**ERODIBILIDADE INTER E INTRA-SULCOS
DUM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO
TEXTURA ARGILOSA DA REGIÃO DE
JABOTICABAL - SP**

MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Vicente de Paula Pereira

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Março - 1994

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCLQ/USP

Martins Filho, Marcílio Vieira
M386a Erodibilidade inter e intra-sulcos dum latossolo
vermelho-escuro textura argilosa da região de Jaboti
cabal - SP. Piracicaba, 1994.
143p.

Diss.(Mestre) ESALQ
Bibliografia.

1. Latossolo vermelho-escuro - Erodibilidade - Jaboti-
cabal I. Escola Superior de Agricultura Luiz de
Queiroz, Piracicaba

CDD 631.45

**ERODIBILIDADE INTER E INTRA-SULCOS
DUM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO
TEXTURA ARGILOSA DA REGIÃO DE
JABOTICABAL - SP**

MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO

Aprovada em:

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Vicente de Paula Pereira

FCAV/UNESP

Prof. Dr. Octávio Freire

IPEA/UNESP

Prof. Dr. Francisco Lombardi Neto

IAC

Prof. Dr. VICENTE DE PAULA PEREIRA

Orientador

A DEUS,

Aos meus pais

MARIA APARECIDA E MARCÍLIO

e à minha irmã

SILVIA

DEDICO

à ALESSANDRA,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Vicente de Paula Pereira pela orientação.
- Aos membros da Banca Examinadora pelas sugestões oferecidas.
- A CAPES - Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa concedida.
- A FUNDUNESP - Fundação para o Desenvolvimento da UNESP, pelo suporte financeiro.
- Ao senhor Mitio Nobukuni, funcionário do Departamento de Solo e Adubos a serviço da disciplina de Conservação do Solo, pela cooperação nos trabalhos de campo e laboratório, e também por ser meu amigo.
- Aos demais funcionários do Departamento de Solos e Adubos.
- Ao Departamento de Serviço Autônomo de Água e Esgoto da Prefeitura Municipal de Jaboticabal - SP, pela cooperação e apoio para a realização dos trabalhos de campo.
- Aos acadêmicos Moysés, Rui, Emílio e Sérgio do curso de Agronomia da FCAVJ / UNESP, pela cooperação nos trabalhos de campo.
- À Eng^o Agr^o Cynthia Maria Ericsson e à Zootecnista Selma Maria Grossi pela ajuda nos trabalhos de campo.
- Ao meu amigo José Marques Júnior pela amizade, colaboração na identificação e classificação do solo, sugestões e

respeito para comigo.

- Ao meu amigo José Eduardo Corá pelo companheirismo e apoio nestes últimos cinco anos.

- À prestimosa amiga Maria Auxiliadora.

- À Alessandra Alves pela digitação da Revisão Bibliográfica.

- Aos meus ex-orientados, Engº Agrº Wander Capellozza Varga, Marcelo Vital e Hederson César Hiroji Yoshi pela confiança em mim depositada e pelo que me ensinaram, quando de suas passagens como acadêmicos da FCAV/UNESP, o meu muito obrigado.

- Aos meus amigos William Natale e Marisa dos Anjos de Faria Natale pelo incentivo, apoio e colaboração na revisão do texto deste trabalho.

- Ao Daniel Barbosa e ao Robson, meus amigos, pela ajuda nos trabalhos de campo.

- À Alessandra Rodrigues Vieira Martins, minha esposa, pelo amor, incentivo, apoio, dedicação, zelo e colaboração em todas as etapas da realização de um dos muitos de meus sonhos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE QUADROS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xvii
RESUMO	xx
SUMMARY	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1. Considerações gerais	6
2.2. Contribuições para o entendimento do parâmetro erodibilidade intersulcos (K_i).....	9
2.3. Modelagem do processo de erosão intersulcos	20
2.4. Contribuições para o entendimento do parâmetro erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos (K_r)	25
2.5. Modelagem do processo de erosão intra-sulcos ou em sulcos	39
3. MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1. Área experimental (A)	43
3.2. Solo	44
3.3. Simulador de chuvas	44
3.4. Procedimentos analíticos preliminares	45
3.4.1. Análises químicas	45

3.4.2. Análises granulométricas	46
3.5. Procedimentos de campo	46
3.5.1. Instalação das parcelas	46
3.5.2. Compactação	50
3.5.2.1. Resistência à penetração (RP)	50
3.5.2.2. Avaliação da umidade	51
3.5.2.3. Macroporosidade (Ma), micro- porosidade (Mi), volume de poros totais (VTP) e densi- dade (ds)	52
3.5.3. Avaliação da erodibilidade intersul- cos (Ki)	53
3.5.4. Avaliação da erodibilidade intra-sul- cos ou em sulcos (Kr)	54
3.5.4.1. Simulações de chuvas	54
3.5.4.2. Simulações de chuvas com flu- xos de água adicionais	55
3.5.4.3. Avaliação do cisalhamento hi- dráulico	56
3.5.4.4. Velocidades de escoamento su- perficial nos sulcos	58
3.6. Procedimentos de laboratório	59
3.6.1. Análises físicas do solo	59
3.6.1.1. Densidade real (Dr)	59
3.6.1.2. Resistência à penetração ...	59
3.6.1.3. Umidade	59

3.6.1.4. Macroporosidade (Ma), micro- porosidade (Mi) e volume de poros totais (VTP)	60
3.6.1.5. Densidade (ds)	60
3.6.2. Determinação das perdas de solo e água	60
3.7. Processamento dos dados	61
3.7.1. Cálculo das intensidades das precipi- tações produzidas pelo simulador de chuvas	61
3.7.2. Avaliações da taxa de erosão (Di) e da erodibilidade intersulcos (Ki)	62
3.7.3. Obtenção das áreas (a), perímetros mo- lhados (Pm), raios hidráulicos (rh) e cisalhamentos hidráulicos (T) das sec- ções transversais dos sulcos	63
3.7.4. Sedimento destacado das áreas inter- sulcos dos sulcos (E)	65
3.7.5. Avaliação da taxa de erosão intra-sul- cos ou em sulcos (Dr)	66
3.7.6. Avaliação do cisalhamento hidráulico crítico (Tc) e da erodibilidade intra- sulcos ou em sulcos (Kr)	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1. Solo	68
4.2. Umidade e resistência à penetração, em valo- res médios, antes da compactação	68

4.3. Parâmetros físicos avaliados após a compactação do solo	70
4.4. Simulações de chuva e infiltração de água .	81
4.5. Erodibilidade intersulcos (K _i)	90
4.6. Correlações entre parâmetros físicas do solo para os tratamentos INC e IC	98
4.7. Erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos (K _r)	100
4.7.1. Cisalhamento hidráulico crítico (T _c) e erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos (K _r)	104
4.8. Correlações entre parâmetros físicos do solo para os tratamentos SNC e SC	106
5. CONCLUSÕES	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
APÊNDICE	137

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Distribuição das parcelas intersulcos e em sulcos, para os tratamentos INC e IC (a) e SNC e SC (b), na área de ação do simulador de chuvas (SMC)	49
Figura 2. Umidade média do solo para a área experimental A, quando da avaliação da resistência à penetração	69
Figura 3. Resistência média do solo à penetração, para a área experimental A, momentos antes de se compactar o solo da sub-área A ₂ (RPAC)	70
Figura 4. Macroporosidade média do solo para os tratamentos não compactados (NC) e compactados (C)	71
Figura 5. Microporosidade média do solo para os tratamentos não compactados (NC) e compactados (C)	72
Figura 6. Volume médio de poros totais do solo para os tratamentos não compactados (NC) e com-	

pactados (C)	73
Figura 7. Densidade média do solo para os tratamentos não compactados (NC) e compactados (C) ...	74
Figura 8. Resistência média do solo à penetração, na camada de 0-60 cm de profundidade, para os tratamentos NC e C, comparativamente à RPAC	78
Figura 9. Umidade média do solo, para os tratamentos NC e C, quando das avaliações de resis- tência à penetração	79
Figura 10. Taxas de infiltração média de água no so- lo, avaliadas nos tratamentos INC (■) e IC (*)	89

LISTA DE QUADROS

Página

Quadro 1. Resistência média do solo à penetração (RP), para os tratamentos não compactados (NC) e compactados (C)	76
Quadro 2. Intensidades de chuvas para os tratamentos INC e IC e a localização de cada parcela em relação ao simulador de chuvas	83
Quadro 3. Intensidades de chuvas para os tratamentos SNC e SC e a localização de cada parcela em relação ao simulador de chuvas	84
Quadro 4. Umidade média do solo, anterior às simulações de chuvas, para os tratamentos INC e IC	86
Quadro 5. Umidade média do solo, anterior às simulações de chuvas, para os tratamentos SNC e SC	87
Quadro 6. Parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade intersulcos (Ki) e valores de	

Ki, em kg s m^{-4} , para o tratamento INC	92
Quadro 7. Parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade intersulcos (Ki) e valores de Ki, em kg s m^{-4} , para o tratamento IC	93
Quadro 8. Análise de variância para as erodibilidades intersulcos (Ki), em kg s m^{-4} , obtidas para os intersulcos não compactados (INC) e compactados (IC)	96
Quadro 9. Matriz de correlação de Pearson para os parâmetros físicos avaliados nos tratamentos INC e IC	99
Quadro 10. Fonte de produção de enxurrada e parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade intra-sulcos, para o tratamento SNC	101
Quadro 11. Fonte de produção de enxurrada e parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade intra-sulcos, para o tratamento SC	102
Quadro 12. Equações representativas das correlações estabelecidas entre Dr e T, com seus respectivos coeficientes de correlação, para os	

tratamentos SNC e SC	103
Quadro 13. Erodibilidade intra-sulcos (Kr) e cisalhamento hidráulico crítico (Tc) para os tratamentos SNC e SC	106
Quadro 14. Matriz de correlação de Pearson para os parâmetros físicos avaliadas nos tratamentos SNC e SC	107
Quadro 1A. Características químicas do perfil do solo	140
Quadro 2A. Características granulométricas do perfil do solo	140
Quadro 1B. Resistências médias do solo à penetração individualizadas para os tratamentos INC, SNC, IC e SC	141
Quadro 1C. Teste Tukey para as unidades médias avaliadas, antes das simulações de chuvas, nos tratamentos INC e IC	142
Quadro 1D. Teste Tukey para as taxas de erosões intersulcos entre lado esquerdo e direito, em relação ao centro do simulador de chu-	

vas, para os tratamentos INC e IC 143

Quadro 2D. Teste Tukey para as erodibilidades inter-
sulcos entre lado esquerdo e direito, em
relação ao centro do simulador de chuvas,
para os tratamentos INC e IC 143

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A = quantidade de perdas de solo (EUPS); área experimental;
solo franco-arenoso; posição de parcelas intersulcos;

A₁ e A₂ = sub-áreas da área experimental;

A = solo franco siltoso;

A_p = área da parcela;

a = constante; coeficiente; área de secção transversal de
um sulco;

B = solo franco-argilioso; posição de parcelas intersulcos;

B = solo com classe textural argila siltosa;

b = um expoente;

C = fator cobertura e manejo do solo (EUPS); solo franco-
arenoso; carbono orgânico; chuva; solo compactado; posição
de parcelas intersulcos;

C% = carbono orgânico;

CO = carbono orgânico;

D = solo franco; posição de parcelas intersulcos;

DCb = a 2,00 m da cabeceira dos sulcos;

Di = taxa de erosão intersulcos;

DFs = a 2,00 m do final dos sulcos;

Dr = taxa de erosão intra-sulcos ou em sulcos;

ds = densidade do solo;

E = taxa de erosão intersulcos; contribuição intersulcos
para os sulcos; posição de parcelas intersulcos;

ES = espaço entre os sulcos;

EUPS = equação universal de perdas de solo;
F = posição de parcelas intersulcos;
FEP = Fazenda de Ensino e Pesquisa;
Fi = fluxos adicionais de água (i= 1 a 3);
G = posição de parcelas intersulcos;
H = posição de parcelas intersulcos;
I = intensidade de chuva; posição de parcelas intersulcos;
IC = intersulcos compactados;
INC = intersulcos não compactados;
J = posição de parcelas intersulcos;
K = erodibilidade do solo;
Ki = erodibilidade intersulcos;
Kr = erodibilidade em sulcos;
Lr = larguras dos sulcos;
LS = fator que descreve o efeito do declive e do comprimento de rampa;
Ma = macroporosidade;
Mi = microporosidade;
M.O.% = teor de matéria orgânica;
NC = solo não compactado;
P = fator relativo às práticas conservacionistas;
Pm = perímetros molhados dos sulcos;
Q = vazão de enxurrada;
R = erosividade da chuva ;
Rh = raio hidráulico (m);
RP = resistência à penetração;

s = ângulo do declive;
S = declividade do sulco;
SC = sulcos compactados;
SDF = reservatório para o fornecimento de fluxos adicionais de água;
sen = seno de um dado ângulo;
Sf = fator declividade refletindo a limitação de transporte pelo fluxo de água superficial;
SMC = simulador de chuvas.
SNC = sulcos não compactados;
T = cisalhamento hidráulico de um fluxo de água;
Tc = cisalhamento hidráulico crítico;
v = velocidades de escoamento superficial nos sulcos;
VTP = volume de poros totais;
WEPP = "Water Erosion Prediction Project";
Wr = largura do sulco;
Yw = peso específico da água;
< = menor
> = maior
 τ_a = resistência ao cisalhamento;
 θ = ângulo do declive;

ERODIBILIDADE INTER E INTRA-SULCOS DUM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO TEXTURA ARGILOSA DA REGIÃO DE JABOTICABAL - SP

Autor: Marcílio Vieira Martins Filho

Orientador: Prof. Dr. Vicente de Paula Pereira

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é estudar as erodibilidades intersulcos (K_i) e intra-sulcos ou em sulcos (K_r) e o cisalhamento hidráulico (T_c), em condições de solo não compactado e compactado, num Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa, na fazenda de ensino e pesquisa da FCAV/UNESP, em Jaboticabal - SP.

A área experimental de 1000 m² foi subdividida em duas sub-áreas A_1 e A_2 . A sub-área A_2 foi compactada pelo tráfego intenso dum trator de pneus, onde informações de resistência à penetração e outras propriedades físicas e químicas do solo foram determinadas.

Dez parcelas de 1,50 m de largura por 0,50 m de comprimento foram utilizadas para avaliar K_i , na primeira metade de cada uma das duas sub-áreas, com o uso de simulador de chuvas. Seis sulcos pré-formados de 9,00 m de comprimento foram utilizados para a avaliação de K_r , na segunda metade de cada uma das sub-áreas, fazendo-se uso de chu-

va simulada e fluxos adicionais de água aplicados nas cabeceiras dos sulcos. Nesta fase do experimento, também o cisalhamento hidráulico foi determinado através de medidas de parâmetros hidráulicos nos sulcos.

Foi verificado que modificações em propriedades físicas do solo como densidade (d_s) e resistência à penetração (RP) afetam a erodibilidade solo. Um aumento médio de 9,23 % na d_s e de 99,60 % na RP induziram a um decréscimo em K_i . O valor de K_i nos intersulcos não compactados foi 4,6 vezes maior que nos intersulcos compactados ($0,46 \times 10^6$ vs. $0,10 \times 10^6$ kg s m⁻⁴). A erodibilidade K_r nos sulcos não compactados (SNC) foi 12 % maior que a obtida nos compactados (SC), ou seja, $7,76 \times 10^{-3}$ vs. $6,92 \times 10^{-3}$ s m⁻¹, respectivamente. Já o cisalhamento hidráulico crítico médio nos SC foi 56 % do valor obtido nos SNC ($2,48$ vs. $4,42$ N m⁻²).

As reduções em K_i e K_r , em condições compactadas, foram atribuídas às menores susceptibilidades ao destacamento pelo impacto das gotas da chuva e às forças cisalhantes, devido ao aumento da resistência do solo com a compactação, respectivamente.

As variações em K_i foram relacionadas significativamente com várias propriedades do solo. As diferenças para K_r e T_c não foram significativas, quando se comparou solo compactado com não compactado. O cisalhamento hidráulico crítico apresentou correlações significativas com algumas outras propriedades do solo. A erodibilidade em

sulcos não pôde ser explicada por qualquer uma das propriedades analisadas.

Contudo, os resultados indicam que as modificações nas propriedades físicas do solo, devido à compactação, são fatores importantes que podem contribuir para uma redução ou para um aumento na erodibilidade dos solos, Ki e Kr.

THE INTERRILL AND RILL ERODIBILITIES OF CLAY TEXTURE DARK
RED LATOSOL FROM JABOTICABAL-SP

Author: Marcílio Vieira Martins Filho

Adviser: Prof. Dr. Vicente de Paula Pereira

SUMMARY

The objective of the present work is to study the interrill (ki) and rill (kr) soil erodibilities and the hidraulic shear (T_c), under different soil compaction levels for a Darked red Latosol located in the UNESP farm near Jaboticabal, in São Paulo State, Brazil.

Ten small interrill plots, each of then measuring 1,50 x 0,50 m, for each of the soil compaction levels were established at the experimental location to evaluate Ki under rainfall simulation. Six other ridged plots on each soil compaction levels were also established to evaluate the Kr under rainfall simulations, plus a flow added in increments at the head of each rill.

It was verified that changes in the soil physical properties, such as density and soil strength affect, the soil erodibilities. The average increase in soil density from 9,23 % and penetrometer resistance from 99,60 %, resulted in a Ki and Kr decrease. The value of Ki

in the interrill under uncompacted soil was 4.6 times of that value observed for soil compacted (0.46×10^6 vs. $0.10 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$). The rill erodibility in the ridged plots, with uncompacted soil (SNC) was 12 % of that for compacted soil (SC): that is, 7.76×10^{-3} vs. $6.92 \times 10^{-3} \text{ s m}^{-1}$, respectively. The average hydraulic shear in the SC was 56% of that for SNC (2.48 vs. 4.42 N m^{-2}).

The reductions in K_i and K_r , under soil compaction, were attributed to the smaller susceptibility to detachment by raindrop impact and to the shear forces, due to the soil strength increases with the compaction.

The variations in K_i were associated with several properties evaluated. Differences in K_r and T_c were not significantly, when was compared the compacted soil with the uncompacted soil. The T_c was correlated with some properties of the soil. K_r was not readily explained by any of the soil properties evaluated.

The results indicated that changes in soil properties, by soil compaction, are important factors that contribute to reduce or to increase the soil erodibilities, K_i and K_r .

1. INTRODUÇÃO

O processo de erosão do solo é constituído pela desagregação e transporte de suas partículas. A equação universal de perdas de solo (EUPS), proposta por WISCHMEIER & SMITH (1978), tem sido o modelo de avaliação da erosão hídrica mais utilizado até o momento. Através deste modelo já se estimou a erosão global, incluindo erosão em lençol e em sulcos, para as terras com os mais diversos usos e manejos de culturas.

A maior crítica no uso desta equação tem sido que, mesmo nas regiões onde seus parâmetros já tenham sido determinados, por ser um modelo estatístico baseado em estudos de muitos anos, com diversas parcelas experimentais, só prevê valores médios anuais. A referida equação não é válida, por exemplo, para a determinação de perdas de solo para uma chuva qualquer isolada, nem mesmo para condições idênticas às quais ela foi deduzida.

Em função da dificuldade operacional e financeira em se determinar a erodibilidade, em condições de campo, como foi proposto por WISCHMEIER & SMITH (1978), para cada unidade de solo, diversos pesquisadores têm trabalhado

para avaliar a erodibilidade por métodos indiretos. WISCHMEIER *et al.* (1971) propuseram um nomograma, no qual a erodibilidade do solo é avaliada em função de algumas características e propriedades do solo como distribuição de partículas primárias quanto ao tamanho, matéria orgânica, estrutura e permeabilidade.

Mais recentemente, DENARDIN (1990) propôs um modelo introduzindo alguns parâmetros físicos e químicos para estimar a erodibilidade do solo, tendo por base o nomograma proposto por WISCHMEIER *et al.* (1971).

Em todos os trabalhos citados anteriormente, os autores têm conceituado a erodibilidade do solo como sendo praticamente constante. Com o avanço da ciência do solo, alguns conceitos têm sido revistos e hoje a erodibilidade é considerada uma propriedade dinâmica, a qual pode ser alterada por modificações nas propriedades do mesmo, principalmente, com a adição de material orgânico e compactação.

Atualmente, sabe-se que os solos possuem diferentes susceptibilidades à erosão hídrica. Alguns solos são mais afetados pelo impacto das gotas de chuva, o que promove a sua desagregação, enquanto que outros são mais susceptíveis à erosão quando há a formação de sulcos. Desta forma, um solo mais susceptível ao sulcamento deverá receber tratamento diferente dum outro mais susceptível ao impacto, na escolha de práticas de controle a erosão, quan-

do da elaboração dum planejamento conservacionista.

Pelo exposto, a determinação da erodibilidade do solo implica no estudo das forças que atuam nos processos erosivos, separando-se o efeito do impacto das gotas de chuva, com conseqüente escoamento laminar e o efeito do escoamento superficial concentrado na forma de sulcos.

Com o avanço da Ciência da Modelagem Matemática e devido ao vasto uso e disponibilidade de microcomputadores, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos e outras entidades federais desenvolveram o projeto "Water Erosion Prediction Project" (WEPP) buscando uma nova técnica, mais precisa para se estimar a erosão hídrica, na qual os efeitos da erosão intra-sulcos* ou em sulcos e intersulcos* são considerados separadamente. Esta técnica representa um progresso em relação à EUPS, pois o WEPP leva em consideração os avanços nos estudos da erosão: Hidrologia e Hidráulica.

Para o desenvolvimento deste novo modelo, muitas foram as contribuições dos trabalhos realizados por LAFLEN *et al.* (1987) e ELLIOT *et al.* (1989), onde alguns parâmetros hidráulicos foram utilizados para um melhor entendimento do processo erosivo. Isoladamente, VILAR (1987),

* Neologismo = palavras novas.

no Brasil, desenvolveu um trabalho teórico neste sentido, tendo testado seu modelo apenas para a condição particular de rampa desprovida de cobertura.

Para fins de planejamento agrícola no Brasil inexistem, até o momento, estudos sobre a erosão em sulcos e intersulcos da maneira apresentada por LAFLEN *et al.* (1987) e ELLIOT *et al.* (1989). Em reuniões científicas, no Brasil, têm sido apresentados alguns trabalhos relativos apenas à erodibilidade intersulcos. Dada a complexidade do método para a determinação da erodibilidade em sulcos, até o momento, não têm sido apresentados trabalhos baseados nesta nova técnica.

