividade hidráulica devido ao menor tamanho das argilas e conseqüente menor espaço entre as partículas. Entretanto, quando as argilas estão arrançadas de maneira ordenada formam agregados relativamente estáveis, favorecendo a formação de macroporos e conseqüentemente a condutividade hidráulica (Brandão et al., 2007; Fox et al., 2009).

A estruturação do Nitossolo ficou evidente através da formação de agregados que não foram destruídos pelo preparo (Figura 27) e conferiram a este solo uma condutividade hidráulica bastante elevada mesmo ao compararmos com a condutividade dos solos anteriores (Figura 37).

A elevada concentração de argila também foi responsável pelas maiores alterações observadas na porosidade do Nitossolo, uma vez que ela torna o solo mais plástico, permitindo que ele seja comprimido e compactado ao sofrer impacto da gota de chuva. A porosidade foi bastante reduzida já nas primeiras chuvas e persistiu até a quinta chuva. Para a décima chuva a porosidade total aumentou, provavelmente devido a formação de porosidade fissural observada na superfície (Figura 28) devido à contração e expansão da argila. Estes poros fissurais podem se coalescer se o processo de contração e expansão for intenso passando a funcionar como poros complexos. Apesar das modificações mais expressivas para o Nitossolo a porosidade total não apresentou diferença estatística entre as chuvas.

A formação de crosta evidenciada nas fotos de campo (Figura 28) não apresentou impedimento para a condutividade hidráulica do solo. Apesar da transformação da condutividade do Nitossolo de elevada em T0 para intermediária após as chuvas (T3, T5 e T10) essa redução não apresentou diferença significativa indicando que a crosta não é um fator crítico na aceleração da formação da enxurrada. As alterações na porosidade também foram responsáveis pelo aumento da retenção de água para o Nitossolo conforme as chuvas ocorreram.

De maneira geral podemos dizer que as crostas formadas para os solos analisados não foram suficientes para reduzir a capacidade de infiltração e condução de água nestes solos e, portanto, podem não ser um fator de aumento do escoamento superficial e erosão para as condições analisadas. A eventual formação de escoamento superficial poderia estar mais relacionada à redução da rugosidade superficial do solo que ocorre desde os primeiros eventos

chuvosos e pode tornar a superfície do solo bastante alisada diminuindo a capacidade de armazenamento de água em superfície.

O alisamento da superfície dos solos pode ocasionar uma redução no tempo de formação de enxurrada fazendo com que ela se forme tão logo a intensidade de chuva ultrapasse a capacidade de infiltração do solo. A água não infiltrada não será retida pelo microrrelevo agora alisado formando imediatamente a enxurrada, principalmente em áreas com declividade acentuada, aumentando significativamente as taxas de erosão.

Conclusões mais expressivas poderiam ser tiradas com um tempo maior de coleta de dados com maior exposição dos solos aos impactos das chuvas. A condução deste tipo de experimento parece ser facilitada com a utilização de simuladores de chuva que permitem aplicar exatamente a mesma intensidade de chuva para todos os solos e permitem o controle de tempo e quantidade de chuva, controlando melhor as variações causadas e mensurando as alterações com maior precisão.

3 CONCLUSÕES

1. Há formação de crosta superficial para os três solos analisados.
2. Nos solos com texturas mais arenosas, as crostas não causaram modificações significativas na porosidade total dos solos e na morfologia dos poros.
3. Nos solos com textura argilosa a formação de crosta afetou a morfologia e distribuição dos poros.
4. As crostas não alteraram de maneira significativa as taxas de condutividade hidráulica dos solos e os padrões de retenção de água.
5. O solo argiloso sofreu mais modificações com o impacto das gotas de chuva que os solos de textura média.
6. As chuvas reduziram a rugosidade superficial dos solos independentemente do teor de argila presente.
7. A eventual formação de enxurrada nos solos tropicais de textura média e argilosos não parece estar relacionada à redução da condutividade hidráulica da superfície do solo, mas sim à perda da rugosidade superficial.