Uma pesquisa visando estudar as erodibilidades, devidas às erosões em sulcos e intersulcos, para solos representativos, em níveis regionais, no Estado de São Paulo, seria de grande importância, para o efetivo controle da erosão. Há que se considerar, também, que muitas áreas cultivadas no Estado de São Paulo apresentam problemas relativos à compactação, como consequência da adoção de manejos inadequados, o que afeta em muito a erodibilidade dos solos de algumas regiões.

Em função do exposto, o presente trabalho tem por objetivo o estudo da erodibilidade inter e intra sulcos e da variação de cisalhamento hidráulico crítico, em condições de solo não compactado e compactado, para um Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa da região de

Jaboticabal - SP.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Considerações gerais

O entendimento do processo de erosão do solo tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores. ELLISON (1947) definiu a erosão do solo como sendo um processo de desagregação, transporte e deposição de partículas do solo pelos agentes erosivos.

A susceptibilidade de um dado solo à erosão tem sido expressa por um fator, denominado erodibilidade, nos diferentes modelos de predição de perdas de solo usados no mundo, desde a década de cinqüenta. No modelo de WISCHMEIER (1959), a relativa erodibilidade dum solo foi referida como sendo um fator K. Esse fator é um dos parâmetros da equação universal de perdas de solo proposta por WISCHMEIER & SMITH (1965) e revista por WISCHMEIER & SMITH (1978), a qual é apresentada abaixo:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad [2.1]$$

onde,

A = quantidade de perdas de solo (t/ha);

R = erosividade da chuva (MJ mm/ha h);

K = erodibilidade do solo (t ha h/ha MJ mm);

LS = fator que descreve o efeito do declive e do comprimento de rampa (adimensional);

C = fator cobertura e manejo do solo (adimensional);

P = fator relativo às práticas conservacionistas (adimensional).

O fator K pode ser obtido experimentalmente, segundo WISCHMEIER & SMITH (1978), no campo, em parcelas unitárias padrões (22,13 m de comprimento e 9% de declividade) mantidas, permanentemente, descobertas e com preparo do solo no sentido do declive. Sob tais condições os fatores LS, C e P assumem valores unitários e a equação [2.1] pode ser resolvida para K, o qual iguala-se a A/R.

Os solos diferem em suas susceptibilidades ao destacamento de suas partículas pelo impacto de gotas da chuva e pelo fluxo de água, devido às suas inerentes e diferentes propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Em algumas das conhecidas propriedades físicas que afetam a erodibilidade incluem-se os teores de óxidos de Fe e Al, a distribuição do tamanho das partículas primárias, o teor de matéria orgânica, a estrutura do solo, o teor de umidade inicial e o envelhecimento e as pontes eletroquímicas

(GRISSINGER, 1966; WISCHMEIER & MANNERING, 1969; WISCHMEIER *et al.*, 1971; BUBENZER & JONES, 1971; PARTHENIADES, 1972; ROMKENS *et al.*, 1977).

A erodibilidade do solo como proposta no modelo de WISCHMEIER & SMITH (1978) é considerada como sendo global, porque inclui, num único parâmetro, os efeitos dos processos de erosão intersulcos e em sulcos.

Vários pesquisadores (WISCHMEIER *et al.*, 1971; FREIRE, & PESSOTI, 1974; EL-SWAIFY & DANGLER, 1977; HOLZHEY & MAUSBACH, 1977; RESCK *et al.*, 1981; PEREIRA *et al.*, 1985; MARTINS FILHO, 1987; FREIRE *et al.*, 1992) trabalharam com métodos diretos e indiretos para se estimar a erodibilidade global para vários tipos de solo no exterior e no Brasil.

DENARDIN (1990) propôs um modelo no qual parâmetros físicos e químicos foram utilizados para estimar a erodibilidade global do solo, com base no nomograma proposto por WISCHMEIER *et al.* (1971). Para a elaboração deste modelo 31 solos do Brasil e 46 dos EUA foram utilizados. A análise de regressão múltipla linear, para os solos do Brasil, indicou que os parâmetros permeabilidade, matéria orgânica, óxido de alumínio extraível por ácido sulfúrico e a fração areia compreendida entre 2,00 e 0,50 mm foram as variáveis independentes significativas para estimar o fator erodibilidade. O coeficiente de determinação desse modelo foi 0,9005. Na análise de regres-

são linear múltipla para o conjunto de solos do Brasil e EUA, o autor obteve um coeficiente de determinação de 0,9767. Neste último modelo, os parâmetros "M" (WISCHMEIER *et al.*, 1971), permeabilidade, diâmetro médio ponderado das partículas menores que 2,00 mm e o produto de matéria orgânica pela areia menor que 0,10 mm foram as variáveis independentes, significativas para se estimar K numa ampla variedade de solos.

Em estudos mais recentes, o processo erosivo tem sido estudado levando-se em consideração a origem do sedimento erodido identificando-se dois processos distintos: erosão intersulcos e em sulcos (FOSTER 1982; LAFLEN *et al.*, 1987; ELLIOT *et al.*, 1989). Consequentemente, os modelos mais recentes de perdas de solo, por erosão, incluem a erodibilidade determinada para as áreas intersulcos e em sulcos separadamente.

2.2. Contribuições para o entendimento do parâmetro erodibilidade intersulcos (K_i)

A erosão intersulcos é causada principalmente pelo impacto das gotas de chuva (LATTANZI *et al.*, 1974). Quando as gotas tocam o solo estas dissipam a energia que possuem nas partículas que contactam, causando o destacamento e liberação das mesmas, as quais são então carregadas pela enxurrada (PEREIRA, 1989 e LIEBENOW *et al.*, 1990).

Trabalhos de diversos pesquisadores têm demonstrado que a erosão intersulcos é função de vários fatores.

LATTANZI *et al.* (1974), SINGER & BLACKARD (1982) e WATSON & LAFLEN (1986) verificaram que a erosão intersulcos é afetada pela declividade, resistência do próprio solo e intensidade da chuva. PARK *et al.* (1982) além destes fatores consideram também a rugosidade do solo.

LATTANZI *et al.* (1974) determinaram que as perdas de solo por erosão intersulcos, em áreas com 20% de declive, foram aproximadamente o dobro daquelas obtidas em áreas com 2% de declividade, enquanto que a combinação da erosão intersulcos e em sulcos, propiciou um fator de aumento de 20 vezes nas perdas de solo por erosão.

SINGER & BLACKARD (1982) apresentaram resultados relativos ao efeito da declividade, quando estudaram as relações entre ângulo de inclinação e erosão intersulcos para declives superiores a 50%, mostrando que as propriedades do solo e os efeitos do declive não são independentes. Os citados autores observaram, ainda, que as taxas de perdas de solo aumentavam rapidamente com o aumento da declividade de 35 para 40% e, então, tornavam-se praticamente constantes. Tal fato, segundo explicaram os citados autores, poderia ser devido, parcialmente, às condições experimentais de curtos declives quanto ao comprimento, mas é realidade que devido a elevados ângulos de de-

clive há menor efeito do impacto direto das gotas d'água da chuva na superfície do solo. SINGER & BLACKARD (1982) inferiram, em função dos resultados que obtiveram, que em declives elevados, o fluxo de água, ao invés do impacto, pode dominar o processo de erosão e, neste caso, um solo com textura fina pode resistir à erosão por causa de uma alta resistência ao cisalhamento.

A declividade, uma propriedade superficial, afeta, também, a erosão intersulcos (LIEBENOW *et al.*, 1990). O aumento da declividade acelera a erosão intersulcos numa extensão bem menor que para a erosão em sulcos (WATSON e LAFLEN, 1986).

YOUNG & ONSTAD (1978) relacionaram as quantidades de solo erodido de áreas intersulcos com a agregação, estabilidade de agregados, teor de matéria orgânica e distribuição do tamanho de partículas. Concluíram que solos com alto grau de agregação e agregados relativamente estáveis em água são menos susceptíveis à erosão intersulcos que os mais pobremente agregados.

MEYER & HARMON (1984) estudaram a susceptibilidade de solos agrícolas à erosão intersulcos nos EUA. Verificaram que os solos pobremente agregados e altamente siltosos eram mais erodíveis quando comparados aos altamente argilosos. Através de análises de regressões simples observaram que a erosão correlacionou-se melhor com a porcentagem de argila ($< 2 \mu\text{m}$), potencial da água

(1500 kPa), cálcio trocável, soma de bases e matéria orgânica. Todas as correlações foram negativas.

Estes dois últimos estudos contribuíram para que alguns autores utilizassem a estabilidade de agregados como um índice de erodibilidade (YOUNG, 1984; BATHKE & BLAKE, 1984; ALBERTS & WENDT, 1985).

BAJRACHARYA *et al.* (1992) encontraram correlações negativas entre erodibilidade intersulcos (K_i) e parâmetros medidos como, teor de carbono orgânico (CO), agregados estáveis em água ($> 0,25$ e $> 0,50$ mm) e correlações positivas entre K_i e dispersibilidade do solo.

A resistência do solo, medida por um penetrômetro ou por uma grimpadora cisalhante, tem sido considerada por alguns autores (CRUSE & LARSON, 1977; AL-DURRAH & BRADFORD, 1981; NEARING & WEST, 1988) como um dos fatores que afetam a erodibilidade do solo.

O destacamento do solo, devido ao impacto das gotas de chuva, foi inversamente relacionado à resistência do solo ao cisalhamento por CRUSE & LARSON (1977) e AL-DURRAH & BRADFORD (1981). Esses autores mostraram que o estresse efetivo, induzido pelo potencial negativo da água, aumenta a resistência do solo ao salpico pelas gotas d'água da chuva. Segundo KEMPER & ROSENAU (1984) a sucção da água, a qual causa estresse efetivo, trabalha no sentido de unir o solo e aumentar a coesão do mesmo. FORMANEK *et al.* (1984) demonstraram que o poder de

coesão do solo, o qual foi tomado como um índice de erodibilidade, aumenta com o logaritmo do estresse efetivo, que foi considerado como sendo igual ao potencial mátrico da água. AL-DURRAH & BRADFORD (1981) concluíram que a resistência à penetração é geralmente baixa em altos teores de umidade e vice-versa.

AL-DURRAH & BRADFORD (1982) determinaram a existência de uma correlação altamente significativa entre ângulo de salpico e resistência do solo ao cisalhamento, a qual foi medida utilizando-se um penetrômetro de impacto. Foi verificado, também, que uma baixa resistência do solo resultou na formação de uma larga cavidade na superfície deste com saliências nas bordas (bulbo), num maior destacamento de partículas devido ao estresse cisalhante de um fluxo de água radial e, num maior ângulo de salpico com a horizontal. O desenvolvimento da referida cavidade, ou bulbo, tem sua intensidade determinada pela magnitude de carga, área de aplicação e características de deformação do solo (AL-DURRAH & BRADFORD, 1982). Os dois primeiros parâmetros, magnitude da carga e área de aplicação, são determinados pelo tamanho da gota e velocidade no instante do impacto. Já o último, características de deformação do solo, é influenciado por propriedades deste como estrutura, resistência ao cisalhamento e histórico de estresses.

Em condições de alta resistência do solo ao cisalhamento, a profundidade e o volume do bulbo são peque-

nos. Contudo, em solos com baixa resistência ao cisalhamento, após a formação do bulbo, em suas superfícies, o estresse compressivo é transformado em estresse cisalhante, através da região de contato sólido-líquido devido a um jacto lateral de água (AL-DURRAH & BRADFORD, 1982). Segundo HUANG *et al.* (1982) a velocidade deste jacto lateral é maior que a da gota d'água no instante do impacto. Portanto, a quantidade de solo destacado, nesta fase, será determinada pelo estresse cisalhante do fluxo radial atuando no fundo, nos lados da cavidade e na parte circular do bulbo. Esta quantidade é dependente da magnitude da deformação que toma lugar nos estágios precoces de formação da cavidade e, também de forças coesivas do solo resistindo ao estresse cisalhante (AL-DURRAH & BRADFORD, 1982).

A carga, devido ao salpico, e o ângulo de impacto são afetados pelas forças de fricção e coesão entre as partículas e, pela deformidade do solo. Cada uma destas propriedades contribui diferentemente na determinação da carga e do ângulo de salpico. A deformidade do solo, segundo AL-DURRAH & BRADFORD (1982), tem influência direta no ângulo de salpico e indireta na carga de salpico (mg / gota). As forças coesivas entre partículas, por outro lado, têm maior efeito na determinação da carga, já que o destacamento é, em princípio, causado pelo fluxo que cisalha o solo, na base e nos lados da cavidade.

Outros fatores que também influenciam a

susceptibilidade de um solo à erosão intersulcos são: a infiltração de água, umidade inicial, selamento, encrostamento e rugosidade superficial do solo.

A infiltração de água no solo refere-se ao movimento da água dentro do perfil (BAVER, 1966). Já a taxa na qual a água entra no solo é chamada de capacidade de infiltração.

Qualquer redução no volume de poros totais, segundo YOUNG & VOORHEES (1982), reduz a capacidade de armazenamento de água, infiltração e a condutividade hidráulica na saturação ou próximo a ela, o que afeta a enxurrada e as perdas de solo por erosão.

MOLDENHAUER e LONG (1964) afirmaram, ainda, que o decréscimo da taxa de infiltração de água no solo é a principal causa de aumento do escoamento superficial e erosão do solo.

A umidade inicial do solo e/ou o seu selamento superficial são fatores que podem contribuir para uma menor taxa de infiltração de água no mesmo.

Em solos úmidos a taxa de infiltração é menor do que em solos secos, devido ao elevado gradiente de tensão entre as camadas superficiais dos primeiros (COSTA, 1979).

Romkens (1979)¹, citado por BRADFORD *et al.* (1987a), definiu selamento superficial como sendo a fase inicial ou fase de umedecimento na formação de uma crosta e, encrostamento propriamente dito como a subsequente fase de secagem.

BRADFORD *et al.* (1986) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de avaliar os efeitos da formação de um selamento superficial e subsequente secagem, na quantidade de solo destacado pelo simples impacto de uma gota d'água.

Para a pesquisa desenvolvida por BRADFORD *et al.* (1986) vinte solos, com textura variando de arenosa a argilosa, foram testados. Os autores verificaram que o salpico para a condição sem encrostamento variou de 8,9 a 61 mg / gota e, de 0,8 a 13,7 mg / gota para a condição com encrostamento. O salpico foi correlacionado, em ambas as condições, com a resistência dos solos de textura fina; contudo, para solos arenosos e franco - arenosos pesquisas adicionais foram recomendadas pelos referidos autores, para

1 ROMKENS, M.J.M. Soil crusting-when crusts form and quantifying their effects. In: INFILTRATION RESEARCH PLANNING WORKSHOP, PART I, Washington, 1979. Reports. Washington, U. S. Department of Agriculture - Agriculture Research Service, 1979. p.36-39.

modelar resistência versus salpico para condições com encrostamento.

BRADFORD *et al.* (1987a) avaliaram o efeito do selamento superficial na infiltração, enxurrada e destacamento do solo por salpico, para vinte solos com textura variando de arenosa a argilosa, numa primeira etapa de pesquisa. Determinaram que o selamento superficial causou uma redução na taxa de infiltração, a qual variou de 1,2 a 36 mm/h, e um aumento na resistência ao cisalhamento que oscilou de 2,6 a 42,3 kPa, resultando num decréscimo nas perdas de solo que variaram de 13,3 a 56,8 g / 5 min. A perda de solo total, salpico e lavagem correlacionaram-se significativamente.

Com base em dados de infiltração e resistência ao cisalhamento, BRADFORD *et al.* (1987a) sugeriram que algumas propriedades do solo se alteram continuamente durante um evento de erosão. Estas mudanças nas características superficiais do solo causam, segundo os pesquisadores, diferenças na quantidade de erosão durante uma forte chuva. Ainda segundo esses autores, o destacamento de partículas do solo intersulcos é, às vezes, um processo dependente e influenciado por mudanças nas propriedades físicas, com o tempo, como selamento superficial e desenvolvimento de crostas.

BRADFORD *et al.* (1987b), numa segunda etapa de trabalho, avaliaram que, com o desenvolvimento de uma

superfície selada, havia uma diminuição na taxa de infiltração, salpico e erosão por lavagem, e um aumento na resistência ao cisalhamento do solo. Relataram, também, que a extensão do selamento superficial é extremamente dependente da textura do solo, e observaram que o mesmo foi pequeno para dois solos arenosos e para um solo argiloso, porém maior nos de textura média. Outra observação destes autores foi que um decréscimo em porosidade e um aumento na resistência ao cisalhamento, resultou em menor perda de solo. Ainda segundo BRADFORD *et al.* (1987b), com o desenvolvimento do selamento superficial a porção de perdas devido ao salpico, em relação às perdas totais de solo, diminui e a porcentagem de solo transportado por um fluxo de água aumenta. A porcentagem de salpico decresce, porque o ângulo de projeção por salpico diminui quando a superfície se torna mais resistente ao impacto das gotas d'água da chuva (ALDURRAH & BRADFORD, 1982).

Uma outra propriedade superficial importante, também relacionada com a infiltração de água no solo e erosão intersulcos, é a rugosidade não orientada (aleatória) do solo. ALBERTS *et al.* (1989) têm apontado esse fator como uma das variáveis que influencia a componente hidrológica do processo de erosão, além da densidade do solo e condutividade hidráulica. A rugosidade não orientada é uma microvariação do relevo da superfície do solo (VOORHEES *et al.*, 1979).

Segundo ALBERTS *et al.* (1989) a rugosidade pode, freqüentemente, estar associada ao preparo do solo; entretanto qualquer operação de distúrbio do solo cria rugosidade. Ainda de acordo com os citados autores, a rugosidade superficial tem sido positivamente correlacionada ao armazenamento de água da chuva em pequenas depressões, e à resistência hidráulica do solo a um fluxo de água superficial. Os torrões com superfícies rugosas têm aumentada a infiltração, diminuindo a erosão, comparativamente a torrões com superfícies lisas (JOHNSON & MOLDENHAUER, 1979). A rugosidade do microrrelevo, provavelmente, mantém alta a taxa de infiltração, devido a um aumento no represamento depressional e maior gradiente hidráulico, o que mantém uma elevada condutividade como resultado de descontinuidades no desenvolvimento de uma superfície encrostada (FREEBAIRN *et al.*, 1989).

Um parâmetro bastante associado à declividade é o comprimento de rampa. Nesta linha de pesquisa PEREIRA (1989) estudou as perdas de solo, num Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa, devidas ao impacto de gotas de chuva simulada e de comprimento de rampa. O referido autor concluiu que rampas com até 1,00 m de comprimento só sofrem erosão intersulcos, enquanto que as maiores que este comprimento apresentam erosão em lençol e em sulcos. Também ficou evidenciado que o comprimento da rampa afeta a erosão em sulcos.

2.3. Modelagem do processo de erosão intersulcos

ELISON (1947) e FREE (1960) sugeriram ser a erosão intersulcos proporcional à intensidade de chuva elevada a um expoente, o qual, segundo estes autores, oscila em torno de 2.

MEYER (1981) relatou que o efeito da intensidade de chuva na erosão intersulcos poderia ser expresso como:

$$E = a I^b \quad [2.2]$$

onde,

E = taxa de erosão intersulcos ($\text{g/m}^2 \text{ s}$);

a = coeficiente;

I = intensidade de chuva (mm/h);

b = um expoente.

Uma equação básica para a determinação da taxa de destacamento de solo pelo impacto das gotas d'água da chuva foi proposta por FOSTER (1982):

$$D_i = 0,0138 K_i I^2 \quad [2.3]$$

onde,

D_i = taxa de erosão intersulcos ($\text{kg/m}^2 \text{ h}$);

K_i = erodibilidade intersulcos (kg h/N m^2) e;

I = intensidade de chuva (mm/h).

O K_i da equação [2.3] segundo FOSTER (1982) pode ser utilizado como o fator K da EUPS. Entretanto, resalta o autor que o K_i pode ser maior ou menor que K, porque este fator da EUPS reflete conjuntamente a erodibilidade intersulcos e em sulcos. Para esta taxa, usando-se a erosão em sulcos como um guia, se um solo em particular parece especialmente susceptível ao sulcamento, o K_i pode ser reduzido a $1/3$ do valor K da EUPS (FOSTER, 1982), e se o solo for menos susceptível ao sulcamento, K_i , pode ser aumentado em $1/3$ (FOSTER *et al.*, 1977). MEYER & HARMON (1984) encontraram uma boa correlação positiva entre erodibilidade intersulcos e o fator K da EUPS.

Trabalhos desenvolvidos por MEYER & HARMON (1984) e WATSON & LAFLEN (1986) concordaram com MEYER (1981) em que a erosão intersulcos é afetada pela intensidade de chuva, numa taxa aproximadamente proporcional ao quadrado desta. GILLEY & FINKNER (1985) afirmaram que as características das gotas impactantes poderiam influir na quantidade e na natureza dos materiais destacados do solo pelo impacto. Posteriormente, WATSON & LAFLEN (1986) demonstraram que a massa de partículas erodidas é dependente das propriedades da chuva, das superficiais e das do solo.

No caso particular de solos argilosos, MEYER (1981) concluiu que a erosão intersulcos não seria proporcional ao quadrado da intensidade de chuva. Posteriormente, WATSON & LAFLEN (1986) refutaram esta alegação e atribuíram as variações nos expoentes de intensidade de chuva, obtidos por MEYER (1981), a outros fatores e não ao teor de argila.

A erodibilidade intersulcos (K_i) do solo foi significativamente relacionada à resistência ao cisalhamento medida após uma chuva, através de modelos de predição de erosão que incluíam a intensidade de chuva, a declividade e a resistência ao cisalhamento (WATSON & LAFLEN, 1986). Os modelos encontrados por esses autores foram:

$$D = 0,00109 \tau_a^{-0.43} I^{1.68} (\sin\theta)^{0.26} \quad [2.4]$$

$$D = \tau_a^{-0.43} I^{1.68} (7,4 \cdot 10^{-4} \sin\theta + 5,6 \cdot 10^{-4}) \quad [2.5]$$

$$D = \tau_a^{-0.40} I^{1.68} (7,4 \cdot 10^{-4} \sin\theta + 3,9 \cdot 10^{-4}) \quad [2.6]$$

onde,

D = erosão intersulcos ($g/m^2.s$)

τ_a = resistência ao cisalhamento (KN/m^2);

I = intensidade de chuva (l/s);

θ = ângulo do declive.

Para os três modelos anteriormente apresentados o coeficiente de determinação foi 0,84 e a erodibilidade K_i foi considerada diretamente proporcional a τ_{ac} . O expoente c foi -0,43, -0,43 e -0,40 para as equações anteriormente descritas, respectivamente. Estes expoentes indicam que com o aumento da resistência ao cisalhamento há uma diminuição na erodibilidade intersulcos do solo.

LAFLEN *et al.* (1987) propuseram um modelo para erosão intersulcos como sendo:

$$D_i = K_i I^2 \quad [2.7]$$

onde,

D_i = taxa de erosão intersulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

K_i = erodibilidade intersulcos (kg s m^{-4});

I = intensidade de chuva (m s^{-1}).

Pelo modelo de LAFLEN *et al.* (1987) a erodibilidade intersulcos seria uma medida da taxa de sedimento transferido para os sulcos, como uma função da intensidade de chuva elevada ao quadrado.

LIEBENOW *et al.* (1990), ao analisarem uma coleção de resultados de erodibilidade intersulcos, obtidos em solos cultivados dos EUA, concluíram que a taxa de erosão intersulcos varia com a intensidade de chuva, tipo de solo e declive. Em função desta análise, os autores

citados, propuseram uma equação para a determinação da erodibilidade intersulcos (K_i). Para a proposição desta equação, trabalhos conduzidos por LATTANZI *et al.* (1974); MEYER (1981); FOSTER (1982); SINGER & BLACKARD (1982); WATSON & LAFLÉN (1986) e Meyer & Harmon² (1987) citados por LIEBENOW *et al.* (1990) foram importantes.

A equação proposta por LIEBENOW *et al.* (1990) foi a seguinte:

$$K_i = D_i / (I^2 Sf) \quad [2.8]$$

onde,

D_i = taxa de erosão intersulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

K_i = erodibilidade intersulcos (kg s m^{-4});

I = intensidade de chuva (m s^{-1});

Sf = fator declividade, refletindo a limitação de transporte pelo fluxo de água superficial em pequenos declives.

Uma expressão estável para Sf que computa

² MEYER, L.D. & HARMON, W.C. How row-sideslope length and steepness affect interrill erosion. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1987. (ASAE. paper No. 87-2007)

variações no declive, é dada por:

$$Sf = 1,05 - (0,85 \cdot \exp(-4 \cdot \sin(s))) \quad [2.9]$$

onde,

s = ângulo do declive em graus.

Pelo exposto, a erodibilidade intersulcos pode ser definida como uma medida da taxa de sedimento transferido para os sulcos em função da intensidade de chuva (ALBERTS *et al.*, 1989) e de um fator de declividade (LIEBENOW *et al.*, 1990).

2.4. Contribuições para o entendimento do parâmetro erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos (Kr)

Geralmente a enxurrada em superfícies de solos erodíveis está concentrada em muitos canais, mas pequenos e bem definidos (FOSTER, 1971; MEYER *et al.*, 1975). A erosão nestes canais é a erosão em sulcos. Todo o sedimento destacado das áreas intersulcos é suposto se mover lateralmente para os sulcos. O fluxo de água nos sulcos transporta estes sedimentos, bem como os sedimentos destacados dos próprios sulcos. Conseqüentemente, o movimento dominante de sedimento erodido, declive abaixo, é por fluxo de água nos canais.

A erosão ocorrendo ao longo dos sulcos, depende diretamente da hidráulica do fluxo de água no canal. Em contraste, a erosão ocorrendo nas áreas entre os sulcos depende, primeiramente, do impacto das gotas de água da chuva e depois de um fino filme de água (FOSTER *et al.*, 1984). O fluxo nos sulcos transporta várias das partículas destacadas pelo impacto das gotas de chuva declive abaixo.

A perda de sedimento devido a um fluxo de água, é limitada pela quantidade deste disponível para transporte ou pela capacidade de transporte do fluxo (FOSTER, 1982). Se o sedimento excede a capacidade de transporte do fluxo ocorre a deposição.

LAFLEN *et al.* (1987) afirmaram que quando a água flui num canal há a ação de uma força, na direção do fluxo, no leito do mesmo, a qual é conhecida como cisalhamento hidráulico, força trativa, força cisalhante ou de arraste. Esta força é dependente da unidade de peso de água, profundidade do fluxo de água e energia do declive (HANSON, 1990b).

A capacidade de transporte de sedimentos está intimamente relacionada a um valor crítico de cisalhamento, denominado por diversos autores (MEYER, 1964; FOSTER & MEYER, 1972 e LAFLEN *et al.*, 1987) cisalhamento hidráulico crítico, que se constitui no cisalhamento hidráulico abaixo do qual não ocorre destacamento de partículas do solo. Uma típica relação linear entre cisalha-

mento hidráulico e erosão em sulcos foi apresentada por LAFLEN *et al.* (1987). O intercepto desta relação linear obtida entre destacamento de partículas em sulcos e cisalhamento hidráulico nos fornece o valor do cisalhamento hidráulico crítico. ALBERTS *et al.* (1989) relatou que o cisalhamento hidráulico crítico é um importante fator nos modelos de erosão em sulcos.

HANSON (1989) sugeriu três regiões de análises para descrever a relação entre a taxa de erosão em sulcos (D_r) e cisalhamento do solo (T). A região I seria aquela onde D_r é relativamente pequena e ocorre num cisalhamento menor que o crítico. Na região II a taxa de D_r aumenta e o cisalhamento ocorre num valor maior que o crítico. Na posição intermediária entre as regiões I e II ocorre o cisalhamento crítico. Nas regiões I e II ocorrem os fenômenos de erosões superficiais, enquanto que a típica erosão descrita na literatura (erosão global) é a que ocorre na região II. A região III é citada como sendo a de erosão em massa. Esta erosão em massa ocorre quando o estresse na interface solo / água é maior que a resistência da macroestrutura do leito do canal, causando a separação de grandes pedaços de material coeso passíveis de serem removidos.

A taxa de erosão intra-sulcos ou em sulcos (D_r) pode ser influenciada por inúmeras variáveis como distúrbios do solo devido ao preparo, consolidação, biomassa viva de raízes, incorporação de resíduos, congela-

mento e descongelamento, e compactação do solo (ALBERTS *et al.*, 1989).

O preparo do solo tem sido apontado por diversos autores como um fator importante no processo de erosão em sulcos.

MOLDENHAUER & KOSWARA (1968) afirmaram que as erosões mais intensas ocorrem, em geral, nos solos que tenham sido recentemente arados e gradeados. A aração destaca da superfície do solo torrões de vários tamanhos resultando numa camada heterogênea. Usualmente os torrões são reduzidos de tamanho pela aração e gradagem do solo.

Segundo FOSTER (1982), algumas vezes, o preparo do solo é um mecanismo que cria um suprimento de agregados destacados. Isto parece tornar o solo muito mais susceptível à erosão em sulcos que à erosão intersulcos (FOSTER, 1982).

ALBERTS *et al.* (1989) informaram que a rugosidade, oriunda do preparo ou de operações que provocam distúrbios no solo, pode influenciar a erosão em sulcos. Comentaram, também, que o preparo ou as referidas operações podem dar origem à rugosidade do solo orientada e aleatória (não orientada).

A rugosidade orientada surge quando o solo é arranjado num caminho regular por implementos de preparo do mesmo. Nestes caminhos orientados, principalmente se fo-

rem no sentido morro abaixo, a enxurrada pode se concentrar e o fluxo de água, escoando, dar origem à erosão em sulcos.

A rugosidade não orientada pode reduzir a capacidade de transporte. Esta rugosidade forma depressões ou obstáculos que represam o fluxo de água em microdepressões, reduzindo a capacidade de transporte do referido fluxo e podendo causar considerável deposição (FOSTER, 1982).

A consolidação, também, tem sido apontada como um fator que pode alterar a erodibilidade do solo intra-sulcos ou em sulcos. Alguns autores têm atribuído um decréscimo na erodibilidade do solo, principalmente em sulcos, com o tempo após o preparo, a um aumento na densidade e resistência devido à ocorrência do fenômeno de consolidação. A consolidação pode ser definida como o aumento da estabilidade do solo, a qual ocorre por causa de um estresse efetivo neste. Os estresses efetivos são induzidos por potenciais mátricos negativos da água no solo, os quais ocorrem durante a redistribuição de umidade após uma chuva (NEARING *et al.*, 1988). Segundo BROWN *et al.* (1990), porém, a consolidação é um processo natural, por exemplo, de umedecimento e secagem, que aumenta a estabilidade da massa do solo.

NEARING *et al.* (1988) definiram a estabilização mecânica de uma massa de solo como qualquer proces-

so que tenda a aumentar o número ou a resistência das ligações interpartículas ou interagregados. Estas ligações aumentam a resistência ao destacamento por um fluxo superficial de água (Sargunam ³, 1973 e Kandiah ⁴, 1974 citados por NEARING *et al.*, 1988). Um pequeno aumento do potencial da água no solo resultou num grande aumento da resistência ao cisalhamento em experimento desenvolvido por BRADFORD & GROSSMAN (1982). Os mesmos autores demonstraram que há variações sazonais e anuais da resistência do solo ao cisalhamento. Os fatores que potencialmente influenciam a estabilidade mecânica de um solo incluem o tempo (MITCHELL, 1960; BJERRUM & LO, 1963) e o histórico de estresses efetivos (LAMBE & WHITMAN, 1969; TOWNER & CHILDS, 1972). O poder cisalhante tem sido significativamente correlacionado à erosão potencial de solos em canais com

3 SARGUNAM, A. Influence of mineralogy, pore fluid composition and structure on the erosion of cohesive soils. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 32(3): 696-700, 1988. Apud Dissertation Abstracts, Davis, 73:32300, 1973.

4 KANDIAH, A. Fundamental aspects of surface cohesive soils. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 32(3): 696-700, 1988. Apud Dissertation Abstracts, Davis, 75:15440, 1974.

fluxos de água (Flaxman⁵, 1962 citado por BRADFORD & GROSSMAN, 1982) e quantidade de solo destacado pelo impacto das gotas d'água da chuva (CRUSE & LARSON, 1977).

NEARING & WEST (1988) relataram que índices de resistência ao cisalhamento são freqüentemente usados para predizer a susceptibilidade do solo à erosão.

NEARING *et al.* (1988) relataram que os principais fatores que desestabilizam a resistência do solo à erosão são o cultivo e o congelamento. Segundo os mesmos autores a resistência à erosão aumenta com o tempo após o preparo. Esta última afirmativa já havia sido observada em experimentos realizados por Meyer & Harmon⁶ (1981), citados por NEARING *et al.* (1988), quando avaliaram a erosão intersulcos, num solo franco-siltoso, sob duas condições.

5 FLAXMAN, E.M. A method of determining the erosion potential of cohesive soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, 46: 685-688, 1982. Apud I.A.S.H./Commission of Land Erosion, "s.l.", 59:114-123, 1962.

6 MEYER, L.D. & HARMON, W.C. Soil erosion and sediment characteristics of typical soils and land uses in the Goodwin Greek catchment. In: STREAM CHANNEL STABILITY, "s.l.", "s.d." Apendix G. "s.l.", "s.ed.", 1981. G2-G64.

Numa primeira condição o solo havia sido recentemente preparado e na outra o solo não estava sendo cultivado a cerca de 5 meses. Em ambas as condições o solo estava nú. O coeficiente de erosão intersulcos foi aproximadamente 80 vezes maior para a condição de preparo recente, indicando uma elevada taxa de erosão intersulcos para o solo perturbado. O preparo modifica propriedades físicas superficiais e propriedades hidráulicas do solo (BURWELL *et al.*, 1966; ALLMARAS *et al.*, 1967) e, ainda, reduz a superfície residual, aumenta a porosidade superficial, aumenta a rugosidade superficial e debilita a estrutura do solo devido a microfraturas (FREEBAIRN *et al.*, 1989).

A consolidação e mudanças nas propriedades superficiais, induzidas pelo plantio direto, podem minimizar as perdas de solo a níveis ao redor daqueles atribuíveis somente ao resíduo superficial (WEST *et al.*, 1992). A eficácia dos resíduos culturais no controle da erosão hídrica do solo deve-se, principalmente, à redução de concentração de sedimentos na enxurrada, em função da proteção que oferecem contra o impacto direto das gotas da chuva sobre o solo, e à diminuição da velocidade de escoamento superficial da água, devido à barreira física formada pelos resíduos, o que diminui o transporte das partículas do solo tanto pela ação da chuva quanto da enxurrada (CARVALHO *et al.*, 1990).

WEST *et al.* (1992) verificaram que após cin-

co anos, na camada de 0 a 8 cm, que solos sob sistema de plantio direto tinham 40% mais C orgânico e 50% mais agregados estáveis em água que solos sob sistema de cultivo convencional. Para três solos com 6, 11 e 19% de argila, respectivamente, numa condição consolidada com o resíduo superficial removido, os citados autores observaram que as modificações superficiais induzidas pelo plantio direto resultaram em erodibilidades em sulcos que foram 60 a 70% menores do que aquelas sob cultivo convencional.

Um outro fator importante, que interfere na erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos de um solo, é o de cobertura e manejo.

Segundo FOSTER (1982) o fator cobertura e manejo influencia a erosão em sulcos. ALBERTS *et al.* (1980), verificaram que a cobertura vegetal interceptando a chuva imediatamente acima do fluxo de água no sulco diminui a erosão em sulcos, como também a erosão intersulcos.

Gramíneas, cobertura morta e outras formas de proteção reduzem a ação do cisalhamento hidráulico de um fluxo de água, o que reduz a capacidade de transporte num mesmo caminho e a capacidade de destacamento do fluxo (FOSTER, 1982).

As gramíneas e as coberturas mortas protegendo o solo podem, segundo FOSTER (1982), reduzir efetivamente a capacidade de transporte, quando o fluxo de água da enxurrada se espalha uniformemente através da área ocupada

por elas. Isto, segundo o citado autor, seria o ideal mas não ocorre freqüentemente. O fluxo concentrado de água, geralmente, tem maior capacidade de transporte devido a uma maior submersão das gramíneas e cobertura morta.

HUSSEIN (1978) estudando o efeito de cobertura morta associada ao comprimento de declive nas perdas de solo, concluiu que a taxa de erosão em sulcos, num dado comprimento de rampa, decresce com o aumento da cobertura residual. Demonstrou, também, que a taxa de erosão em sulcos aumenta linearmente com o comprimento da rampa.

A incorporação de resíduos vegetais ao solo pode, também, alterar a sua susceptibilidade à erosão em sulcos. A incorporação anual de resíduos de plantas contrbui para o aumento do teor de matéria orgânica do solo melhorando a estrutura e reduzindo a erosão do solo (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

YOUNG & ONSTAD (1978) verificaram que solos com baixo teor de matéria orgância são mais susceptíveis à erosão em sulcos.

BROWN *et al.* (1989) conduziram um estudo para avaliar os efeitos da incorporação de resíduos no solo e condições de cultivo na erosão em sulcos. Incorporaram resíduos de milho nas taxas de 0, 1.120, 2.240 e 4.480 kg/ha. Chuvas simuladas foram aplicadas logo após a incorporação dos resíduos e, ainda, 30 e 60 dias depois.

Com a simulação de chuvas, a taxa de erosão em sulcos foi significativamente reduzida a 75 e 40%, para influxos de 9 e 69 L/min, respectivamente, nas áreas com taxas de resíduo de 4.480 kg/ha, comparativamente às com taxa de resíduo zero. Para as condições de 30 e 60 dias, após a incorporação de resíduos, as taxas de erosão foram menores do que as da condição de recente preparo.

BROWN *et al.* (1990) avaliaram a erosão em sulcos um ano após a incorporação de resíduos culturais de milho nas taxas de 0, 1.120, 2.240 e 4.480 kg/ha. Depois da incorporação as parcelas não sofreram distúrbios por um ano (preparo). Após este período cada parcela foi subdividida em duas condições de solo: recentemente preparado e consolidada. As perdas médias de solo nas áreas recentemente preparadas foram duas vezes maior que as das áreas consolidadas. Particularmente, nos solos recentemente preparados, a erosão em sulcos foi reduzida em 30%, para as áreas com taxas de resíduos de 4.480 kg/ha comparativamente aos tratamentos 0 kg/ha. Os resíduos parecem ter um importante papel na estabilização de agregados do tamanho da areia (BROWN *et al.*, 1989).

NORTON & BROWN (1992) aplicaram chuva simulada em dois solos, sendo um deles franco siltoso (solo A) e o outro com classe de textura argila siltosa (solo B), dos quais os resíduos superficiais foram cuidadosamente removidos e que apresentavam sulcos com diferentes idades

de formação. Os autores analisaram a influência das idades de formação dos sulcos na erosão dos referidos solos. Para cada um deles, três idades de sulcamento foram estudadas: recentemente formado, quatro e oito anos de formação para o solo A e recentemente formado, dois e sete anos de formação para o solo B, respectivamente. Foi verificado que a taxa média de erosão intersulcos, para sulcos com sete anos de formação, foi 40% e 59% menor que a dos sulcos formados recentemente, para os solos B e A, respectivamente. Para ambos, a taxa de erosão em sulcos, para os mais velhos, foi reduzida em 72% comparativamente aos recém-formados. Entretanto, nenhuma diferença foi encontrada entre os sulcos mais velhos em termos de erosão intersulcos e em sulcos.

Um outro fator que afeta o processo de erosão do solo é a sua compactação.

Em trabalhos desenvolvidos por JAMISON *et al.* (1950), NICHOLS *et al.* (1955), FLOCKER *et al.* (1958), VOORHEES *et al.* (1978), VOORHEES *et al.* (1979), VOORHEES *et al.* (1986) há relatos e comprovações de que o aumento no uso de tratores e maquinárias pesadas de preparo, cultivo, colheita e outras operações têm contribuído para a alteração de propriedades do solo. Um dos reflexos da alteração de propriedades do solo tem sido a ocorrência do fenômeno de compactação, notadamente devido ao aumento de densidade. Semelhantemente ao aumento da densidade, o cisalhamento crítico aumenta (LYLE & SMERDON, 1965) tenden-

do a diminuir a taxa de destacamento do solo.

YOUNG & VOORHEES (1982) afirmaram que o efeito da compactação na erosão está relacionado à maneira como esta altera a estrutura do solo, a taxa de infiltração e outras propriedades relativas à erosão. Os autores afirmam, ainda, que os vestígios da compactação num campo podem servir como canais para a enxurrada, causando concentrações de água que aumentam a erosão. Contudo, quando preparadas, as áreas mais compactadas resultantes de tráfego também tendem a ter uma maior rugosidade, mais torrões superficiais os quais podem ser mais resistentes à erosão durante os períodos entre colheita e plantio (VOORHEES, 1977).

MARTINS FILHO (1987) encontrou um decréscimo na velocidade de infiltração de água no solo, devido à presença de camadas compactadas, em subsuperfície, o que aumentou as perdas de solo e água com a erosão.

Segundo BARFIELD *et al.* (1988), para cada unidade de mudança na densidade, em pequenos valores, tem-se um maior impacto na infiltração que na força trativa. Os referidos autores concluíram, ainda, que para alguns pontos, contudo, é provável que um aumento na força trativa, devido a um outro na densidade, compense qualquer decréscimo na infiltração. Obviamente, segundo os autores citados, fatores outros que não densidade e características do solo interagem para determinar a erosão.

BARFIELD *et al.* (1988) estudaram, ainda, os efeitos da compactação na erosão do solo, avaliando os efeitos da densidade do solo (d_s) no fator C da equação universal de perdas de solo (EUPS). Determinaram que a correlação fator C versus d_s pode ser representada por uma parábola. O aumento e o decréscimo do fator C com a d_s , em forma parabólica, provavelmente representam uma interação entre cisalhamento crítico e infiltração.

HANSON (1989) estudou a erosão em sulcos de dois solos compactados. Observou que um solo franco-arenoso foi 80 vezes mais erodível que um solo franco-argiloso, quando a erosão superficial estava ocorrendo. O autor concluiu que em condições de alto estresse a estrutura do solo torna-se um importante fator na taxa de erosão em massa. Tal conclusão se deveu ao fato de que os dois solos estudados foram aproximadamente equivalentes em erodibilidade quando ocorreu erosão em massa. Ainda, o material removido do fundo dos sulcos foi similar em tamanho, entre os dois solos, também confirmando que este evento é dependente da estrutura do solo.

HANSON (1989) concluiu ser importante a realização de trabalhos visando obter maior entendimento dos fatores que influenciam a erodibilidade do solo, quando ocorre a erosão global e a erosão em massa.

HANSON (1990a) concluiu que a erodibilidade em sulcos tende a ser uma função de propriedades como

textura do solo e plasticidade, após avaliar a mesma para quatro solos compactados (dois franco-arenosos (A e C), um franco-argiloso (B) e um franco (D)). O solo (D), o mais erodível ($K_r = 2,77 \text{ (cm/h)/Pa}$), tinha o maior teor de areia (67%), o menor teor de argila (7%) e o menor índice de plasticidade (0). O solo (B), o menos erodível ($K_r = 0,005 \text{ (cm/h)/Pa}$), tinha o menor teor de areia (37%), o maior teor de argila (27%) e o maior índice de plasticidade (18). O solo (C), com 48% de areia, 19% de argila e índice de plasticidade igual a 6 teve erodibilidade variável com a profundidade ($K_r = 0,002 \text{ a } 0,8 \text{ (cm/h)/Pa}$). Isto pode ter ocorrido devido a variação do intemperismo com a profundidade, mudanças significativas em densidade com a profundidade ou variações nas durações dos fluxos testados (HANSON, 1990a). Já o solo (A) tinha 57% de areia, 16% de argila, índice de plasticidade igual a 4 e apresentou erodibilidade de $0,36 \text{ (cm/h)/Pa}$.

CARTER (1990) relata que a compactação excessiva do solo é o fator de maior degradação deste e, esta pode influenciar adversamente processos químicos, biológicos e físicos do solo.

2.5. Modelagem do processo de erosão intra-sulcos ou em sulcos

Várias equações têm sido propostas para re-

presentar o processo de erosão em sulcos. Notadamente, Meyer⁷ (1964) citado por ELLIOT *et al.* (1988) propôs uma equação para avaliação do destacamento de partículas de solo, pelo fluxo de água em sulcos, a partir de uma outra desenvolvida no século passado, a qual VANONNI (1975) referiu-se como sendo a equação de DuBoys, proposta para se avaliar a quantidade de sedimento transportado em canais abertos.