REFERÊNCIAS

- ALLMARAS, R.R.; BURWELL, R.E.; LARSON, W.E.; HOLT, R.F.; NELSON, W.W. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. **Conservation Research Report**, Washington, v. 7, p. 22, 1966.
- ANKENY, M.D.; AHMED, M.; KASPAR, T.C.; HORTON, R. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, p.467-470, 1991.
- ARNDT, W. The nature of the mechanical impedance to seedlings by soil surface seals. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.3, p.45-54, 1965.
- ARVIDSSON, J. ;BÖLENIUS, E. Effects of soil water content during primary tillage – laser measurements of soil surface changes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.90, p.222-229, 2006.
- ASSOULINE, S. Rainfall-induced soil surface sealing: a critical review of observations, conceptual models, and solutions. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.3, p.570-591, 2004.
- AUZET, A.V.; BOIFFIN, J.; PAPY, F.; LUDWIG, B.; MAUCORPS, J. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the north os France. **Catena**, Amsterdam, v.19, p.1-22, 1992.
- AUZET, A.V.; BOIFFIN,J.; LUDWIG, B. Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.20, p.759-767, 1995.
- AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.76, p.143-152, 1996.
- BAJRACHARYA, R.M.; LAL, R. Land use effects on soil crusting and hydraulic response of surface crusts on a tropical Alfisol. **Hydrological Processes**, Chichester, v.13, p.59-72, 1999.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Icone, 2005. 355 p.
- BOIFFIN, J.; MONNIER, G. Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. Assessment of soil surface sealing and crusting. **Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation**, Ghent, p. 210-217, 1986.
- BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D.; RUIZ, H.A.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MARTINEZ, M.A.; SILVA, E.O. Perdas de solo e caracterização física e micromorfológica de crostas formadas em solos sob chuva simulada. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n.1, p. 129-138, 2007.

BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D.; RUIZ, H.A.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MARTINEZ, M.A.; MENEZES, S.J.M.C. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.13-21, 2006.

BRESSON, L.M.; BOIFFIN, J. Morphological characterization of crust development stages on an experimental field. **Geoderma**, Amsterdam, v. 47, p. 301-325, 1990.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Wolverhampton: Waine Research Publications, 1985. 152p.

CAMARGO, O.A de; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: IAC, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).

CASENAVE, A.; VALENTIN, C. **Les états de surface de la zone sahélienne**: influence sur l'infiltration. Paris: l'ORSTOM, 1989. 229 p.

CASENAVE, A.; VALENTIN, C. Runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 130, p. 231-249, 1992.

CASTRO, S.S.; COOPER, M.; SANTOS, M.C.; VIDAL-TORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 107-164, 2003.

CASTRO, L.G.; COGO, N.P.; VOLK, L.B.S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 339-352, 2006.

CRESSIE, N.A.C.; HORTON, R. A robust-resistant spatial analysis of soil water infiltration. **Water Resources Research**, Washington, v. 23, p. 911-917, 1987.

COGO, N.P., MOLDENHAUER, W.C. FOSTER, G.R. Effect of crop residue, tillage induced roughness, and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 1005-1008, 1983.

COOPER, M.; VIDAL TORRADO, P.; CHAPLOT, V. Origin of microaggregates in soils with ferralic horizons. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 256-263, 2005.

DARBOUX, F.; DAVY, P.; GASCUEL-ODOUX, C.; HUANG, C. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments. **Catena**, Amsterdam, v. 46, p. 125-139, 2001.

DEXTER, A.R. Effect os rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. **Journal of Terramechanics**, London, v. 14, p. 11-22, 1977.

- DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, p. 191-192, 2000.
- DULEY, F.L. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v.4, p.60-64, 1939.
- EDWARDS, W.M.; LARSON, W.E. Infiltration of water into soils as influenced by surface seal development. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Michigan, v. 12, p. 463 – 465, 1969.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- EVANS, D.D.; BUOL, S.W. Micromorphological study of soil crusts. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 32, p. 19-22, 1968.
- FOX, D.M.; LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. The effect of ponding depth on infiltration in a crusted surface depression. **Catena**, Amsterdam, v. 32, p. 87-100, 1998.
- FOX, D.M.; BRYAN, R.B.; FOX, C.A. Changes in pore characteristics with depth for structural crusts. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.109-120, 2004.
- GHILBERTO, P.J. **Metodologias para obtenção de parâmetros utilizados em modelos de infiltração da água no solo**. 1999. 79 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.
- HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York: Academic Press, 1980. p. 413.
- HUANG, C.; BRADFORD, J.M.; CUSHMAN, J.H. A numerical study of raindrop impact phenomena: the elastic deformation case. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 855-861, 1983.
- JONES, R.J.A. Assessing the vulnerability of soils to degradation. In: PAGLIAI, M.; JONES, R.J.A. (Ed.). **Sustainable land management – environmental protection: a soil physical approach**. **Catena**, Verlag, v. 35, p. 33-44, 2002.
- JUHÁSZ, C.E.P.; COOPER, M.; CURSI, P.R.; KETZER, A.O.; TOMA, R.S. Savanna woodland soil micromorphology related to water retention. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, n.4, p.344-354, 2007.
- KAMPHORST E.C.; JETTEN, V.; GUÉRIF, J.; PITKÄNEN, B.V.I.; DOUGLAS, J.T.; PAZ, A. Predicting depressional storage from soil surface roughness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1749-1758, 2000.

KRÜGER, C.M. Análise geoestatística de dados meteorológicos do estado do Paraná utilizando um software livre. **Da Vinci**, Curitiba, v. 2, n.1, p.87-104, 2005.

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soils crustability and erodibility: I. Theory and methodology. **European Journal of Soil Science**, cidade, v. 47, p. 425-437, 1996.

LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. Crust micromorphology and runoff generation on silty soil materials during different seasons. In: POESEN, J.W.A.; NEARING, M.A. (Ed.) **Soil surface sealing and crusting**. Cremlingen-Destedt: Catena-Verlag, 1993. p.1-16. (Catena Supplement, 24).

LE BISSONNAIS, Y.; BENKHADRA, H.; CHAPLOT, V. FOX, D.; KING, D.; DAROUSSIN, J. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, p. 69-80, 1998.

LE BISSONNAIS, Y.; CERDAN, O.; LECOMTE, V.; BENKHADRA, H.; SOUCHÈRE, V.; MARTIN, P. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. **Catena**, Amsterdam, v. 62, p. 111-124, 2005.

LOGSDON, S.D.; JAYNES, D. B. Spatial variability of hydraulic conductivity in a cultivated field at different times. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.703-709, 1996.

McINTYRE, D.C. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. **Soil Science**, Baltimore, v.85, n.5, p.185-189, 1958.

MENTEN, G.H.; NEARING, M.A.; BORGES, A.L.O. Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills. **Soil Science Society of America Journal**, Madison v.65, p. 861-868, 2001.

MERMUT, A.R.; LUK, S.H.; RÖMKENS, M.J.M.; POESEN J.W.A. Micromorphological and mineralogical components of surface sealing in loess soils from different geographic regions. **Geoderma**, Amsterdam, v.66, p.71-84, 1995.

MORGAN, R.P.C. **Erosión y conservación del suelo**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1997. 343 p.

MURPHY, C.P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Berkhamsted: A.B. Academic Publ., 1986. 149p.

MURPHY, C.P.; BULLOCK, P.; TURNER, R.H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.28, p.498-508, 1977.