A equação proposta por Meyer⁷ (1964), citado por ELLIOT *et al.* (1988), para se avaliar destacamento de sedimento pelo fluxo de água é apresentada a seguir:

$$D_r = K_r (T - T_c)^a \quad [2.10]$$

onde,

D_r = taxa de erosão em sulcos ($g \ s^{-1} \ m^{-2}$);

K_r = erodibilidade em sulcos ($s \ m^{-1}$);

T = cisalhamento hidráulico dum fluxo de água ($N \ m^{-2}$);

T_c = cisalhamento hidráulico crítico ($N \ m^{-2}$);

a = constante.

7 MEYER, L.D. Mechanics of soil erosion by rainfall an runoff as influenced by slope length, slope steepness, and particle size. West Lafayette, 1964. (Unpublished Ph. D. Thesis. Purdue University)

O cisalhamento hidráulico (T) pode ser expresso como:

$$T = Y_w R_h S \quad [2.11]$$

onde,

Y_w = peso específico da água ($N \cdot m^{-3}$);

R_h = raio hidráulico do canal (m);

S = declividade do canal (m/m);

FOSTER & MEYER (1972) testaram a equação [2.10] e encontraram o valor $3/2$ para a constante a .

MEYER *et al.* (1975) e DAVID & BEER (1975), em trabalhos semelhantes ao desenvolvido por FOSTER & MEYER (1972), encontraram o valor 1,00 para a constante a .

No modelo de erosão em sulcos, "Water Erosion Prediction Project" (WEPP), descrito por FOSTER *et al.* (1989) foi proposto se avaliar a taxa de erosão intra-sulcos ou em sulcos pelo uso da equação [2.10], considerando-se a constante a igual a 1,00.

Combinando-se as equações [2.10] e [2.11] obtém-se a equação [2.12], a qual é conveniente devido à facilidade de medidas de vazão (Q) no campo. A equação [2.12] é apresentada abaixo:

$$D_r = K_r \{ [Y_w Q S / (P_m v)] - T_c \} \quad [2.12]$$

onde,

D_r = capacidade de destacamento por um fluxo de água limpa ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$);

K_r = coeficiente de erodibilidade em sulcos (s m^{-1});

Y_w = peso específico da água (N m^{-3});

Q = fluxo de água no sulco ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

S = declividade do sulco (m m^{-1});

P_m = perímetro molhado do sulco (m);

v = velocidade do fluxo de água (m s^{-1});

T_c = cisalhamento crítico (N m^{-2}), obtido graficamente.

A equação [2.12] é coincidente com a proposta por ELLIOT *et al.* (1988), quando testaram dois modelos de predição da capacidade de destacamento, D_r , para nove solos cultivados nos EUA.

Em função do modelo proposto por ELLIOT *et al.* (1988), pode-se observar que a erodibilidade em sulcos é uma medida da susceptibilidade do solo ao destacamento por um fluxo concentrado. Assim :

$$K_r = D_r / \{ [Y_w Q S / (P_m v)] - T_c \} \quad [2.13]$$

A erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos, segundo ALBERTS *et al.* (1989), pode ser definida como o aumento em destacamento do solo por unidade de aumento no poder cisalhante de um fluxo de água limpa.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área experimental (A)

Uma área experimental (A) pertencente à Fazenda de Ensino e Pesquisa (FEP) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, câmpus de Jaboticabal, São Paulo, Brasil, com 1.000 m², sem vegetação, durante dois anos agrícolas (1989 a 1991) precedentes às determinações das erodibilidades intersulcos (Ki) e intra-sulcos ou em sulcos (Kr), na qual se executou, regularmente, tratos culturais para evitar o crescimento de qualquer planta e eliminar resíduos vegetais, para que não houvesse quaisquer efeitos de cobertura, foi utilizada para a condução do experimento. Todos os trabalhos agrícolas de aração e gradagem, durante estes dois anos e nos dois subseqüentes, na referida área, foram efetuados no sentido da declividade.

3.2. Solo

O solo foi identificado e classificado como Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa, seguindo-se as normas da EMBRAPA (1979) e OLIVIERA *et al.* (1992).

Quando da análise morfológica, no campo, amostras de terra dos horizontes identificados no perfil do solo foram coletadas. Estas amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificados, e encaminhadas ao laboratório, para execução de análises químicas e físicas. Também foram retiradas amostras indeformadas dos mesmos horizontes, para determinação da densidade real do solo (dr).

3.3. Simulador de chuvas

Um simulador de chuvas de hastes rotativas, tipo Swanson, com bicos "veejet" 80100, previamente calibrado e nivelado no terreno, como proposto por SWANSON (1965), foi utilizado para o fornecimento de precipitações, numa área circular de 15,00 m de diâmetro, para a quantificação de material erodido.

Trinta e seis pluviômetros foram dispostos, radialmente, na área de ação do simulador de chuvas, como descrito por PEREIRA & MOLINA (1986), para se determinar as intensidades das precipitações produzidas pelo simulador,

nas áreas ocupadas pelas parcelas experimentais.

3.4. Procedimentos analíticos preliminares

3.4.1. Análises químicas

Parte das amostras coletadas em cada horizonte do perfil do solo foi utilizada para as análises químicas.

O cálcio, magnésio, potássio e fósforo foram extraídos utilizando-se o método da resina trocadora de ions (RAIJ *et al.*, 1987). A acidez potencial (H+Al) foi determinada segundo metodologia descrita por RAIJ & ZULLO (1977) e o carbono orgânico (C%), segundo EMBRAPA (1979). O carbono orgânico (C%) foi multiplicado pelo fator 1,724 para se estimar o teor de matéria orgânica (M.O.%).

O pH de cada amostra de terra dos horizontes foi determinado potenciometricamente, em solução de CaCl_2 0,01M.

Os óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3) foram determinados pelo método do ataque sulfúrico, utilizando-se material das amostras de terra coletadas no horizonte B, após digestão com H_2SO_4 1:1 (VETORI, 1969; EMBRAPA, 1979).

3.4.2. Análises granulométricas

As análises granulométricas de cada amostra de terra foi realizada, através do método da pipeta utilizando-se NaOH 0,1N como dispersante, tempo de repouso de 24 horas e agitação lenta. As frações do solo (areia, silte e argila) foram separadas com base na classificação proposta pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), segundo DAY (1965).

3.5. Procedimentos de campo

3.5.1. Instalação das parcelas

A área experimental (A) foi subdividida em duas sub-áreas: A₁ e A₂. Em A₁ o solo sofreu simplesmente o preparo descrito anteriormente no item 3.1. Em A₂, além do referido preparo, houve uma intensificação de tráfego, utilizando-se um trator de pneus, o qual trafegou 4 vezes nesta sub-área, simulando operações de preparo numa tentativa de se compactar o solo.

Foram instaladas dez parcelas, na primeira metade de cada sub-área, destinadas à determinação da erodibilidade intersulcos (K_i) e da infiltração de água no solo. Na outra metade de cada sub-área foram instaladas as seis parcelas restantes destinadas à determinação da erodi-

bilidade do solo em sulcos (K_r) e do cisalhamento hidráulico crítico (T_c). Assim, o experimento contou com um total de 32 parcelas.

As parcelas de cada uma das sub-áreas (A_1 e A_2), foram dispostas de forma a receber chuva dum simulador com capacidade para cobrir uma área de 15,0 m de diâmetro. A disposição das parcelas, sulcos e intersulcos, nas sub-áreas A_1 e A_2 , foi estabelecida modificando-se o esquema proposto por ELLIOT *et al.* (1989), para facilitar o trabalho de obtenção dos dados no campo. As parcelas da primeira metade da sub-área A_1 foram denominadas intersulcos não compactados (INC) e, aquelas da sua segunda metade, sulcos não compactados (SNC). Para as duas metades da sub-área A_2 , as parcelas foram denominadas intersulcos compactados (IC) e sulcos compactados (SC), respectivamente.

As parcelas para determinação da erodibilidade intersulcos (K_i) e infiltração tiveram dimensões de 0,50 m de comprimento e 1,50 m de largura, como foi recomendado em PEREIRA (1989).

As bordas destas parcelas foram delimitadas por chapas metálicas, localizadas no topo e laterais, e por calhas coletoras metálicas em seus limites inferiores. As calhas coletoras possuíam 1,50 m de largura e convergiam para uma saída de 3,00 polegadas de diâmetro. Amostras de enxurrada foram coletadas nestas calhas para quantificar as perdas de solo e água.

O esquema de distribuição das parcelas nas sub-áreas A₁ e A₂ é mostrado na Figura 1. As parcelas INC e IC foram numeradas de 1 a 10, através de um sorteio, para cada uma das duas sub-áreas. O mesmo procedimento foi adotado para as parcelas SNC e SC, porém numerando-as de 1 a 6. Na legenda da Figura 1 as letras de A a J apresentam os resultados do sorteio para INC e IC. A letra A indica o posicionamento das parcelas 10 INC e 10 IC, B o das parcelas 8 INC e 8 IC, C o das parcelas 6 INC e 7 IC, D o das parcelas 1 INC e 5 IC, E o das parcelas 3 INC e 6 IC, F o das parcelas 9 INC e 9 IC, G o das parcelas 7 INC e 4 IC, H o das parcelas 5 INC e 3 IC, I o das parcelas 4 INC e 2 IC e J o das parcelas 2 INC e 1 IC. Para SNC e SC a numeração obtida no sorteio foi a mesma, na ordem mostrada na Figura 1 (b).

O conjunto de parcelas para a determinação da erodibilidade em sulcos (Kr) constituíram-se de dois grupos de três sulcos paralelos, individuais pré-formados, com 9,00 m de comprimento e 0,20 m de profundidade, com secção parabólica, dispostos um de cada lado do simulador de chuvas (SMC), no sentido da declividade do terreno, conforme mostrado na Figura 1 (b). Os sulcos foram formados manualmente utilizando-se um enxadão. As laterais dos sulcos foram compostas por cristas laterais, originadas a partir da construção destes. O espaço entre os sulcos foi de 0,86 m, em média.

Como está mostrado na Figura 1 (b), na cabe-

ceira de cada grupo de três sulcos foi construído um pequeno reservatório (SDF), para o fornecimento de fluxos adicionais de água. Estes reservatórios, escavados no solo, tinham as dimensões de 1,50 m de largura, 1,00 m de comprimento e 0,35 m de profundidade, os quais foram revestidos com lona plástica. Cada reservatório possuía, ainda, três saídas de água individuais, em tubo PVC de 3,50 polegadas de diâmetro, uma para cada sulco.

Letras de A a J = posicionamento das parcelas intersulcos (INC e IC); SDF = reservatório para o fornecimento de fluxos adicionais de água; SMC = simulador de chuvas.

Figura 1. Distribuição das parcelas intersulcos e em sulcos, para os tratamentos INC e IC (a) e SNC e SC (b), na área de ação do simulador de chuvas (SMC).

No final de cada sulco as coletas de amostras de enxurrada foram facilitadas pelo uso de calhas coletoras, as quais possuíam 0,50 m de largura e convergiam para uma saída em tubo PVC de 3,50 polegadas de diâmetro.

3.5.2. Compactação

3.5.2.1. Resistência à penetração (RP)

Foi utilizado um penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF para se determinar a resistência à penetração. As determinações foram realizadas, na camada de 0 a 60 cm de profundidade, em nove pontos aleatórios das bordaduras de cada parcela intersulcos e de cada conjunto de três sulcos, pertencentes às sub-áreas A₁ e A₂, a fim de se evitar interferência nas determinações de perdas de solo e água.

O número total de pontos avaliados para se determinar a RP foi 108, ou seja, 9 pontos para cada uma das dez parcelas intersulcos e outros 9 para cada conjunto de três sulcos, em cada uma das duas sub-áreas (A₁ e A₂), respectivamente. Como o número de parcelas para determinações de K_i e K_r foi dez e seis, respectivamente, os 90 pontos avaliados nas parcelas intersulcos não compactados (INC) e os demais 18 dos sulcos não compactados (SNC), fo-

ram anotados designando-se os mesmos como pertencentes aos INC e SCN, na sub-área A₁, respectivamente. Este último procedimento foi, também, utilizado para os 108 pontos avaliados na sub-área A₂, denotando os pontos como pertencentes aos IC e SC, respectivamente. O objetivo principal destas denotações foi o de permitir o estabelecimento de uma matriz de correlação, com igual número de repetições, entre todas as propriedades físicas avaliadas nos intersulcos (INC e IC) e sulcos (SNC e SC), incluindo-se a RP.

As avaliações de resistência média do solo à penetração, em ambas sub-áreas, foram efetuadas em duas oportunidades. A primeira delas realizada momentos antes da comactação do solo da sub-área A₂, e a segunda efetuada após a compactação do solo da referida sub-área, três dias antes das simulações de chuvas.

3.5.2.2. Avaliação da umidade

Amostras deformadas foram coletadas nas bordaduras de cada uma das parcelas (intersulcos e sulcos, respectivamente), com auxílio de um trado, uma para cada um dos três diferentes intervalos de profundidades avaliados: 0-10, 10-20 e 20-30 cm. Tais amostras foram acondicionadas em recipientes de vidro previamente tarados e identificados.

Um total de quarenta e oito amostras foi coletado para cada tratamento: não compactado (sub-área A₁) e compactado (sub-área A₂).

As amostras para determinações de umidade do solo, nos mencionados intervalos de profundidades, também foram denotadas como INC e SNC (para a sub-área A₁) e, IC e SC (para a sub-área A₂). Este procedimento foi adotado, a exemplo das determinações de RP, para permitir uma análise conjunta, através de uma matriz de correlação entre todas as propriedades físicas do solo avaliadas, para áreas intersulcos (INC + IC) e em sulcos (SNC + SC).

As amostragens, para determinação da umidade do solo, foram efetuadas no dia em que se realizou a compactação do solo, quando das determinações de resistência à penetração e ainda, antes e após cada chuva simulada aplicada nos tratamentos não compactados (sub-área A₁) e compactados (sub-área A₂).

3.5.2.3. Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), volume de poros totais (VTP) e densidade (ds)

Amostras com estrutura natural, para determinação da Ma, Mi, VTP e ds foram coletadas, nas bordaduras de cada uma das parcelas (INC, SNC, IC e SC), através do uso de aneis volumétricos. Foi coletada uma amo

tra para cada um dos três diferentes intervalos de profundidades (0-10, 10-20 e 20-30 cm, respectivamente), o que levou a um total de quarenta e oito amostras coletadas para cada tratamento: não compactado (sub-área A₁) e compactado (sub-área A₂).

As amostras para fins de determinação da Ma, Mi, VTP e ds, para os mencionados intervalos de profundidades, também foram denotadas como INC e SNC (para a sub-área A₁) e, IC e SC (para a sub-área A₂). Este procedimento foi adotado, a exemplo das determinações de RP e umidade, para permitir uma análise conjunta, através de uma matriz de correlação entre todas as propriedades físicas do solo avaliadas, para áreas intersulcos (INC e IC) e em sulcos (SNC e SC), incluindo-se, também, Ma, Mi, VTP e ds.

3.5.3. Avaliação da erodibilidade intersulcos (K_i)

Foram efetuadas duas simulações de chuvas de aproximadamente 80,56 mm/h, em média, uma para cada metade das sub-áreas A₁ e A₂, no período de dezembro de 1992 a janeiro de 1993, para avaliar a erodibilidade intersulcos nos tratamentos INC e IC.

Amostragens para medidas de vazão de escoamento superficial, nos tratamentos INC e IC, foram realizadas no primeiro, no terceiro e no quinto minuto após

o início da enxurrada e, a partir daí, a cada cinco minutos até completar 1 hora. As amostras foram coletadas num balde plástico, cronometrando-se o tempo de coleta. Logo após as coletas os baldes foram fechados com tampas e conduzidos ao laboratório. Estas mesmas amostras foram utilizadas para a determinação da concentração de sedimentos.

3.5.4. Avaliação da erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos (Kr)

A avaliação da erodibilidade em sulcos foi efetuada em duas etapas, sendo a primeira constituída de uma chuva simulada, e a segunda de uma outra chuva simulada mais fluxos de água adicionais, para cada uma das sub-áreas A₁ e A₂, nos tratamentos SNC e SC, respectivamente.

3.5.4.1. Simulações de chuvas

Para cada uma das sub-áreas foi simulada uma chuva (C) de aproximadamente 54,79 mm/h, em média, no período de janeiro a fevereiro de 1993, nos tratamentos SNC e SC.

Amostragens para medidas de vazões dos escoamentos superficiais e das concentrações de sedimentos foram realizadas no primeiro, no terceiro e no quinto minuto após o início da enxurrada e a partir daí, a cada cinco

minutos até, a enxurrada atingir vazão constante, caracterizando uma condição de equilíbrio. As amostras foram coletadas em baldes plásticos, cronometrando-se o tempo de coleta. Logo após às coletas, os baldes foram fechados com tampas e conduzidos ao laboratório, para as determinações das vazões dos escoamentos superficiais e das concentrações de sedimentos.

3.5.4.2. Simulações de chuvas com fluxos adicionais de água

Após o procedimento descrito em 3.5.4.1. reiniciou-se a chuva, com a mesma intensidade anterior, até que a enxurrada atingisse valores de vazões próximos àqueles do equilíbrio atingido na fase precedente, em ambos os tratamentos SNC e SC. Após a enxurrada atingir o equilíbrio, diferentes fluxos adicionais de água limpa, à semelhança do descrito por WEST *et al.* (1992), foram aplicados diretamente nas cabeceiras dos sulcos, por meio de tubos provenientes de um pequeno reservatório (SDF) abastecido por um caminhão pipa. Estas aplicações tiveram duração de 30 minutos no total (chuva + fluxos adicionais). Os fluxos adicionais às chuvas, em média, foram de 11 L/min (F1), 39 L/min (F2) e 64 L/min (F3), aplicados, cada um, durante aproximadamente 10 minutos. Estes fluxos adicionais foram utilizados para promover uma variação no cisalhamento hi-

dráulico da enxurrada, como foi descrito por WEST *et al.* (1992). Amostras de enxurrada foram coletadas em baldes plásticos e as taxas de escoamento foram avaliadas cronometrando-se o tempo de coleta. Estas amostras foram encaminhadas ao laboratório para determinação das taxas de escoamento superficial e da concentração de sedimento. As amostragens foram realizadas no primeiro, no terceiro e no quinto minuto após o início da enxurrada e a partir daí, à cada 5 minutos, até completar 30 minutos.

3.5.4.3. Avaliação do cisalhamento hidráulico

A avaliação do cisalhamento hidráulico nos sulcos foi realizada através de medidas das secções transversais dos sulcos, próxima do final da chuva (C) e durante a aplicação de chuva mais fluxos adicionais (C + F1, C + F2 e C + F3), utilizando-se um perfilômetro. Este aparelho permitiu a reprodução da secção transversal dos sulcos numa tela, graduada de 5,00 em 5,00 cm, com 1,50 m² de área, acoplada ao fundo do perfilômetro constituído por uma armação de canos de ferro com 1,00 polegada de diâmetro.

A reprodução da área da secção transversal do sulco foi feita pela ação livre de 102 hastes de alumínio, com 3,00 mm de diâmetro, com ponteiros de 7,00 mm,

dispostas verticalmente em três travessas de alumínio reguláveis, com 102 perfurações centradas entre elas de aproximadamente 5,00 mm de diâmetro, acopladas à armação de canos descrita acima. Para a reprodução do perfil da secção transversal de cada sulco, duas travessas foram ajustadas e fixadas nas partes inferior e superior da armação de canos, em função da topografia do terreno, e a terceira travessa ficou móvel entre estas duas. Inicialmente, a travessa móvel foi suspensa levando consigo as hastes de alumínio e, posteriormente, baixadas lentamente para que as hastes vagarosamente descessem por gravidade. Com o contacto das hastes verticais com a superfície do solo, estas foram lentamente parализando os seus movimentos, devido à resistência oferecida pelo solo, e as ponteiros formaram, então, na tela do perfilômetro um gráfico representativo da secção transversal de cada um dos sulcos analisados.

Duas posições, nos sulcos, foram utilizadas para se realizar as medidas de secções transversais: a 2,00 m da cabeceira (DCb) e a 2,00 m do final dos sulcos (DFs). Todas estas avaliações foram registradas em diapositivos, utilizando-se duas câmaras fotográficas de 35 mm, para posteriores medições, em laboratório, das áreas, dos perímetros molhados, dos raios hidráulicos das secções transversais dos sulcos obtidas, com as chuvas simuladas e fluxos de água adicionais aplicados. As câmaras fotográficas, fixas em tripés, foram instaladas a 5,00 m das cabeceiras

das cabeceiras de cada conjunto de três sulcos; sendo que uma foi utilizada para fotografar os sulcos situados à esquerda e, a outra, os localizados à direita do simulador de chuvas.

3.5.4.4. Velocidades de escoamento superficial nos sulcos

As velocidades do escoamento superficial (v), nos sulcos, foram determinadas utilizando-se, como corante, o azul de metileno, cronometrando-se o tempo necessário para que este percorresse 5,00 m do comprimento dos canais (DCb até DFs). As avaliações das velocidades dos escoamentos superficiais foram realizadas momentos antes das medições das secções transversais dos sulcos.

Posteriormente, no laboratório, as velocidades obtidas permitiram a determinação das áreas de secções transversais correspondentes aos escoamentos obtidos, quando das aplicações de chuvas simuladas nos tratamentos SNC e SC.

Os resultados de campo permitiram, no laboratório, estimar as taxas de erosão em sulcos (D_r) e inter-sulcos (D_i), as erodibilidades (K_i e K_r) e o cisalhamento hidráulico (T_c).

3.6. Procedimentos de laboratório

3.6.1. Análises físicas do solo

3.6.1.1. Densidade real (Dr)

A densidade real do solo foi determinada, em amostras coletadas, como descrito no item 3.2., utilizando-se o método do picnômetro, segundo BLAKE (1965).

3.6.1.2. Resistência à penetração

Os resultados obtidos com a utilização de um penetrômetro de impacto, foram avaliados e tabulados segundo metodologias propostas por STOLF *et al.* (1983) e STOLF (1991).

3.6.1.3. Umidade

Determinou-se a umidade do solo, nas amostras coletadas no campo, gravimetricamente, em estufa com circulação forçada mantida a 105 °C, com os resultados sendo expressos percentualmente, em relação ao peso seco das amostras.

3.6.1.4. Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e volume de poros totais (VTP)

A Ma, Mi e VTP foram determinados pelo método da mesa de tensão descrito por KIEHL (1979), utilizando-se as amostras coletas no campo descritas no item 3.5.2.3.

3.6.1.5. Densidade (ds)

A densidade do solo foi determinada utilizando-se amostras indeformadas, coletadas como descrito no item 3.5.2.3., secas em estufas a 105 °C, após as avaliações de Ma, Mi e VTP.

3.6.2. Determinação das perdas de solo e água

O volume da solução das amostras coletadas, para cada chuva, foi avaliado gravimetricamente, levando-se em consideração a densidade da água e a do sedimento erodido, de acordo com PEREIRA (1979). Cada volume determinado foi dividido pelo tempo de cronometragem no instante da coleta, obtendo-se a vazão de enxurrada (Q) em cada instante.

Tendo-se o valor da vazão de enxurrada, em

cada instante, determinou-se a taxa de infiltração de água no solo para os tratamentos INC e IC. A infiltração de água no solo foi estabelecida por simples diferença entre a chuva aplicada e a vazão de água obtida na calha coletora, conforme descrito por MARTINS FILHO (1987).

As amostras levadas ao laboratório para determinação da concentração de sedimentos e água foram pesadas em balança, com resolução de 0,01g, e, em seguida, acondicionadas em recipientes de vidro previamente tarados e levadas à uma estufa a 105 °C até secagem completa. Após a secagem estas amostras foram novamente pesadas, determinando-se o peso do sedimento de cada amostra.

A concentração de sedimentos foi obtida considerando-se, a exemplo do volume da solução, a densidade da água e do sedimento na solução (dr), conforme o descrito por VANONI (1975).

3.7. Processamento dos dados

3.7.1. Cálculo das intensidades das precipitações produzidas pelo simulador de chuvas

O cálculo das intensidades de precipitações foi realizado utilizando-se equações descritas por PEREIRA & MOLINA (1986). As equações propostas, no referido trabalho, foram analisadas numa planilha de cálculos (LOTUS),

num computador PC .

Para o estabelecimento das equações e a solução destas, numa planilha de cálculos, um programa em BASIC descrito por MARTINS FILHO (1987) foi utilizado como base.

3.7.2. Avaliações da taxa de erosão (D_i) e da erodibilidade intersulcos (K_i)

Tendo-se quantificado o sedimento erodido em gramas por segundo , para cada amostragem feita, a taxa de erosão intersulcos (D_i) foi determinada dividindo-se cada um dos valores obtidos pela área de cada parcela. Os quatro últimos valores de D_i , para cada parcela dos tratamentos INC e IC, foram os utilizados, como o recomendado por ELLIOT *et al.* (1989). Nos casos em que um dos quatro últimos valores foi muito diferente dos demais, apenas os três valores mais próximos foram utilizados.

A erodibilidade intersulcos (K_i) foi calculada utilizando-se a equação proposta por ELLIOT *et al.* (1989):

$$K_i = D_i / (I^2 S_f) \quad [3.1]$$

onde,

K_i = erodibilidade intersulcos (kg s m^{-4});

D_i = taxa de erosão intersulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$);

I = intensidade de chuva (m s^{-1});

$S_f = 1,05 - 0,85 e^{(-4 \sin \theta)}$;

θ = ângulo do declive em graus.

3.7.3. Obtenção das áreas (a), perímetros molhados (Pm), raios hidráulicos (rh) e cisalhamentos hidráulicos (T) das secções transversais dos sulcos

Para a obtenção de áreas e perímetros molhados das secções transversais dos sulcos os diapositivos, obtidos fotografando-se o perfilômetro, foram projetados numa tela de papel vegetal milimetrado, e as imagens destas secções desenhadas no referido papel. As escalas dos desenhos, oriundos das projecções, foram de 1:7, correspondentes às posições DCb e 1:10 relativas às posições DFs. Graficamente determinou-se áreas para diferentes alturas. Correlações lineares foram obtidas, posteriormente, entre áreas (a) e perímetros molhados (Pm) correspondentes, para cada foto tirada dos sulcos SNC e SC. Da mesma forma, foram estabelecidas correlações entre áreas (a) e larguras (Lr).

Com os resultados de vazão (Q) e velocidade do escoamento superficial (v) foi calculada a área de secção transversal dos sulcos (a) ocupada pela enxurrada, no

instante em que as medidas das secções de cada sulco foram realizadas com o perfilômetro e registradas, conforme a equação:

$$a = Q / v \quad [3.3]$$

onde,

a = área secção transversal do sulco (m^2);

Q = vazão ($m^3 s^{-1}$);

v = velocidade do escoamento superficial ($m s^{-1}$).

Tendo-se as áreas das secções transversais do sulcos (a) determinou-se os perímetros molhados (P_m), conforme a equação:

$$R_h = a / P_m \quad [3.4]$$

onde,

R_h = raio hidráulico (m);

a = área de secção transversal do sulco (m^2);

P_m = perímetro molhado (m).

Assim, utilizando-se a equação [3.4] calculou-se os raios hidráulicos correspondentes a cada uma das áreas de secções transversais (a) e perímetros molhados (P_m) correspondentes.

O cisalhamento hidráulico (T) foi calculado, para as referidas áreas de secções transversais (a), utilizando-se uma equação proposta por ELLIOT *et al.* (1989):

$$T = Y_w R_h S \quad [3.5]$$

onde,

Y_w = peso específico da água ($N\ m^{-3}$);

R_h = raio hidráulico (m);

S = razão de declive.

3.7.4. Sedimento destacado das áreas intersulcos dos sulcos (E)

A contribuição de sedimento destacado nas áreas intersulcos (E), em gramas por segundo por metro quadrado de sulco, foi determinada utilizando-se a seguinte equação proposta por ELLIOT *et al.* (1989):

$$E = D_i [(ES - L_r) / L_r] \quad [3.6]$$

onde,

E = contribuição intersulcos para os sulcos ($g\ s^{-1}\ m^2$);

D_i = taxa de erosão intersulcos ($g\ s^{-1}\ m^2$);

ES = espaço entre os sulcos (m);

Lr = largura dos sulcos (m).

3.7.5. Avaliação da taxa de erosão intra-sulcos ou em sulcos (Dr)

A taxa de erosão intra-sulcos ou em sulcos (Dr), em gramas por segundo por metro quadrado, foi obtida dividindo-se o sedimento, em gramas por segundo, pelo produto entre o Pm e o comprimento do sulco e então, subtraindo-se a contribuição intersulcos (E). No caso, o comprimento dos sulcos foi de 9,00 m.

3.7.6. Avaliação do cisalhamento hidráulico crítico (Tc) e da erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos (Kr)

Para a determinação da erodibilidade em sulcos (Kr) e do cisalhamento hidráulico crítico (Tc) foi estabelecida uma função linear, como foi descrito por ELLIOT *et al.* (1989), entre taxa de erosão em sulcos (Dr) e cisalhamento hidráulico (T), com base na equação [3.7] descrita a seguir:

$$Kr = Dr / (T - Tc) \quad [3.7]$$

Onde,

K_r = erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos ($s\ m^{-1}$);

D_r = taxa de erosão intra-sulcos ou em sulcos ($kg\ s^{-1}\ m^{-2}$);

T = cisalhamento hidráulico ($N\ m^{-2}$);

T_c = cisalhamento hidráulico crítico ($N\ m^{-2}$).

Uma vez obtidas as regressões lineares, entre D_r e T , foram estabelecidos os valores de T_c e K_r , para SNC e SC. O cisalhamento hidráulico crítico (T_c) foi determinado como sendo o ponto de intersecção da relação linear entre D_r e T , conforme foi descrito por LAFLEN *et al.* (1987). Com base, ainda, nos mesmos autores o coeficiente angular, desta mesma relação, foi tomado como sendo a erodibilidade em sulcos (K_r).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Solo

O solo foi identificado e classificado como sendo um Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa distrófico. Sua descrição morfológica é apresentada no Apêndice A. Os resultados das análises químicas e granulométricas realizadas, utilizando-se amostras coletadas nos horizontes do perfil do solo, estão apresentados nos Quadros 1A e 2A.

4.2. Umidade e resistência à penetração, em valores médios, antes da compactação

Os resultados quanto à umidade média do solo, nas sub-camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm e na camada de 0-30 cm de profundidade, para as sub-áreas A₁ (INC + SNC) e A₂ (IC + SC), quando da avaliação da resistência média dege te à penetração na área experimental A, momentos antes da realização da compactação do solo da sub-área A₂, estão re-

presentados na Figura 2. A umidade média do solo, na camada 0-30 cm de profundidade, foi de 12,03 %, com coeficiente de variação de 0,59 % e desvio padrão de 0,07 %. Os resultados demonstraram que as condições para compactação do solo, na sub-área A2, foram bem uniformes nas subcamadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade.

Figura 2. Umidade média do solo para a área experimental A, quando da avaliação da resistência à penetração.

A Figura 3 representa a resistência média do solo à penetração obtida na área experimental A, momentos

antes de se compactar o solo da sub-área A₂ (RPAC). O maior valor de resistência à penetração foi encontrado a 30 cm (17,88 kgf/cm²), na camada de 0-30 cm de profundidade.

Figura 3. Resistência média do solo à penetração, para a área experimental A, momentos antes de se compactar a sub-área A₂ (RPAC).

4.3. Parâmetros físicos avaliados após a compactação

Os valores médios obtidos quanto à macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), volume de poros totais (VTP) e densidade do solo (ds), nas sub-camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade, para os tratamentos

não compactados (NC = INC + SNC, sub-área A₁) x compactados (C = IC + SC, sub-área A₂), encontram-se nas Figuras 4, 5, 6 e 7, respectivamente.

Figura 4. Macroporosidade média do solo para os tratamentos não compactados (NC) e compactados (C).

A macroporosidade média, em geral, foi significativamente maior nos tratamentos NC, comparativamente aos C, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade, conforme pode ser observado na Figura 4.

Quanto à microporosidade média, não houve diferenças significativas, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, para NC vs. C (Figura 5). Isto pode ter ocorrido

por uma diminuição do diâmetro médio dos macroporos, os quais se transformaram em microporos, com a compactação do solo. Esta última observação concorda com os resultados obtidos por SILVA *et al.* (1986) e NUERNBERG *et al.* (1986).

Figura 5. Microporosidade média do solo para os tratamentos não compactados (NC) e compactados (C).

Os valores de volume de poros totais (VTP), também, diferiram significativamente, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, em média na camada de 0-30 cm de profundidade, para NC vs. C (Figura 6).

Figura 6. Volume médio de poros totais do solo para os tratamentos não compactados (NC) e compactados (C).

Comportamento semelhante ao VTP foi observado para a densidade média do solo (d_s), a qual, também, diferiu significativamente, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, em média, na camada de 0-30 cm de profundidade, para NC vs. C (Figura 7), reforçando as informações obtidas com as análises dos resultados relativos à porosidade.

Figura 7. Densidade média do solo para os tratamentos não compactados (NC) e compactados (C).

Os tratamentos C (IC + SC), com a intensificação de tráfego sobre o solo, sofreram um acréscimo médio de $0,12 \text{ g/cm}^3$ na densidade do solo, na camada de 0-30 cm de profundidade, quando comparados aos NC (INC + SNC). Isto representou um decréscimo médio de 56 % na macroporosidade e de 8,5 % no volume de poros totais do solo, na referida camada. Estes resultados concordam com os obtidos por VOORHEES & LINDSTRON (1984) e WAGGER & DENTON (1989).

Os trabalhos de MIRREH & KETCHESON (1973),

VOORHEES et al. (1978) e BELTRAME et al. (1981) demonstraram que para um aumento na densidade ocorre um outro na resistência do solo à penetração.

Os resultados de resistência média do solo à penetração, avaliados três dias antes das aplicações de chuvas simuladas, para os tratamentos NC e C, são apresentados no Quadro 1.

As resistências médias do solo à penetração, avaliadas três dias antes das simulações de chuvas, individualizadas para intersulcos e sulcos, não compactados e compactados, ou seja, INC, SNC, IC e SC, na camada de 0-60 cm de profundidade, são apresentadas no Quadro 1B, respectivamente.

O tratamento NC apresentou o maior valor de resistência média do solo à penetração de 20-22 cm (18,89 Kgf/cm²) e o tratamento C de 4-6 cm de profundidade (50,46 kgf/cm²), na camada de 0-30 cm, respectivamente.

Quadro 1. Resistência média do solo à penetração (RP), para os tratamentos não compactados (NC) e compactados (C).

Profundidade	Não compactado (NC)	Compactado (C)
cm	----- Kg/cm ² -----	
0 - 2	5,70 a	6,45 a
2 - 4	6,39 b	43,05 a
4 - 6 *	14,64 b	<u>50,46</u> a
6 - 8	16,43 b	31,53 a
8 - 10	16,81 b	36,28 a
10 - 12	17,75 b	31,53 a
12 - 14	17,94 b	30,64 a
14 - 16	17,89 b	30,58 a
16 - 18	18,65 a	29,99 a
18 - 20	18,45 b	30,85 a
20 - 22 *	<u>18,89</u> b	32,63 a
22 - 24	18,56 b	31,86 a
24 - 26	18,42 b	30,08 a
26 - 28	18,14 b	27,88 a
28 - 30	18,48 b	26,97 a
30 - 32	18,44 b	25,56 a
32 - 34	18,52 b	24,60 a
34 - 36	18,04 b	23,44 a
36 - 38	17,32 b	23,24 a
38 - 40	16,93 b	22,48 a
40 - 42	16,14 b	21,30 a
42 - 44	14,98 b	20,63 a
44 - 46	14,73 b	19,64 a
46 - 48	14,29 b	18,77 a
48 - 50	14,26 b	18,57 a
50 - 52	14,06 b	17,99 a
52 - 54	14,24 b	17,84 a
54 - 56	15,54 b	17,92 a
56 - 58	16,29 a	17,92 a
58 - 60	16,61 b	18,55 a

* = Profundidade com RP máxima;

_____ = RP máxima;

Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Cabe salientar, no entanto, que a camada referencial, para comparações entre propriedades físicas do solo, foi a de 0-30 cm de profundidade, uma vez que Ma, Mi, VTP e ds foram determinadas para a referida camada. Daí o fato de, no Quadro 1, ter-se avaliado a RP máxima na referida camada.

A Figura 8 mostra a distribuição da resistência média do solo à penetração, em função da profundidade, três dias antes das simulações de chuvas, para os tratamentos NC e C, comparativamente à condição média geral da área experimental A obtida três meses antes (RPAC), por ocasião da compactação do solo da sub-área Az.

A análise da Figura 8 permitiu observar que os tratamentos NC apresentaram maiores valores de resistência média à penetração (RP máxima), nas sub-camadas de 4-14 cm e 18-22 cm de profundidade, três dias antes das simulações de chuva, quando comparados à condição RPAC na qual a RP máxima ocorreu a 17,88 kgf/cm² a 30 cm de profundidade como relatado no item 4.2. Provavelmente, isto se deveu à consolidação do solo já que as avaliações de RP, na condição RPAC, foram realizadas 3 meses antes das demais.

BROWN et al. (1989) e WEST et al. (1992) atribuíram o aumento na densidade e resistência do solo à consolidação. Tal fato ocorre devido a estresses efetivos, induzidos por potenciais mátricos negativos, durante a redistribuição de umidade no perfil do solo após uma chuva

(NEARING et al., 1988). Como a realização dos trabalhos de campo coincidiu com o período mais chuvoso, com temperaturas médias elevadas, na região de Jaboticabal - SP, ou seja, setembro/1992 a fevereiro/1993, provavelmente, período este que talvez tenha proporcionado potenciais mátricos negativos, levando à ocorrência do fenômeno de consolidação do solo, num período de três meses após o seu preparo.

Figura 8. Resistência média do solo à penetração, na camada de 0-60 cm de profundidade, para os tratamentos NC e C, comparativamente à RPAC.

Fica evidente pelos resultados, que houve

tendência de maior resistência à penetração, nos tratamentos compactados (C), comparativamente aos não compactados (NC), na camada de 0-30 cm de profundidade.

As umidades do solo para os tratamentos NC e C, nas sub-camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade, são mostradas na Figura 9.

Figura 9. Umidade média do solo, para os tratamentos NC e C, quando das avaliações de resistência à penetração.

Nota-se que existiram diferenças significativas, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, entre as u-

midades médias, na profundidade de 0-30 cm, para NC e C. Os tratamentos NC e C apresentaram umidades médias, na referida camada, de 14,32% e 12,17%, respectivamente.

Quando se confronta densidade do solo (Figura 7), resistência à penetração (Figura 8) e umidade (Figura 9), na camada de 0-30 cm de profundidade, percebe-se que, um acréscimo médio de 9,23 % na densidade e um decréscimo médio de 12,15% na umidade, promoveram um aumento médio de 99,60 % na resistência média à penetração para os tratamentos C, em relação aos NC. BELTRAME et al. (1981) afirmaram que, para uma mudança na densidade de um Planossolo e/ou de um Latossolo Vermelho-Escuro, ocorre uma mudança da resistência à penetração, no mesmo sentido. Estes mesmos autores afirmaram, ainda, que para uma variação na umidade do solo, ocorre uma variação, em sentido contrário, na resistência à penetração. VOORHEES et al. (1978), embora tenham trabalhado com um solo franco - argilo - silteoso, observaram que a resistência à penetração foi um indicador mais sensível da compactação do solo, que a densidade, quando compararam áreas não trafegadas com áreas trafegadas.

Em função do exposto, pode-se inferir que a resistência à penetração foi um bom indicador da compactação do solo.

Através dos resultados apresentados fica evidente que os tratamentos compactados (C), na sub-área A₂,

sofreram significativas modificações em suas propriedades físicas, devido à intensificação de tráfego sobre o solo desta sub-área, comparativamente aos demais (NC) da sub-área A₁. VOORHES *et al.* (1978) afirmam que o tráfego, por rodas de maquinaria agrícola, pode alterar significativamente as propriedades físicas do solo, confirmando pois, o que foi observado no presente estudo.

4.4. Simulações de chuva e infiltração de água

As intensidades de chuvas obtidas para as simulações desenvolvidas nos tratamentos INC / IC e SNC / SC, em função do lado ocupado pelas parcelas intersulcos e em sulcos, em relação ao simulador (SMC), são apresentadas nos Quadros 2 e 3.

As análises estatísticas a exemplo de LIEBENOW *et al.* (1990) foram realizadas comparando-se as parcelas situadas à direita com as situadas à esquerda do SMC. Este procedimento foi adotado a fim de se verificar a uniformidade de distribuição das precipitações produzidas pelo simulador de chuvas, na sua área de ação. Isto se justifica, principalmente, para o caso das parcelas intersulcos, uma vez que a erodibilidade do solo, segundo LIEBENOW *et al.* (1990), é afetada pela intensidade de chuva.

Os tratamentos INC e IC apresentaram intensidades médias de chuvas de 54,00 mm/h e 103,25 mm/h, com

um C.V.(%) de 7,98 e 10,88, e desvio padrão de 4,31 mm/h e 11,74 mm/h, do lado esquerdo do SMC, respectivamente, (Quadro 2). Para os mesmos tratamentos, porém, do lado direito, as médias foram 57,09 mm/h e 107,88 mm/h, com um C.V.(%) de 8,28 e 7,58 e desvio padrão de 4,73 mm/h e 7,83 mm/h, respectivamente.

Quanto aos tratamentos SNC e SC, estes apresentaram intensidades de chuva médias de 56,59 mm/h e 53,40 mm/h, com um C.V.(%) de 5,57 e 0,82, e desvio padrão de 3,13 mm/h e 0,44 mm/h, do lado direito do SMC, respectivamente, (Quadro 3). Já para o lado esquerdo, para os mesmos tratamentos, as médias foram 55,54 mm/h e 53,93 mm/h, com C.V.(%) de 5,71 e 1,13, e desvio padrão de 3,17 mm/h e 0,61 mm/h, respectivamente.

As variações em intensidades de chuvas ocorridas entre os lados esquerdo (e) e direito (d), para os tratamentos INC / IC e SNC / SC, não diferiram significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Isto permite deduzir, que as chuvas aplicadas foram uniformemente distribuídas na área de ação do simulador de chuvas.

Quadro 2. Intensidades de chuvas para os tratamentos INC e IC e a localização de cada parcela em relação ao simulador de chuvas.

Intersulcos não compactados (INC)				Intersulcos compactados (IC)			
Parcela	I	Parcela	I	Parcela	I	Parcela	I
	mm/h		mm/h		mm/h		mm/h
1 (e)	59,90	2 (d)	60,40	1 (d)	94,81	5 (e)	116,62
3 (e)	49,43	4 (d)	48,53	2 (d)	108,98	6 (e)	96,31
6 (e)	54,40	5 (d)	55,50	3 (d)	94,17	7 (e)	99,44
8 (e)	48,92	7 (d)	59,68	4 (d)	120,33	8 (e)	96,39
10 (e)	57,37	9 (d)	61,34	9 (d)	121,08	10 (e)	107,49
Média	54,00 a		57,09 a		107,88 A		103,25 A
C.V.(%)	7,98		8,28		10,88		7,58
D. padr.	4,31		4,73		11,74		7,83

e = localização à esquerda do simulador de chuvas;

d = localização à direita do simulador de chuvas;

C.V.(%) = coeficiente de variação;

D. padr. = desvio padrão;

Letras minúsculas, comparações dentro de INC e maiúsculas para comparações dentro de IC;

Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Quadro 3. Intensidades de chuvas para os tratamentos SNC e SC e a localização de cada parcela em relação ao simulador de chuvas.

Sulcos Não compactados (SNC)				Sulcos compactados (SC)			
Sulco	I	Sulco	I	Sulco	I	Sulco	I
	mm/h		mm/h		mm/h		mm/h
1 (d)	52,48	4 (e)	54,24	1 (d)	53,24	4 (e)	54,47
2 (d)	60,15	5 (e)	59,91	2 (d)	54,00	5 (e)	54,23
3 (d)	56,22	6 (e)	52,48	3 (d)	52,97	6 (e)	53,08
Média	56,29 a		55,54 a		53,40 A		53,92 A
C.V.(%)	5,57		5,71		0,82		1,13
D. padr.	3,13		3,17		0,44		0,61

e = localização à esquerda do simulador de chuvas;

d = localização à direita do simulador de chuvas;

C.V.(%) = coeficiente de variação;

D. padr. = desvio padrão;

Letras minúsculas, comparações dentro de INC e maiúsculas para comparações dentro de IC;

Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

As umidades médias do solo, antes das aplicações de chuvas simuladas nos tratamentos INC / IC e SNC / SC, nas sub-camadas de 0-10, 10-20, 20-30 cm e na camada de 0-30 cm de profundidade, estão apresentadas nos Quadros 4 e 5, respectivamente.