NEARING, M.A.; PARKER, S.C. Detachment of soil by flowing water under turbulent and laminar conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1612–1614, 1994.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. The pore system as an indicator of soil quality. In: PAGLIAI, M.; JONES, R.J.A. (Ed.). **Sustainable land management – environmental protection: a soil physical approach**. Reiskirchen: Catena Verlag, 2002. p.71-82. (Advances in GeoEcology, 35)

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. **Soil Tillage Research**, Amsterdam v.73, p. 119-129, 2003.

PERROUX, K.M.; WHITE, I. Designs for disk permeameters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, n. 5, p. 1205-1215, 1988.

PRUSKI, F.F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: UFV, 2006. p. 240.

RAIJ, B.Van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.A. **Análise de solos para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 165p.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship. **Ground Water Monitoring & Remediation**, Westerville, v. 6, p. 84-95, 1986.

RINGROSE-VOASE, A.J. Micromorphology of soil structure: description, quantification, application. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.29, p.777-813, 1991.

RINGROSE-VOASE, A.J.; BULLOCK, P. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, p. 673-684, 1984.

SPAROVEK, G. Erosão do solo e a produtividade das culturas. In: SOIL SCIENCE LATIN-AMERICAN CONGRESS, 13., 1996. Águas de Lindóia. **Abstracts**. Campinas: Software Gráfico, 1996.

TSEGAYE, T.; HILL, R.L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurements. **Soil Science**, Baltimore, v.163, p.155-165, 1998.

VALENTIN, C.; BRESSON, L.M. Soil crusting. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C.; STEWART, B.A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p.89-107. (Advances in Soil Science)

VALENTIN, C.; BRESSON, L.M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam. v. 55. p. 225-245, 1992.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VIDAL-VÁZQUEZ, E.; VIVAS MIRANDA, J.G., PAZ GÓNZALES, A. Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models. **Ecological Modelling, Maryland Road**, v.182, p. 337-353. 2005.

WOODING, R.A. Steady infiltration from a shallow circular pond. **Water Resources Research**, Washington, v. 4, p. 1259-1273, 1968.

ZOBECK, T.M.; ONSTAD, C.A. Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 9, p. 1-20, 1987.

ANEXOS

Condutividade hidráulica para o Latossolo

----- Solo -----			
Tratamentos		Latossolo	
chuvas	K (m.s ⁻¹)		
	-1		
0	1.63E-04	a	
3	3.11E-04	a	
5	8.68E-04	a	
10	9.34E-05	a	
-3,5			
0	2.75E-04	a	
3	1.36E-04	a	
5	7.40E-05	a	
10	4.84E-05	a	
-10,0			
0	3.91E-05	a	
3	3.05E-04	a	
5	1.31E-04	a	
10	2.72E-05	a	

Médias seguidas de letras minúsculas diferentes, dentro de cada coluna, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Conductividade hidráulica para o Argissolo

----- Solo -----		
Tratamentos	Argissolo	
chuvas	K (m.s ⁻¹)	
	-1	
0	1.55E-04	a
3	9.69E-05	a
5	7.84E-04	a
10	1.28E-04	a
-3,5		
0	6.98E-05	a
3	3.48E-04	a
5	3.48E-04	a
10	7.88E-05	a
-10,0		
0	2.65E-05	a
3	2.81E-04	a
5	2.81E-04	a
10	3.54E-05	a

Médias seguidas de letras minúsculas diferentes, dentro de cada coluna, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Condutividade hidráulica para o Nitossolo

----- Solo -----			
Tratamentos		Nitossolo	
chuvas	K (m.s ⁻¹)		
	-1		
0	8.92E-04	a	
3	1.55E-04	a	
5	5.78E-04	a	
10	1.97E-04	a	
-3,5			
0	3.77E-04	a	
3	2.74E-05	a	
5	3.53E-04	a	
10	9.78E-05	a	
-10,0			
0	1.33E-04	a	
3	1.52E-05	a	
5	1.16E-03	a	
10	3.30E-05	a	

Médias seguidas de letras minúsculas diferentes, dentro de cada coluna, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)