Para os tratamentos INC e SNC a umidade média do solo não diferiu significativamente, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, entre as sub-camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, antes das aplicações de chuvas simuladas. Porém, no tratamento INC existiram diferenças significativas entre as sub-camadas de 10-20 e 20-30 cm de profundidade. Já no SNC houve diferenças significativas entre as sub-camadas 0-20 e 20-30 cm de profundidade. Quanto aos tratamentos IC e SC, antes das simulações de chuvas, não foram observadas diferenças significativas nas profundidades avaliadas.

Pelos resultados, pode-se inferir que as condições iniciais de umidade do solo foram uniformes, para a camada de 0-30 cm de profundidade, quando das realizações de chuvas simuladas, tanto no tratamento IC como no SC. Já os tratamentos INC e SNC, apresentaram umidades uniformes apenas na sub-camada de 0-20 cm de profundidade.

Após a realização das chuvas simuladas constatou-se, na camada de 0-30 cm de profundidade, um significativo acréscimo médio na umidade do solo: 2,49 % para INC, 3,38 % para IC, 2,41 % para SNC e 3,36 % para SC

(Quadros 4 e 5).

Quadro 4. Umidade média do solo, anterior às simulações de chuvas, para os tratamentos INC e IC.

Prof.	INC		IC	
	Antes	Após	Antes	Após
cm	----- % -----			
0-10	16,61 a	19,95 a	11,88 a	15,57 a
10-20	17,17 a	19,45 ab	11,78 a	15,43 a
20-30	16,00 b	17,87 b	12,51 a	15,31 a
Média	16,60 B	19,07 A	12,06 B	15,44 A
C.V.(%)	3,55	5,69	3,28	0,84
D. padr.	0,59	1,09	0,40	0,13

Prof. = profundidade;

Letras minúsculas comparações entre profundidades, em cada situação, antes e após, para INC e IC, respectivamente;

Letras maiúsculas comparações entre as médias antes e após, para INC e IC, respectivamente;

C.V.(%) = coeficiente de variação;

D. padr. = desvio padrão.

Quadro 5. Umidade média do solo, anterior às simulações de chuvas, para os tratamentos SNC e SC.

Prof.	SNC		SC	
	Antes	Após	Antes	Após
cm	----- % -----			
0-10	15,55 b	19,69 a	12,21 a	16,95 a
10-20	15,79 b	18,20 b	12,41 a	15,46 ab
20-30	16,41 a	17,11 c	12,47 a	14,76 b
Média	15,92 B	18,33 A	12,36 B	15,72 A
C.V.(%)	2,79	7,07	1,10	7,12
D. padr.	0,44	1,30	0,14	1,12

Prof. = profundidade;

Letras minúsculas comparações entre profundidades, em cada situação, antes e após, para SNC e SC, respectivamente;

Letras maiúsculas comparações entre as médias antes e após, para SNC e SC, respectivamente;

C.V.(%) = coeficiente de variação;

D. padr. = desvio padrão.

As condições iniciais, em termos de umidade média do solo, parecem ter proporcionado um gradiente mais favorável à uma redistribuição mais uniforme de umidade, no tratamento IC que no INC, na camada de 0-30 cm de profundidade (Quadro 4). No caso do tratamento INC, já existiam condições significativamente diferentes de umidade média do solo nas sub-camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de pro-

fundidade, antes da simulação de chuva. Nos demais tratamentos as redistribuições apresentadas, provavelmente, ocorreram, também, em função das condições físicas peculiares de cada área, após as chuvas aplicadas.

Os valores de umidade obtidos após a realização de chuvas simuladas, nos tratamentos INC, IC, SNC e SC, não podem ser considerados como valores de umidade de saturação do solo. Isto se deve ao fato das amostragens terem sido realizadas 24 horas após a ocorrência dos eventos. Assim, é provável que os valores de umidade de saturação devam ter sido superiores aos obtidos.

As curvas ajustadas mostradas na Figura 10 representam as taxas de infiltração média de água no solo, em mm/h, durante a realização de cada uma das chuvas aplicadas nos intersulcos não compactados e compactados, respectivamente.

Para INC e IC as correlações estabelecidas para representar a taxa de infiltração de água no solo, em função do tempo, foram $y = 35,01854 x^{-0.1194828}$ ($R^2 = 0,44^{**}$) e $y = 59,19365 x^{-0.1880517}$ ($R^2 = 0,89^{**}$), respectivamente. Ambas correlações apresentaram coeficientes de correlação negativos e significativos ao nível de 1% de probabilidade (**).

Nota-se, ainda, pela Figura 10, que a aplicação das chuvas simuladas, promoveu, no início destas, uma infiltração rápida de água nos dois tratamentos (INC e IC),

devido ao estado relativamente seco do solo no momento de aplicação das chuvas. Pode-se observar, que as taxas de infiltração de água passaram a diminuir acentuadamente e, com relativa uniformidade, a partir do décimo quinto minuto. Com o umedecimento do perfil do solo, a taxa de infiltração decresceu em ambos os tratamentos. ROSE (1962) e RESCK et al. (1981) observam que isto ocorre devido a uma diminuição no gradiente hidráulico, entre as camadas superiores e subjacentes, com o umedecimento do perfil do solo.

Figura 10. Taxas de infiltração média de água no solo, avaliadas nos tratamentos INC (■) e IC (*).

A Figura 10 evidencia, ainda, que o tratamento IC se manteve, durante a realização da chuva simulada, com taxa de infiltração mais elevada que o INC. Provavelmente, a umidade média do solo, na camada de 0 a 30 cm de profundidade, antecedente à chuva simulada, tenha influenciado a referida taxa, uma vez que o tratamento IC possuía umidade significativamente menor que a do INC (Quadro 1C). Segundo BERTONI & LOMBARDI NETO (1985), a umidade do solo no início da chuva afeta, significativamente, a capacidade de infiltração de água.

4.5. Erodibilidade intersulcos (Ki)

O valor Ki, erodibilidade intersulcos, foi determinado para as chuvas aplicadas nos tratamentos INC e IC. Os resultados obtidos de erodibilidade intersulcos, para INC e IC, e os parâmetros utilizados em suas determinações são apresentados nos Quadros 6 e 7.

As taxas médias de erosão intersulcos, para INC e IC, foram obtidas utilizando-se condições diferentes tanto de intensidades de chuva e de solo (não compactado e compactado). Diversos trabalhos têm demonstrado a influência da intensidade de chuva e propriedades do solo na taxa de erosão intersulcos (FOSTER, 1982; LIEBENOW et al., 1990 e MEYER & HARMON, 1992). Em função do exposto, não foram realizadas comparações entre as taxas de erosão obtidas nos

INC e IC.

Os resultados obtidos, no tocante as taxas de erosão intersulcos, foram utilizados para o cálculo da erodibilidade intersulcos (K_i), considerando-se os efeitos do fator declive (sf) e da intensidade da chuva (I) como proposto por ELLIOT et al. (1989). O valor K_i expressa a susceptibilidade do solo ao destacamento e transporte pelo impacto das gotas d'água da chuva e, por um fino fluxo de água superficial (BAJRACHARYA et al., 1992). Assim, as únicas comparações realizadas quanto à erosão intersulcos, para INC e IC, foram com relação à erodibilidade intersulcos (K_i). Problemas técnicos de mau funcionamento dos manômetros, situados no braço e haste central do simulador, durante a simulação de chuva no tratamento IC, impediram que as intensidades médias de chuva fossem próximas ou semelhantes às mantidas no INC.

Não existiram diferenças significativas para as taxas de erosão (Quadro 1D), entre os lados esquerdo e direito do simulador, tanto para INC quanto para IC.

O valor K_i médio encontrado, para os intersulcos não compactados (INC), foi de $0,46 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, com desvio padrão de $0,13 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ e um coeficiente de variação de 28,73% (Quadro 6). Para os intersulcos compactados (IC), o valor K_i médio encontrado foi de $0,10 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, com desvio padrão de $0,03 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ e um coeficiente de variação de 30,51% (Quadro 7).

Quadro 6. Parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade intersulcos (K_i) e valores de K_i , em kg s m^{-4} , para o tratamento INC.

Parcelas	d	sf	I x 10 ⁵	Ap	Di x 10 ⁵	$K_i \times 10^{-6}$
	(%)		(m/s)	(m ²)	(kg/s/m ²)	(kg s/m ⁴)
1	10,00	0,48	1,66	0,75	4,05	0,31
2	9,20	0,46	1,68	0,75	3,05	0,24
3	9,20	0,46	1,37	0,74	3,94	0,45
4	10,00	0,48	1,35	0,75	6,49	0,75
5	10,00	0,48	1,54	0,75	5,55	0,49
6	10,00	0,48	1,51	0,72	5,32	0,49
7	10,00	0,48	1,66	0,73	6,41	0,49
8	10,50	0,49	1,36	0,75	3,51	0,39
9	10,00	0,48	1,70	0,73	6,20	0,45
10	9,90	0,48	1,59	0,75	6,81	0,56
Média	9,88	0,48	1,54	0,74	5,13	0,46
C.V (%)	3,99	1,98	9,05	1,53	25,54	28,73
D. padr.	0,39	0,01	0,14	0,01	1,31	0,13

d = declividade das parcelas;
 sf = fator declividade;
 I = intensidade de chuva;
 Ap = área da parcela;
 Di = taxa de erosão intersulcos;
 Ki = erodibilidade intersulcos.

Quadro 7. Parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade intersulcos (K_i) e valores de K_i , em kg s m^{-4} , para o tratamento IC.

Parcelas	d	sf	I x 10^5	Ap	Di x 10^5	K_i x 10^{-6}
	(%)		(m/s)	(m^2)	(kg/s/m^2)	(kg s/m^4)
1	11,00	0,50	2,63	0,74	4,60	0,13
2	9,00	0,46	3,03	0,74	3,18	0,08
3	11,20	0,51	2,62	0,73	2,19	0,06
4	8,20	0,44	3,34	0,73	5,64	0,12
5	10,00	0,48	3,24	0,72	7,58	0,15
6	10,00	0,48	2,68	0,68	3,96	0,12
7	10,00	0,48	2,76	0,71	3,05	0,08
8	10,00	0,48	2,68	0,74	3,75	0,11
9	10,00	0,48	3,36	0,69	3,35	0,06
10	10,00	0,48	2,99	0,75	2,86	0,07
Média	9,94	0,48	2,93	0,72	4,02	0,10
C.V (%)	8,64	3,98	9,70	3,21	37,33	30,51
D. padr.	0,86	0,02	0,30	0,02	1,50	0,03

d = declividade das parcelas;
 sf = fator declividade;
 I = intensidade de chuva;
 Ap = área da parcela;
 Di = taxa de erosão intersulcos;
 K_i = erodibilidade intersulcos.

Quanto aos resultados obtidos para K_i , nos tratamentos INC e IC, não se constatou diferenças signifi-

ficativas, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, entre lado esquerdo e direito, em relação ao centro do simulador (Quadro 2D). Isto evidencia que as condições para obtenção dos valores K_i foram uniformes, quando das aplicações de chuvas simuladas nos tratamentos INC e IC.

A análise conjunta dos resultados de K_i , para os tratamentos INC e IC, é apresentada no Quadro 8.

A análise do Quadro 8 permite observar que os intersulcos não compactados (INC), quando comparados aos intersulcos compactados (IC), apresentaram, em média, valor de erodibilidade intersulcos (K_i), significativamente maior, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

O menor valor médio de K_i para os intersulcos compactados (IC), provavelmente, se deveu às alterações físicas do solo motivadas pela sua compactação. O grau de compactação deve ter estabelecido uma maior manifestação das forças de adesão e coesão entre as partículas, o que proporcionou maior resistência do solo à sua desagregação pelo impacto das gotas d'água da chuva. Isto deve ter proporcionado um menor comprometimento da porosidade, na camada superficial do solo, nas parcelas IC, devido a uma obturação não muito intensa dos poros, o que favoreceu a infiltração de água (Figura 10).

PEREIRA (1989) afirmou que as partículas do solo, quando não se encontram agregadas, à medida que aumenta o teor de umidade, são mais facilmente lançadas longe

do local de origem, aumentando as perdas de solo por salpico até um certo limite, o que parece ter ocorrido nas parcelas INC.

ALLMARAS et al. (1967) demonstraram existir dois efeitos da compactação: a mudança na porosidade atual dos torrões, e a tendência de solos compactados produzirem torrões maiores e rugosidade aleatória durante o cultivo. MOLDENHAUER et al. (1967) sugeriram que o aumento do tamanho dos torrões mantém a infiltração alta por um longo período, e deste modo, reduzem a erosão total. LYLES et al. (1969) observaram que torrões pequenos de solo são mais susceptíveis à desintegração pelo impacto das gotas d'água, que os torrões maiores. JORGE (1986) comenta que a faixa do solo que recebe certa compactação, por rodas de trator, dá origem a torrões grandes, os quais dificultam a pulverização do solo pelo impacto das gotas d'água da chuva. O mesmo autor relata, ainda, que este efeito é mais acentuado nos solos argilosos.

Os resultados obtidos neste trabalho são comparáveis aos obtidos por MARTINS FILHO et al. (1992). Os citados autores, observaram que quando há a compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro, até a sua superfície, ocorre um aumento na sua resistência à erosão. Verificaram, ainda, que o solo é menos resistente à erosão, quando o preparo deste promove a formação de uma camada solta sobre uma compactada.

Quadro 8. Análise de variância para as erodibilidades intersulcos (K_i), em kg s m^{-4} , obtidas para os intersulcos não compactados (INC) e compactados (IC).

Blocos											
Tratamentos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
----- $K_i \times 10^{-6}$ -----											
INC	0,31	0,24	0,45	0,75	0,49	0,49	0,49	0,39	0,45	0,56	0,46 A
IC	0,13	0,08	0,06	0,12	0,15	0,12	0,08	0,11	0,06	0,07	0,10 B
Análise de variância do experimento											
Causas de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F							
Blocos	9	9,22	1,0246	1,04 ns							
Tratamentos	1	66,9451	66,9451	68,10 **							
Resíduo	9	8,8473	0,9830								
Total	19	85,0136									

Desvio padrão = 0,9915 Erro padrão da média = 0,3135

Média geral = 0,28 Coeficiente de variação = 35,81

ns = não significativo; ** = significativo a 1 % de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Pelo exposto e ao se observar o Quadro 1 e

a Figura 8, nota-se que os intersulcos compactados apresentavam significativo aumento na resistência do solo à penetração, a 4 cm de profundidade, comparativamente aos intersulcos não compactados. Isto, provavelmente, contribuiu para a ocorrência de um menor valor K_i nos intersulcos compactados.

BRADFORD et al. (1987a) observaram que um decréscimo da porosidade e um aumento na resistência do solo, em sua camada superficial, resulta em menores perdas de solo por erosão intersulcos.

É possível inferir, através dos resultados expostos, que numa condição de elevada resistência do solo à penetração, em sua camada superficial, este é menos susceptível à erosão intersulcos. Também é possível verificar que, quando o solo se encontra recentemente cultivado, sem a presença de uma camada superficial de elevada resistência, o impacto é especialmente responsável pela taxa de solo desalojado pela queda das gotas d'água da chuva. Esta última observação concorda com conclusões apresentadas por LATTANZI et al. (1974). Portanto, o maior valor médio de K_i , nos intersulcos não compactados, é apenas um reflexo das condições físicas do solo após seu preparo. Possivelmente, o preparo tenha dado origem a torrões menores e mais susceptíveis à erosão por impacto.

4.6. Correlações entre parâmetros físicos do solo para os tratamentos INC e IC.

No Quadro 9 são apresentados a matriz de correlação de Pearson, bem como os coeficientes de determinação estabelecidos entre os parâmetros físicos do solo avaliados nos tratamentos INC e IC.

A macroporosidade correlacionou-se positivamente, a 1% de probabilidade, com VTP, unidade quando das avaliações de RP (U0), unidade antecedente às simulações (U1), unidade após às simulações (U2) e Ki. Houve, ainda, correlação significativamente negativa para Ma vs. ds e Ma vs. RP.

Quanto à microporosidade, esta se correlacionou positivamente com VTP e negativamente com a ds, a 1% de probabilidade. Não existiu correlação significativa entre Mi e RP, U0, U1, U2 e Ki.

O VTP se correlacionou positivamente e significativamente com U1, U2 e Ki, a 1%, 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

As correlações VTP vs. ds e VTP vs. RP foram negativas e, significativas a 1% de probabilidade. VTP vs. U0 se correlacionaram positivamente, a 1% de probabilidade.

A densidade do solo (ds) e a resistência à penetração (RP) se correlacionaram positiva e significativamente, o que está de acordo com resultados obtidos por

BELTRAME *et al.* (1981). Porém , ambas se correlacionaram negativamente com as demais propriedades de maneira significativa.

Quadro 9. Matriz de correlação de Pearson para os parâmetros físicos avaliados nos tratamentos INC e IC.

	Ma	Mi	VTP	ds	RP	U0	U1	U2	Ki
Ma	1,00 **								
Mi	0,26 NS	1,00 **							
VTP	0,74 **	0,84 **	1,00 **						
ds	-0,74 **	-0,84 **	-1,00 **	1,00 **					
RP	-0,79 **	-0,25 NS	-0,62 **	0,62 **	1,00 **				
U0	0,80 **	-0,01 NS	0,44 **	-0,44 *	-0,71 **	1,00 **			
U1	0,86 **	0,08 NS	0,54 **	-0,54 **	-0,85 **	0,97 **	1,00 **		
U2	0,87 **	0,03 NS	0,51 *	-0,51 *	-0,81 **	0,91 **	1,00 **	1,00 **	
Ki	0,74 **	0,35 NS	0,66 **	-0,66 **	-0,88 **	0,68 **	0,79 **	0,76 **	1,00 **

Ma = macroporosidade;

Mi = microporosidade;

VTP = volume de poros totais;

ds = densidade do solo;

RP = resistência à penetração;

U0 = umidade quando das avaliações de RP;

U1 = umidade antecedente às simulações de chuva;

U2 = umidade após às simulações de chuva;

Ki = erodibilidade intersulcos;

*, ** e NS = significativo a 5%; a 1% e não significativo, pelo teste Qui-Quadrado, respectivamente.

No que se refere às umidades do solo, estas se correlacionaram positivamente, entre elas, a 1% de pro-

bilidade. Isto já era esperado, embora U_0 e U_1 tenham sido obtidas em épocas diferentes, uma vez que foram realizadas sempre na mesma área experimental.

Quanto a erodibilidade intersulcos (K_i) nota-se que a mesma se correlacionou positivamente com M_a , VTP , U_0 , U_1 e U_2 , a 1% de probabilidade. Para K_i vs. M_i não houve correlação significativa. As correlações K_i vs. d_s e K_i vs. RP foram negativas e significativas a 1% de probabilidade, o que concorda com as conclusões apresentadas por BRADFORD *et al.* (1987b).

Os resultados apresentados no Quadro 9, corroboram a idéia de que a compactação do solo, por tráfego de veículos com rodas, pode alterar, significativamente, propriedades físicas do solo (FLOCKER *et al.*, 1958; MIRREH e KETCHESON 1973; VOORHEES, 1978; VOORHEES e LINDSTRON 1984, WAGGER e DENTON, 1989). Verifica-se, ainda, que a erodibilidade é uma medida do efeito total de uma combinação particular de propriedades do solo, como comentam WISCMEIER & MANNERING (1969).

4.7. Erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos (K_r)

Os parâmetros utilizados e avaliados para cálculo de K_r , como taxas de erosão em sulcos (D_r), velocidades de escoamento (v), componentes hidráulicos como raio hidráulico (R_h), perímetro molhado (P_m) e cisalhamento

hidráulico (T), dentre outros, para os tratamentos SNC e SC, são apresentados nos Quadros 10 e 11, respectivamente.

Quadro 10. Fonte de produção de enxurrada e parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade intra-sulcos, para o tratamento SNC.

Sulco	Fonte	Q	v	a	Pm	Lr	Rh	T	d	E	Dr'	Dr
		L/min	m/s	cm ²	cm	cm	cm	N/m ²	%	g/s/m ²	g/s/m ²	kg/s/m ²
1	C	4,27	0,52	1,36	1,49	1,74	0,91	6,44	7,00	1,93	32,68	0,031
	C+F1	8,15	0,49	2,77	1,68	3,19	1,65	11,64	7,00	1,03	73,51	0,072
	C+F2	33,50	0,47	11,77	8,40	9,36	1,40	9,88	7,00	0,33	58,12	0,058
	C+F3	79,03	0,88	15,02	11,79	11,37	1,27	8,98	7,00	0,26	51,02	0,051
2	C	2,52	0,31	1,36	2,88	3,45	0,47	3,32	7,00	1,25	7,50	0,006
	C+F1	7,90	0,45	2,94	3,54	6,63	0,83	5,69	7,00	0,62	24,70	0,024
	C+F2	40,84	0,47	14,57	10,51	11,26	1,39	9,49	7,00	0,34	55,15	0,055
	C+F3	90,79	0,73	20,65	14,53	16,43	1,42	9,74	7,00	0,22	57,14	0,057
3	C	5,34	0,50	1,80	2,97	5,75	0,61	4,20	7,10	0,63	12,64	0,013
	C+F1	16,76	0,51	5,52	4,73	7,12	1,17	8,10	7,10	0,50	43,80	0,044
	C+F2	55,94	0,64	14,56	9,92	13,42	1,47	10,20	7,10	0,25	60,71	0,061
	C+F3	123,91	0,91	22,58	14,60	16,38	1,55	10,74	7,10	0,19	50,96	0,051
4	C	8,28	0,70	1,97	2,17	7,10	0,91	6,93	7,80	0,68	42,30	0,042
	C+F1	22,93	0,72	5,31	5,33	6,94	1,00	7,61	7,80	0,69	50,20	0,050
	C+F2	61,73	0,88	11,68	8,07	13,75	1,45	11,04	7,80	0,33	87,59	0,088
	C+F3	125,32	1,02	20,42	13,09	17,55	1,56	11,90	7,80	0,25	77,22	0,077
5	C	3,46	0,46	1,26	3,05	5,40	0,41	2,96	7,30	0,78	2,84	0,002
	C+F1	16,16	0,67	4,03	5,45	7,97	0,74	5,28	7,30	0,51	21,53	0,021
	C+F2	61,09	0,95	10,68	8,51	11,20	1,26	8,96	7,30	0,35	51,37	0,051
	C+F3	131,26	0,85	25,63	14,63	14,13	1,75	12,50	7,30	0,26	79,46	0,079
6	C	5,14	0,75	1,14	0,94	2,38	1,22	8,57	7,20	1,40	27,65	0,028
	C+F1	22,68	0,74	5,10	4,13	5,23	1,24	8,71	7,20	0,61	39,39	0,039
	C+F2	78,49	0,80	16,25	13,57	12,87	1,20	8,44	7,20	0,23	48,91	0,049
	C+F3	178,22	1,01	29,33	19,50	22,01	1,50	10,60	7,20	0,12	55,25	0,055

C = chuva; Fi = fluxo adicional (i = 1 a 3); Q = vazão; v = velocidade do escoamento superficial; a = área transversal do sulco; Pm = perímetro molhado; Lr = largura do sulco; Rh = raio hidráulico; T = cisalhamento hidráulico; d = declividade; E = contribuição intersulcos para os sulcos; Dr' = taxa de erosão intersulcos; Dr = taxa de erosão intersulcos Dr' menos E.

Quadro 11. Fonte de produção de enxurrada e parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade intra-sulcos, para o tratamento SC.

Sulco	Fonte	Q	v	a	Pm	Lr	Rh	T	d	E	Dr'	Dr
		L/min	m/s	cm ²	cm	cm	cm	N/m ²	%	g/s/m ²	g/s/m ²	kg/s/m ²
1	C	5,54	0,36	2,59	2,19	7,19	1,18	9,01	7,80	0,10	32,23	0,032
	C+F1	12,97	0,51	4,23	2,79	8,56	1,52	11,58	7,80	0,08	53,14	0,053
	C+F2	15,90	0,52	5,12	3,02	9,24	1,70	12,94	7,80	0,08	64,12	0,064
	C+F3	21,99	0,63	5,86	3,37	9,93	1,74	13,27	7,80	0,07	66,82	0,067
2	C	3,91	0,85	0,76	0,66	8,06	1,17	9,12	8,00	0,09	50,54	0,050
	C+F1	19,70	1,24	2,64	1,91	10,08	1,38	10,82	8,00	0,07	40,62	0,041
	C+F2	35,99	1,26	4,76	2,96	11,75	1,61	12,56	8,00	0,06	87,41	0,087
	C+F3	45,66	1,23	6,20	3,69	12,93	1,68	13,14	8,00	0,05	58,47	0,058
3	C	6,57	0,60	2,42	2,21	6,71	1,09	8,87	8,30	0,11	26,02	0,026
	C+F1	14,57	0,64	3,81	3,13	7,34	1,22	9,89	8,30	0,10	60,60	0,061
	C+F2	17,18	0,66	4,32	3,43	7,43	1,26	10,24	8,30	0,10	51,63	0,052
	C+F3	22,65	0,78	4,82	3,24	7,31	1,49	12,07	8,30	0,10	53,78	0,054
4	C	10,44	0,26	6,62	5,76	10,80	1,15	9,56	8,50	0,10	12,67	0,013
	C+F1	39,28	0,54	12,11	10,31	11,86	1,17	9,77	8,50	0,09	19,97	0,020
	C+F2	40,03	0,53	12,54	10,59	11,97	1,18	9,85	8,50	0,09	17,00	0,017
	C+F3	27,43	0,59	13,29	10,40	13,86	1,28	10,63	8,50	0,07	23,87	0,024
5	C	4,40	0,33	2,24	3,02	5,79	0,74	6,18	8,50	0,09	13,55	0,013
	C+F1	51,43	0,96	8,94	9,99	8,06	0,90	7,44	8,50	0,06	20,29	0,020
	C+F2	55,48	0,87	10,65	9,09	8,35	1,17	9,75	8,50	0,06	28,86	0,029
	C+F3	64,98	0,86	12,59	10,29	8,36	1,22	10,17	8,50	0,06	43,06	0,043
6	C	10,70	0,41	2,59	6,54	7,30	0,66	6,31	9,80	0,11	10,38	0,010
	C+F1	57,45	0,97	4,23	12,71	9,15	0,78	7,45	9,80	0,08	19,60	0,020
	C+F2	69,92	1,32	5,12	11,00	10,23	0,80	7,69	9,80	0,07	16,57	0,016
	C+F3	86,02	1,36	5,86	12,36	10,74	0,85	8,18	9,80	0,07	20,38	0,020

C = chuva; Fi = fluxo adicional (i = 1 a 3); Q = vazão; v = velocidade do escoamento superficial; a = área transversal do sulco; Pm = perímetro molhado; Lr = largura do sulco; Rh = raio hidráulico; T = cisalhamento hidráulico; d = declividade; E = contribuição intersulcos para os sulcos; Dr' = taxa de erosão intersulcos; Dr = taxa de erosão intersulcos Dr' menos E.

As correlações estabelecidas entre D_r (taxa de erosão intra-sulcos ou em sulcos) e cisalhamento hidráulico (T), estão apresentados no Quadro 12.

Quadro 12. Equações representativas das correlações estabelecidas entre D_r e T , com seus respectivos coeficientes de correlação, para os tratamentos SNC e SC.

Sulcos	tratamentos	
	----- SNC -----	
1	$D_r = 7,99 \cdot 10^{-3} T - 2,1 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 1,00$
2	$D_r = 7,92 \cdot 10^{-3} T - 2,0 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 1,00$
3	$D_r = 6,62 \cdot 10^{-3} T - 1,3 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 0,91$
4	$D_r = 8,23 \cdot 10^{-3} T - 1,3 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 0,77$
5	$D_r = 8,09 \cdot 10^{-3} T - 2,2 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 1,00$
6	$D_r = 7,70 \cdot 10^{-3} T - 2,7 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 0,43$
	----- SC -----	
1	$D_r = 8,12 \cdot 10^{-3} T - 4,1 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 1,00$
2	$D_r = 6,26 \cdot 10^{-3} T - 1,2 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 0,32$
3	$D_r = 6,77 \cdot 10^{-3} T - 2,2 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 0,36$
4	$D_r = 8,89 \cdot 10^{-3} T - 7,0 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 0,77$
5	$D_r = 6,22 \cdot 10^{-3} T - 2,6 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 0,86$
6	$D_r = 5,27 \cdot 10^{-3} T - 2,2 \cdot 10^{-2}$	$R^2 = 0,84$

Pode-se observar que os coeficientes de correlação para SNC e SC variaram de 0,43 a 1,00 e de 0,32 a 1,00 , respectivamente. Estas variações podem ser devidas às variações ocorridas no cisalhamento hidráulico (Quadros 10 e 11), já que segundo FOSTER *et al.* (1984a) este não é uniforme ao longo do comprimento de um sulco. Esta não uniformidade, segundo o mesmo autor, pode causar cisalhamento do solo mais intenso em alguns locais que em outros.

Segundo FOSTER *et al.* (1984b) a erosão ocorrendo ao longo de um canal, devido a fluxos concentrados de água, depende diretamente da hidráulica do fluxo do sulco. Pelos resultados apresentados, nos Quadros 10, 11 e 12, pode-se inferir que estes são semelhantes aos obtidos por FOSTER *et al.* (1984b).

4.7.1. Cisalhamento hidráulico crítico (T_c) e erodibilidade intra-sulcos ou em sulcos (K_r)

Os valores de cisalhamento hidráulico crítico e de erodibilidade em sulcos, determinados para os tratamentos SNC e SC, são apresentados no Quadro 13.

O cisalhamento crítico médio nos tratamentos SC foi 56% do valor obtido nos SNC (2,48 vs. 4,42 N/m²). FOSTER (1982) sugeriu uma hipótese de que o T_c aumenta com a consolidação do solo, o que levaria a um decréscimo das

perdas de solo devidas à erosão em sulcos. Laflen⁸ (1985), citado por WEST et al. (1992), confirmou a hipótese de FOSTER (1982), trabalhando com um solo em Iowa, demonstrando que o Tc foi quase duas vezes maior para o sistema de plantio direto, comparado ao solo recentemente preparado. Como se pode observar, o solo compactado (SC) apresentou um comportamento semelhante ao esperado quando consolidado: aumento de resistência (RP) e Tc e, um decréscimo de Dr.

A erodibilidade intrasulcos nos tratamentos SNC foi, em média, 12% maior que a obtida nos tratamentos SC ($7,76 \times 10^{-3}$ vs. $6,92 \times 10^{-3}$ s m⁻¹). NEARING et al. (1988b) e WEST et al. (1992) atribuíram os baixos valores obtidos de erodibilidade em sulcos a um aumento na resistência do solo, quando compararam solo consolidado com solo recentemente preparado. Os índices de resistência do solo à penetração, avaliados para os SC, foram substancialmente maiores que os obtidos nos SNC (Quadro 1). Esta observação permite deduzir que os menores valores de Kr para os SC, comparativamente aos SNC, são consequência da maior resistência do solo, quando este se encontra compactado.

8 LAFLEN, J.M. Effect of tillage systems on concentrated flow erosion. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF SOIL CONSERVATION, 4., Maracay, 1985. Proceedings. Maracay, Universidad Central de Venezuela, 1985. p.709-809.

Quadro 13. Erodibilidade intra-sulcos (Kr) e cisalhamento hidráulico crítico (Tc) para os tratamentos SNC e SC.

Sulcos	SNC		SC	
	Tc	Kr x 10 ³	Tc	Kr x 10 ³
	(N/m ²)	(s m ⁻¹)	(N/m ²)	(s m ⁻¹)
1	2,61	7,99	5,05	8,12
2	2,58	7,92	1,96	6,26
3	1,92	6,62	3,19	6,77
4	1,55	8,23	7,89	8,89
5	2,69	8,09	4,15	6,22
6	3,52	7,70	4,25	5,27
Média	2,48 NS	7,76 NS	4,42 NS	6,92 NS

NS = não significativo, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, para as comparações entre os mesmos parâmetros dos tratamentos SNC e SC.

4.8. Correlações entre parâmetros físicos do solo para os tratamentos SNC e SC.

O Quadro 14 apresenta a matriz de correlação de Pearson, com os coeficientes de determinação entre

os parâmetros físicos do solo avaliados em SNC e SC.

Quadro 14. Matriz de correlação de Pearson para os parâmetros físicos avaliados nos tratamentos SNC e SC.

	Ma	Mi	VTP	ds	RP	U0	U1	U2	Tc	Kr
Ma	1,00 **									
Mi	-0,43 NS	1,00 **								
VTP	0,68 *	0,23 NS	1,00 **							
ds	-0,69 *	-0,22 NS	-1,00 **	1,00 **						
RP	-0,90 **	-0,31 NS	-0,71 **	0,71 **	1,00 **					
U0	0,41 NS	0,14 NS	0,42 NS	-0,42 *	-0,57 *	1,00 **				
U1	0,87 **	-0,38 NS	0,55 ++	-0,56 ++	-0,90 **	0,66 *	1,00 **			
U2	0,71 **	-0,27 NS	0,62 *	-0,60 *	-0,90 **	0,38 NS	0,68 *	1,00 **		
Tc	-0,54 NS	-0,03 NS	-0,56 ++	0,57 ++	+0,51 ++	-0,59 *	-0,68 *	-0,20 NS	1,00 **	
Kr	0,49 NS	0,27 NS	0,09 NS	-0,11 NS	-0,39 NS	0,20 NS	0,36 NS	0,36 NS	0,25 NS	1,00 **

Ma = macroporosidade;

Mi = microporosidade;

VTP = volume de poros totais;

ds = densidade do solo;

RP = resistência à penetração;

U0 = umidade quando das avaliações de RP;

U1 = umidade antecedente às simulações de chuva;

U2 = umidade após às simulações de chuva;

Ki = erodibilidade intersulcos;

++, *, ** e NS = significativo a 10%; 5%; 1% e não significativo, pelo teste Qui-Quadrado, respectivamente.

A macroporosidade correlacionou-se positivamente, a 1% de probabilidade, com U1 e U2. A Ma correlacionou-se positivamente com VTP, a 5% de probabilidade. A

densidade do solo e o cisalhamento hidráulico crítico (T_c) correlacionaram-se negativamente com Ma , a 5% e 10% de probabilidade, respectivamente. Com os demais parâmetros a Ma não se correlacionou significativamente.

A microporosidade não se correlacionou significativamente com nenhum dos parâmetros avaliados.

O VTP correlacionou-se negativamente, a 1% de probabilidade, com ds e RP , a 1% de probabilidade e com U_0 e T_c , a 5% e 10% de probabilidade, respectivamente. Houve, ainda, correlação significativamente positiva, para VTP vs. U_1 e VTP vs. U_2 , a 10% e 5% de probabilidade, respectivamente. Porém, para VTP vs. K_r não se obteve correlação significativa.

Quando se correlacionou ds vs. RP e ds vs. T_c , as correlações obtidas foram positivas e significativas a 1% e 10% de probabilidade, respectivamente. As correlações entre ds e U_0 , ds e U_1 e ds e U_2 foram negativas e significativas a 5%, 10% e 5% de probabilidade, respectivamente. Estas observações concordam com os resultados obtidos por BELTRAME *et al.* (1981), NEARING *et al.* (1988) e WEST *et al.* (1992). A ds não se correlacionou significativamente com K_r .

A resistência à penetração (RP) correlacionou-se com U_0 , negativamente, a 5% de probabilidade, confirmando resultados obtidos por BELTRAME *et al.* (1981). As correlações RP vs. U_1 e RP vs. U_2 , também, foram negati-

vas, enquanto que a correlação RP vs. Tc foi positiva, sendo que as duas primeiras foram significativas a 1% e a última a 10% de probabilidade, o que concorda com resultados obtidos por AL-DURRAH & BRADFORD (1981). Para RP x Kr não houve correlação significativa.

Para U0 vs. U1 a correlação obtida foi negativa e significativa a 5% de probabilidade. Porém, ao se considerar U0 vs. U2 e U0 vs. Kr não foram obtidas correlações significativas. A correlação U0 vs. Tc foi negativa e significativa, a 5% de probabilidade.

A umidade antecedente à chuva U1 correlacionou-se positivamente com U2, a 5% de probabilidade. Para U1 vs. Tc, a correlação obtida foi negativa e significativa a 5% de probabilidade. Este resultado ressalta, mais uma vez, a importância da umidade inicial do solo, antes de uma chuva, no processo de erosão do solo, especialmente no caso da erosão em sulcos. Os resultados obtidos quanto à umidade do solo concordam, ainda, com as observações feitas por BERTONI & LOMBARDI NETO (1985) de que o teor de umidade inicial do solo afeta a sua erosão.

Não se obteve correlação significativa para U1 vs. Kr.

Quando se correlacionou U2 com Tc e com Kr, não foram obtidas correlações significativas, o mesmo ocorrendo para Kr vs. Tc.

Pode-se inferir que o fato de Kr não ter se

correlacionado significativamente, com nenhum dos parâmetros de solo avaliados seja devido às observações feitas por FOSTER (1982). Segundo o referido autor, o sedimento que entra no fluxo de água de um sulco reduz sua capacidade de transporte e, esta redução é variável ao longo do comprimento do canal. Como as medidas de parâmetros hidráulicos, nos sulcos, foram realizadas sempre em duas posições fixas, estas podem não ter representado as variações médias ocorridas ao longo dos 9,00 m de comprimento dos canais. Provavelmente, devido a estas variações tenha-se obtido coeficientes de correlação entre D_r e T , tão variáveis para SNC e SC, como os apresentados no Quadro 12.

No presente trabalho, não foi dada atenção alguma ao desenvolvimento de outras relações lineares ou não lineares, para D_r vs. T , visto que isto implicaria num estudo muito complexo para validação dos modelos utilizados, o que não foi previsto nos objetivos desta pesquisa. Contudo, os resultados obtidos podem servir de subsídios futuros para a validação ou não dos modelos utilizados no presente estudo.

Há que se considerar, também, que as condições de obtenção dos resultados de campo, para a determinação de K_r , foram diferentes daquelas propostas por ELLIOT *et al.* (1989). No presente trabalho, não houve aplicações de fluxos adicionais de água sem a presen-

ça de chuva devido à não disponibilidade de água suficiente.

Outro aspecto a ser considerado, foi a não coleta de amostras com repetição, devido às várias dificuldades na condução dos trabalhos de campo como, avaliações dos parâmetros hidráulicos dos sulcos. Para se realizar todas as avaliações é necessário um número muito grande de pessoas treinadas trabalhando na área, do que não se dispôs. Muitas medições e registros precisam ser feitos no mesmo instante, o que, às vezes, não ocorre a contento.

O ideal seria poder contar com equipamentos eletrônicos, que pudessem fazer registros automáticos das modificações que ocorrem nos sulcos e, das velocidades dos escoamentos superficiais. Com este tipo de equipamento o número de pessoas disponíveis para coleta de amostras seria maior, o que permitiria coletas com repetições.

Observou-se, principalmente, no tratamento SNC, que as hastes e o pisoteio das pessoas nas proximidades dos sulcos podem ocasionar alterações em suas secções transversais, dado ao estado bastante úmido do solo, uma vez que algumas medições foram realizadas sob chuva simulada.

Muito embora os problemas descritos tenham ocorrido, os resultados apresentados no Quadro 11, em sua grande maioria, a exemplo dos resultados já discutidos no item 4.6., para as parcelas intersulcos, também corroboram

afirmações de diversos autores (FLOCKER et al., 1958; MIRREH & KETCHESON, 1973; VOORHEES, 1978; VOORHEES & LINDSTRON, 1984; WAGGER & DENTON, 1989), as quais apontam que a compactação pode alterar, significativamente, as propriedades físicas do solo, as quais também alteram a erodibilidade intrasulcos ou em sulcos (Kr).

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões específicas:

5.1. as condições de umidade inicial do solo, antes das simulações de chuvas, afetam a sua susceptibilidade à erosão;

5.2. áreas compactadas são menos susceptíveis às erosões intersulcos e intra-sulcos, comparativamente às não compactadas, devido à maior resistência do solo ao impacto das gotas de chuva e ao cisalhamento hidráulico dum fluxo de água;

5.3. o cisalhamento hidráulico crítico é menor quando o solo não se encontra compactado;

5.4. os valores de erodibilidades intersulcos (K_i) encontrados foram $0,46 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ e $0,10 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, em condições de solo não compactado e compactado, respectivamente;

5.5. os valores de erodibilidade intra-sulcos (K_r) encontrados foram $7,76 \times 10^{-3} \text{ s m}^{-1}$ e $6,92 \times 10^{-3} \text{ s m}^{-1}$, em condições de solo não compactado e compactado, respectivamente;

5.6. os valores de cisalhamento hidráulico crítico (T_c) encontrados foram $2,48 \text{ N m}^{-2}$ e $4,42 \text{ N m}^{-2}$, em condições de solo não compactado e compactado, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTS, E.E. & WENDT, R.C. Influence of soybean and corn cropping on soil aggregate size and stability. Soil Science Society of America Journal, Madison, 49: 1534-1537, 1985.

ALBERTS, E.E.; LAFLEN, L.M.; RAWLS, W.J.; SIMANTON, J.R.; NEARING, M.A. In: LANE, L.J. & NEARING, M.A., ed. USDA - Water erosion prediction project: hillslope profile model documentation. West Lafayette, National Soil Research Laboratory & USDA - Agricultural Research Service, 1989. p.6.1-6.15. (NSREL. Report, 2)

ALBERTS, E.E.; MOLDENHAUER, W.C.; FOSTER, G.R. Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill flow. Soil Science of America Journal, Madison, 44: 590-595, 1980.

AL-DURRAH, M. & BRADFORD, J.M. New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact. Soil Science

Society of America Journal, Madison, 45: 949-953, 1981.

AL-DURRAH, M.M. & BRADFORD, J.M. The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. Soil Science Society of America Journal, Madison, 46: 1086-1090, 1982.

ALLMARAS, R.R.; BURWELL, R.E.; HOLT, R.R. Flow-layer and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 31: 550-556, 1967.

BAJRACHARYA, R.M.; ELLIOT, W.J.; LAL, R. Interrill erodibility of some Ohio soils based on field rainfall simulation. Soil Science Society of America Journal, Madison, 56: 267-272, 1992.

BARFIELD, B.J.; BARNHISEL, R.I.; HIRSCHI, M.C.; MOORE, I.D. Compaction effects on erosion of mine spoil and reconstructed topsoil. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 31(2): 447-452, 1988.

BATHKE, G.R. & BLAKE, G.R. Effects of soybeans on soil properties related to soil erodibility. Soil Science Society of America Journal, Madison, 48: 1398-1401, 1984.

BAVER, L.D. Soil physics. 3 ed. New York, John Wiley & Sons, 1966. 489p.

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

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo, Livroceres, 1985. 355p.

BJERRUM, L. & LO, K.Y. Effect of aging on the shear-strength properties of a normally consolidated clay. Geotechnique, s.l., 13: 147-157, 1963.

BLAKE, G.R. Particle density. In: BLACK, C.A., ed. Methods of Soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1965. Part 1, cap. 29, p.371-373. (ASA. Agronomy, 9)

BRADFORD, J.M. & GROSSMAN, R.B. In-situ measurement of near-surface soil strength by the fall-cone device. Soil Science Society of America Journal, Madison, 46: 685-688, 1982.

BRADFORD, J.M.; FERRIS, J.E.; REMLEY, F.A. Interrill

soil erosion processes: I. effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment. Soil Science Society of America Journal, Madison, 51: 1566-1570, 1987a.

BRADFORD, J.M.; FERRIS, J.E.; REMLEY, P.A. Interrill soil erosion processes: II relationship of splash detachment to soil properties. Soil Science Society of America Journal, Madison, 51: 1571-1575, 1987b.

BRADFORD, J.M.; REMLEY, P.A.; FERRIS, J.E.; SANTINI, J.B. Effect of soil surface sealing on splash from a single waterdrop. Soil Science Society of America Journal, Madison, 50: 1547-1552, 1986.

BROWN, L.C.; FOSTER, G.R.; BEASLEY, D.B. Rill erosion as affected by incorporated crop residue and seasonal consolidation. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 32(6): 1967-1978, 1989.

BROWN, L.C.; WEST, L.T.; BEASLEY, D.B.; FOSTER, G.R. Rill erosion one year after incorporation of crop residue. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 33(5): 1531-1540, 1990.

BUBENZER, G.D. & JONES JR., B. A. Drop size and impact

- velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall conditions. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 14(4): 625-628, 1971.
- BURWELL, R.E.; ALMARAS, R.R.; SLONEKER, L.L. Structural alteration of soil surfaces by tillage and rainfall. Journal of Soil Water Conservation, Ankeny, 21: 61-63, 1966.
- CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 70: 425-433, 1990.
- CARVALHO, F.L.C.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa de doses e formas de manejo do resíduo cultural de trigo na redução da erosão hídrica do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 14: 111-117, 1990.
- COSTA, J.B. da. Caracterização e constituição do solo. 2.ed. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1979. 528p.
- CRUSE, R.M. & LARSON, W.E. Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact. Soil Science Society of America Journal, Madison, 41: 777-781,

1977.

DAY, P.R. Particle fractionation and particle - size analysis. In: BLACK, C.A., ed. Methods of Soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1965. part 1, cap. 43, p.545-567. (ASA. Agronomy, 9).

DAVID, W.P. & BEER, C.E. Simulation of soil erosion - part 1 : development of a mathematical erosion model. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 18 (1): 126-129, 1984.

DENARDIN, J.E. Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Piracicaba, 1990. 113p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).

ELLIOT, W. J.; KOHL, K. D.; LAFLEN, J. M. A process based rill erosion model. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1988. 17p. (ASAE. Paper, 88-2532).

ELLIOT, W.J.; LIEBENOW, A.M.; LAFLEN, J.M.; KOHL, K. D. A compendium of erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88. Ohio, Ohio Stat University & USDA Agricultural Research Service,

1989. p. A2-A25. (NSERL. Report, 3)."

ELLISON, W.D. Soil erosion studies. Agricultural Engineering
Club, St. Joseph, 28: 197-201, 1947.

EL-SWAIFY, S.A. & DÄNGLER, E.W. Erodibilities of selected
tropical soils in relation to structural and hydrologic
parameters. In: NATIONAL CONFERENCE ON SOIL ERO-
SION, West Lafayette, 1976. Proceedings. Ankeny, Soil
Conservation Society of America, 1977. p. 105-114.
(SCSA. Special publication, 21).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA.
Manual de métodos de solo. Rio de Janeiro, Ministério
da Agricultura, 1979. s.p.

FLOCKER, W.J.; WOMOCIL, J.A.; VITUM, M.T. Response of
winter cover crops to soil compaction. Soil Science
Society of America Proceedings, Madison, 22: 181-186,
1958.

FORMANEK, G.E.; MCCOOL, D.K.; FAPENDICK, R.I. Freeze-thaw
and consolidation effects on strength of a wet silt
loam. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 22 (6):
1749-1752, 1984.

FOSTER, G.R. The overland flow process under natural conditions. In: INTERNATIONAL SEMINAR FOR HIDROLOGY PROFESSORS., West Lafayette, 1971. Proceedings West Lafayette, Purdue University, 1971. p.173-185.

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L., ed. Hydrologic modeling of small watersheds. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1982. p.296-380. (ASAE. Monograph, 5)

FOSTER, G.R. & MEYER, L.D. A closed-form soil erosion equation for upland areas. In: SHEN, H. W., ed. Sedimentation, Symposium to honor Professor H.A. Einstein. Fort Collins, H. W. SHEN, 1972. p.12-1-12-19, 1972.

FOSTER, G.R.; HUGGINS, L.F.; MEYER, L.D. A laboratory study of rill hydraulics: I. velocity relationships. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 27(3): 790-796, 1984a.

FOSTER, G.R.; HUGGINS, L.F.; MEYER, L.D. A laboratory study of rill hydraulics: II. shear stress relationships. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 27(3): 797-804, 1984b.

FOSTER, G.R.; LANE, L.J.; NEARING, M.A. Erosion component
 In: LANE, L.J. & NEARING, M.A., ed. USDA - Water
 erosion prediction project: hillslope profile model
 documentation. West Lafayette, National Soil Research
 Laboratory & USDA - Agricultural Research Service,
 1989. p.10.1-10.12. (NSREL. Report, 2)

FOSTER, G. R.; MEYER, L.D.; ONSTAD, C.A. An erosion equa-
 tion derived from basic erosion principles. Transac-
 tions of ASAE, St. Joseph, 20(4): 678-682, 1977.

FREE, G.R. Erosion characteristics of rainfall. Agricul-
 tural Engineering, St. Joseph, 41: 447-449, 1960.

FREEBAIRN, D.M.; GUPTA, S.C.; ONSTAD, C.A.; RAWLS, W.J.
 Antecedent rainfall and tillage effects upon infiltra-
 tion. Soil Science Society of America Journal,
 Madison, 53: 1183-1189, 1989.

FREIRE, O. & PESSOTI, J.E.S. Erodibilidade dos solos do
 Estado de São Paulo. Anais da Escola Superior de Agri-
 cultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 31: 333-350,
 1974.

FREIRE, O.; GODOY, M.C.T.F. de; CARVALHO, W.A. Erodibili-
 dade de alguns solos do oeste do Estado de São Paulo.

In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 9., Jaboticabal. Resumos. Jaboticabal, SBOS e FCAV - UNESP, 1992. p.71.

GILLEY, J.E. & FINKNER, S.C. Estimating soil detachment caused by raindrop impact. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 28(1): 140-146, 1985.

GRISSINGER, E.H. Resistance of selected clay systems to erosion by water. Water Resources Research, Washington, 2(1): 131-138, 1966.

HANSON, G.J. Channel erosion study of two compacted soils. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 32(2): 485-490, 1989.

HANSON, G.J. Surface erodibility of earthen channels at high stresses part I - open channel testing. Transactions of the ASAE, St Joseph, 33(1): 127-131, 1990a.

HANSON, G.J. Surface erodibility of earthen channels at high stresses part II - developing an in situ testing device. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 33(1): 132-137, 1990b.

HOLZEY, C.S. & MAUSBACH, M.J. Using soil taxonomy to es-

timate K values in the universal soil loss equation. In: NATIONAL CONFERENCE ON SOIL EROSION, West Lafayette, 1976. Proceedings. Ankeny, Soil Conservation Society of America, 1977. p.115-126. (SCSA. Special publication, 21).

HUANG, C.; BRADFORD, J.M.; CUSHMAN, J.H. A numerical study of raindrop impact phenomena: the rigid case. Soil Science Society of America Journal, Madison, 46: 14-19, 1982.

HUSSEIN, M.H. The effect of slope length on soil loss. Ames, 1978. 65p. (Ph.D. - Iowa State University).

JAMISON, V.C.; WEAVER, H.A.; REED, I.F. The distribution of tractor tire compaction effects in Cecil clay. Soil Science Society Proceedings, Madison, 15: 34-37, 1950.

JOHNSON, C.B. & MOLDENHAUER, W.C. Effect of chisel versus moldboard plowing on soil erosion by water. Soil Science Society of America Journal, Madison, 43: 177-179, 1979.

JORGE, J.A. Física e manejo dos solos tropicais. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 328p.

- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Soil cohesion as affected by time and water content. Soil Science Society of America Journal, Madison, 48: 1001-1006, 1984.
- KIEHL, E.J. Manual de edafologia: Relações solo-planta. São Paulo, Editora Agronômica Ceres Ltda, 1979. 264p.
- LAFLEN, J.M., THOMAS, A.W., WELCH, R. Cropland experiments for the WEPP project. St. Joseph, ASAE, 1987. [14p]. (ASAE. Paper, 87-2544).
- LATTANZI, A. R. D., MEYER, L. D., BAUMGARDNER, M. F. Influences of mulch rate and slope steepness on interrill erosion. Soil Science Society of America Journal, Madison, 38: 946-950, 1974.
- LIEBENOW, A.M., ELLIOT, W.J., LAFLEN, J.M., KOHL, K.D. Interrill erodibility: collection and analysis of data from cropland soils. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 33(6): 1882-1888, 1990.
- LYLE, W.M. & SMERDON, E.T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 8(3): 419-422, 1965.

LYLES, L.; DISRUD, L.A.; WOODRUF, W.P. Effects of soil physical properties, rainfall characteristics, and wind velocity on clod disintegration by simulated rainfall. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 33: 302-306, 1969.

MARTINS FILHO, M.V. Influência da compactação do solo nas perdas por erosão e na sua erodibilidade. Jaboticabal, 1987. 95p. (Graduação - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias / UNESP).

MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, V.P.; MARQUES JÚNIOR, J. Comportamento da erodibilidade de um LEd - textura argilosa quando submetido a diferentes níveis de compactação. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 9., Jaboticabal. Resumos. Jaboticabal, SBCS e FCAV - UNESP, 1992. p.75.

MEYER, L.D. How rain intensity affects interrill erosion. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 24(6): 1472-1475, 1981.

MEYER, L.D. & HARMON, W.C. Susceptibility of agricultural soil to interrill erosion. Soil Science Society of America Journal, Madison, 48: 1152-1157, 1984.

MEYER, L.D. & HARMON, W.C. Interrill runoff and erosion: effects of row-sideslope shape, rain energy, and rain intensity. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 35(4): 1199-1203, 1992.

MEYER, L.D.; FOSTER, G.R.; NIKOLOV, S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 18(5): 905-911, 1975.

MIRREH, H.F. & KETCHESON, J.W. Influence of soil water matric potential and resistance to penetration on corn root elongation. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 53: 383-388, 1973.

MITCHELL, J.K. Fundamental aspects of thixatropy in soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Div., S.I., ASCE 86(SM3):19-52, 1960.

MOLDENHAUER, W.C. & LONG, D.C. Influence of rainfall energy on soil loss and infiltration rates: I. effect over a range of texture. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 28: 541-546, 1964.

MOLDENHAUER, W.C. & KOSWARA, J. Effect of initial clod size on characteristics of splash and wash erosion. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 32:

875-879, 1968.

MOLDENHAUER, W.C.; WISCHMEIER, W.H.; PARKER, D.T. The influence of crop management on runoff, erosion, and soil properties of a Marshall silty clay loam. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 31: 541-546, 875-879, 1967.

NEARING, M.A. & WEST, L.T. Soil strength indices as indicators of consolidation. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 31(2): 471-476, 1988.

NEARING, M.A.; WEST, L.T.; BROWN, L.C. A consolidation model for estimating changes in rill erodibility. Transactions of the ASAE, St Joseph, 31(3): 696-700, 1988.

NICHOLS, M.L.; COOPER, A.W.; REAVES, C.A. Design and use of machinery to loosen compact soil. Soil Science Society Proceedings, Madison, 19: 128-130, 1955.

NORTON, L.D. & BROWN, L.C. Time-effect on water erosion for ridge tillage. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 35(2): 473-478, 1992.

NUERNBERG, N.J.; STAMMEL, J.C.; CABEDA, M.S.V. Efeito da

sucesso de culturas e tipos de adubação em características, físicas de um solo da encosta basáltica sul-riograndense. Revista Brasileira de Ciência do solo, Campinas, 10: 185-190, 1986.

OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento. Jaboticabal, FUNEP, 1992. 201p.

PARK, S.W.; MITCHELL, J.K.; BUBENZER, G.D. Splash erosion modeling: physical analyses. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 25(2): 357-361, 1982.

PARTHENIADES, E. Results of recent investigations on erosion and deposition of cohesive sediments. In: SHEN, H.W., ed. Sedimentation, Symposium to honor Professor H.A. Einstein. Fort Collins, H. W. SHEN, 1972. p.20-1-20-29, 1972.

PEREIRA, V.F. Eroded sediment size distributions as affected by corn-soybean rotations and tillage systems. Ames, 1979. 154p. (PhD - Iowa State University).

PEREIRA, V.F. Perda de solo em Latossolo Vermelho-Escuro, textura argilosa, devida a impacto de gotas de chuva simulada e a comprimento de rampa. Jaboticabal, 1989.

106p. (Livre-docência - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias / UNESP).

PEREIRA, V.P. & MOLINA, D.S. Método para medição da intensidade de chuva produzida por um simulador de hastes rotativas. In: CONGRESSO BRASILEIRO, 6., ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 6., Campo Grande, 1986. Resumos. Campo Grande, Fundação Cargil, 1986. p.69.

PEREIRA, V.P.; FERREIRA, M.E.; CARNIER, P.E.; BORGES, S.C.; MOLINA, D.S.; MARTINS FILHO, M.V.; CARDOSO, J.L.; SOUZA, A.O. Conservação do solo: determinação de perda de solo por erosão e do efeito de manejo no seu controle. Jaboticabal, FINEP, 1985. 230p. (FINEP. Relatório Técnico Científico).

RAIJ, B. van & ZULLO, M.A.T. Métodos de análise do solo. Campinas, Instituto Agronômico, 1977. 16p. (IAC. Circular, 63).

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargil, 1987. 170p.

RESCK, D. V. S.; FIGUEIREDO, M. de S.; FERNANDES, B.; RESENDE, M.; da SILVA, T.C.A. Erodibilidade de um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico distrófico fase terraço, localizado na Zona da Mata (MG), determinada com simulador de chuva. Revista Brasileira de Ciência do solo, Campinas, 5: 7-14, 1981.

ROMKENS, M.J.M.; ROTH, C.B.; NELSON, D.W. Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. Soil Science Society of America Journal, Madison, 41: 954-960, 1977.

ROSE, C.W. Some aspects of rainfall, radiant drying, and soil factors on infiltration under rainfall into soils. The Journal of Soil Science, London, 13: 286-298, 1962.

SILVA, A.P. da; LIBARDI, F.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. Revista Brasileira de Ciência do solo, Campinas, 10: 91-95, 1986.

SINGER, M.J. & BLACKARD, J. Slope angle-interrill soil loss relationships for slopes up to 50%. Soil Science Society of America Journal, Madison, 46: 1270-1273, 1982.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 15: 229-235, 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Penetrômetro de impacto - modelo IAA / PLANALSUCAR - Stolf. STAR. Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba, 1(3): 18-23, 1983.

SWANSON, N.P. Rotating-boom rainfall simulator. Transactions of ASAE, St. Joseph, 8(1): 71-72, 1965.

TOWNER, G.D. & CHILDS, E.C. The mechanical strength of unsaturated porous granular material. The Journal of Soil Science, London, 23: 481-498, 1972.

VANONI, V.A. Sedimentation engineering. The American Society of Civil Engineers, New York, 1975. 745p.

VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. 3p. (EPFS. Boletim técnico, 7).

VILAR, O.M. Formulação de um modelo matemático para erosão dos solos pela chuva. São Carlos, 1987. 196p. (Douto-

rado - Escola de Engenharia de São Carlos / USP).

VOORHEES, W.B. Soil compaction: Our newest natural resource. Crops Soils, s.l., 22(5):13-15, 1977.

VOORHEES, W.B. & LINDSTRON, M.J. Long - term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. Soil Science Society of American Journal, Madison, 48: 152-156, 1984.

VOORHEES, W.B.; NELSON, W.W.; RANDALL, G. W. Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. Soil Science Society of America Journal, Madison, 50: 428-433, 1986.

VOORHEES, W.B.; SENST, C.G.; NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the northern Corn Belt. Soil Science Society of America Journal, Madison, 42: 344-349, 1978.

VOORHEES, W.B.; YOUNG, R.A.; LYLES, L. Wheel traffic considerations in erosion research. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 22(4): 786-790, 1979.

WAGGER, M.G. & DENTON, H.P. Influence of cover crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous

no-till corn. Soil Science Society of America Journal, Madison, 53: 1206-1210, 1989.

WATSON, D.A. & LAFLEN, J.M. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 29(1): 98-102, 1986.

WEST, L.T.; MILLER, W.P.; BRUCE, R.R.; LANGDALE, G.W.; LAFLEN, J. M.; THOMAS, A. W. Cropping System and Consolidation effects on rill erosion in the Georgia Piedmont. Soil Science Society of America Journal, Madison, 56: 1238-1243, 1992.

WISCHMEIER, W.H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 23: 246-249, 1959.

WISCHMEIER, W.H. & MANNERING, J.V. Relation of soil properties to its erodibility. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 33: 131-137, 1969.

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Washington, U.S. Department of Agriculture, 1965. 47p. (USDA. Handbook, 282).

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, U.S. Department of Agriculture, 1978. 58p. (USDA. Handbook, 537).

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation, Ankeny, 26(5): 183-189, 1971.

YOUNG, R.A. A method of measuring aggregate stability under waterdrop impact. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 27(5): 1351-1354, 1984.

YOUNG, R.A. & ONSTAD, C.A. Characterization of rill and interrill eroded soil. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 21(6): 1126-1130, 1978.

YOUNG, R.A. & VOORHEES, W.B. Soil erosion and runoff from planting to canopy development as influenced by tractor wheel-traffic. Transaction of the ASAE, St. Joseph, 25(3): 708-712, 1982.

APÊNDICE

APÊNDICE A

Classificação: Latossolo Vermelho-Escuro distrófico A moderado textura argilosa fase floresta latifoliada tropical relevo ondulado.

Localização: a 7 km do centro de Jaboticabal, rodovia Carlos Tonanni, a 200 m da Estação Agrometeorológica do Depto de Ciências Exatas da FCAV/UNESP - Jaboticabal, Jaboticabal, SP. 21° 15' 22" S e 48° 18' 58" W.

Altitude: 595 m.

Litologia: basalto.

Relevo local: suave ondulado.

Relevo regional: suave ondulado a ondulado.

Cobertura vegetal atual: sem vegetação.

Descrição morfológica do solo

A1 - 0-20 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, seco), bruno-avermelhado (5 YR 3/3, úmido), franco-argilo-arenoso, fraca, pequena, granular, ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso, transição gradual difusa.

AB - 20-50 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, seco), bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/3, úmido), argila-arenosa, fraca, moderada, pequena, blocos que se desfazem em grânulos, ligeiramente duro, friável, plástico, ligeiramente pe-

gajoso, transição gradual difusa.

BA - 50-90 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, seco),
bruno-avermelhado (5 YR 3/3, úmido), argila-arenosa,
moderada, muito pequena, blocos que se desfazem em
grânulos, ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente
plástico, ligeiramente pegajoso, transição gradual difusa.

BW1 - 90-105 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, seco),
bruno-avermelhado (5 YR 3/3, úmido), argila-arenosa, fraca,
muito pequena, granular, muito friável, ligeiramente
plástico, ligeiramente pegajoso, transição gradual difusa.

BW2 - 105 + cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, seco),
bruno-avermelhado (5 YR 3/3, úmido), argila-arenosa, fraca,
muito pequena, granular, macia, muito friável, ligeiramente
plástico, ligeiramente pegajoso, transição gradual difusa.

Quadro 1A. Características químicas do perfil do solo.

Prof.	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	S	T	V
	resina		(Ca ₂ Cl ₂)							
cm	µg/ml	%	----- meq/100 ml -----							
0-20	2	2,0	3,9	0,05	0,4	0,1	5,2	0,55	5,75	10
20-50	2	1,6	4,1	0,04	0,4	0,1	3,8	0,54	4,34	12
50-90	2	1,3	4,5	0,01	0,3	0,1	2,8	0,41	3,21	13
90-105	2	1,0	4,6	0,01	0,3	0,1	2,5	0,41	2,91	14
105 +	2	1,0	5,1	0,01	0,4	0,1	2,0	0,51	2,51	20
* % Fe ₂ O ₃ = 6,4 % SiO ₂ = 13,16 % Al ₂ O ₃ = 14,56										
* = digestão com H ₂ SO ₄ 1:1										

Quadro 2A. Características granulométricas do perfil do solo.

Prof.	Argila	Silte	Areia	----- Areia -----		
				Grossa	Média	Fina
cm	----- % -----					
0-20	29,4	5,1	65,5	4,3	32,4	28,8
20-50	35,4	5,6	59,0	4,2	29,6	25,3
50-90	40,5	4,8	54,7	3,6	27,2	23,9
90-105	39,0	7,5	53,5	3,2	25,8	24,6
105 +	41,2	5,2	53,6	3,4	25,8	24,4

APÊNDICE B

Quadro 1B. Resistências médias do solo à penetração individualizadas para os tratamentos INC, SNC, IC e SC.

Profundidade	INC	SNC	IC	SC
cm	Kg/cm ²			
0 - 2	5,70	5,70	7,20	5,70
2 - 4	6,67	6,39	42,52	43,58
4 - 6	14,86	14,64	47,92	53,00
6 - 8	15,81	16,43	17,64	45,42
8 - 10	16,93	16,81	32,65	39,91
10 - 12	16,29	17,75	29,62	33,44
12 - 14	15,92	17,94	27,53	33,75
14 - 16	15,65	17,89	28,78	32,38
16 - 18	15,63	18,65	29,76	30,22
18 - 20	16,41	18,45	30,22	31,48
20 - 22	17,91	18,89	32,14	33,12
22 - 24	18,82	18,56	29,60	34,12
24 - 26	19,42	18,42	25,35	34,81
26 - 28	19,16	18,14	22,53	33,23
28 - 30	19,86	18,48	23,75	30,19
30 - 32	19,74	18,44	23,66	27,46
32 - 34	19,66	18,52	22,79	26,41
34 - 36	17,94	18,04	20,36	26,52
36 - 38	18,14	17,32	21,77	24,71
38 - 40	17,71	16,93	19,85	25,11
40 - 42	16,74	16,14	18,77	23,83
42 - 44	15,76	14,98	18,55	22,71
44 - 46	15,21	14,73	17,34	21,94
46 - 48	14,57	14,29	16,00	21,54
48 - 50	13,84	14,26	16,95	20,19
50 - 52	14,78	14,06	15,93	20,05
52 - 54	16,96	14,24	16,29	19,39
54 - 56	16,48	15,54	16,56	19,28
56 - 58	15,99	16,29	16,29	19,55
58 - 60	15,67	16,61	17,55	19,55

APÊNDICE C

Quadro 1C. Teste Tukey para as unidades médias avaliadas, antes das simulações de chuvas, nos tratamentos INC e IC.

Prof.	INC	IC
cm	%	
0-10	16,61	11,87
10-20	17,14	11,78
20-30	16,00	12,51
Média	16,60a	12,05b

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

APÊNDICE D

Quadro 1D. Teste Tukey para as taxas de erosões intersulcos entre lado esquerdo e direito, em relação ao centro do simulador de chuvas, para os tratamentos INC e IC.

Lado	INC	IC
	<hr/> kg/s/m ² <hr/>	
e	4,62 a	4,64 A
d	5,65 a	3,39 A

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

Letras minúsculas comparações entre lado esquerdo (e) e direito (d) em relação ao simulador de chuvas, para INC;

Letras maiúsculas comparações entre lado esquerdo (e) e direito (d) em relação ao simulador de chuvas, para IC;

Os valores de erosão estão multiplicados por 10⁶.

Quadro 2D. Teste Tukey para as erodibilidades intersulcos entre lado esquerdo e direito, em relação ao centro do simulador de chuvas, para os tratamentos INC e IC.

Lado	INC	IC
	<hr/> kg s / m ⁴ <hr/>	
e	0,48 a	0,11 A
d	0,45 a	0,09 A

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

Letras minúsculas comparações entre lado esquerdo (e) e direito (d) em relação ao simulador de chuvas, para INC;

Letras maiúsculas comparações entre lado esquerdo (e) e direito (d) em relação ao simulador de chuvas, para IC;

Os valores de erodibilidade estão multiplicados por 10⁻⁶.