

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**EROSÃO HÍDRICA EM ENTRESSULCOS
DE LATOSSOLOS DO RIO GRANDE DO SUL**

MARIA CÂNDIDA MOITINHO NUNES
(Tese de Doutorado)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**EROSÃO HÍDRICA EM ENTRESSULCOS
DE LATOSSOLOS DO RIO GRANDE DO SUL**

**MARIA CÂNDIDA MOITINHO NUNES
Engenheira Agrícola (UFPEL)
Mestre em Ciências – Solos (UFPEL)**

**Tese apresentada como um dos
requisitos à obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo**

**Porto Alegre (RS) Brasil
Julho de 2006**

Dedico

À Deus.

"Porque o Senhor dá a sabedoria, da Sua boca vem a inteligência e o entendimento. Ele reserva a verdadeira sabedoria para os retos e escudo para os que caminham na sinceridade..." (Prov. 2:6-7);

À memória de meu amado pai e amigo, Nedzir de Vargas Nunes, que sempre me inspirou no estudo da "terra";

À memória dos filhos lindos e amados que tive, Elias e Isaías, os quais brincavam e pulavam no meu ventre enquanto eu fazia parte deste trabalho;

Ao amado, esposo, amigo e companheiro, Saulo Moitinho, pela paciência, incentivo e apoio durante toda a realização deste trabalho;

À minha mãe, Zaira Duarte Nunes, meu irmão, Fabiano Duarte Nunes, minha cunhada e amiga Lidian Nunes e meus sogros Edeí e Antonio Moitinho, por todo o apoio, incentivo e compreensão;

Aos amigos e irmãos em Cristo, Camila, Fabrício, Rita, Leandro e muitos outros que, de uma forma ou de outra, estavam sempre orando por mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Elemar Antonino Cassol, pela orientação, apoio, amizade e exemplo de profissionalismo;

Ao Governo Federal, a CAPES, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, os quais possibilitaram a realização do Curso de Doutorado e deste trabalho, por meio do sofrido povo brasileiro;

Ao Departamento de Solos, pela utilização dos Laboratórios de Erosão, Física e Manejo do Solo;

Aos professores Élvio Giasson e João Mielniczuk, do Departamento de Solos da UFRGS e ao professor José Miguel Reichert, do Departamento de Solos da UFSM, pela participação na Comissão Examinadora de Qualificação para Doutorado;

Ao professor Gustavo Henrique Merten pelo apoio e amizade e pela participação como colaborador na Comissão Orientadora;

Ao professor Alberto Vasconcelos Inda Junior pelo apoio e colaboração para a realização deste trabalho;

Aos funcionários da Faculdade de Agronomia, José Ferreira da Silva e Jorge Luiz Ramos dos Santos, pela amizade sincera e grande ajuda para a realização deste trabalho;

Aos bolsistas de Iniciação Científica, Luciana Santos e Paulo Busanello, pela amizade, companheirismo e grande ajuda no campo e no laboratório;

À colega Tatiana C. Alves (*in memoriam*), pela sua postura profissional, companheirismo e amizade e pelos momentos de alegria que tivemos;

Aos amigos e colegas, Tatiana F. da Silva, Edir, Marlove, Josiléia, Madalena, Carla, Margarete, Nilvânia, Márcia, Paulo César, Leandro Volk, Amauri Barcelos e Luiz, que, de uma forma ou de outra sempre me apoiaram;

Ao funcionário do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Jader, pela postura profissional, amizade, apoio e incentivo;

Aos funcionários do Departamento de Solos, Márcio, Luiz Antonio e Adão, pelo apoio laboratorial;

EROSÃO HÍDRICA EM ENTRESSULCOS DE LATOSSOLOS DO RIO GRANDE DO SUL ¹

Autor: Maria Cândida Moitinho Nunes

Orientador: Prof. Elemar Antonino Cassol

RESUMO

A predição da erosão hídrica do solo pode auxiliar na redução e/ou minimização do processo de perda do solo em sulcos e em entressulcos. Para isso, é fundamental o conhecimento da erodibilidade do solo em entressulcos e que esta possa ser determinada em laboratório, com o uso do menor número possível de parâmetros, os quais devem ser de determinação fácil, rápida e de baixo custo, retratando ao máximo as condições de campo. A umidade antecedente à chuva, os ciclos de secagem e umedecimento do solo e a variação na declividade podem influenciar na resistência do solo à desagregação pelo impacto da gota da chuva. O efeito e a magnitude desses processos, entretanto, são dependentes do tipo de solo. Este estudo foi realizado em laboratório, com três Latossolos do Rio Grande do Sul (Latosolo Vermelho aluminoférrico típico- LVaf; Latossolo Vermelho distroférico- LVdf; Latossolo Vermelho distrófico- LVd), com diferentes classes texturais, tendo os seguintes objetivos: i) avaliar a relação entre a estabilidade dos agregados em água e o fator de erodibilidade do solo em entressulcos; ii) avaliar o uso do percentual de areia e de argila para a predição do fator de erodibilidade básica do solo em entressulcos; iii) avaliar o efeito da umidade antecedente à chuva, da presença de crosta superficial e da variação na declividade sobre as taxas de perda de solo por erosão em entressulcos. A erosão em entressulcos foi determinada em laboratório, sob chuva simulada com intensidade média de 88 mm h⁻¹, em solo mobilizado e descoberto, acondicionado em parcelas experimentais com área útil de 0,36 m². A suscetibilidade do solo à erosão em entressulcos variou conforme o tipo de solo, conteúdo inicial de água, presença de crosta superficial e grau de declividade. Foram determinados os fatores de erodibilidade do solo em entressulcos que, para os Latossolos estudados variaram de 0,76x10⁶ a 1,48x10⁶ kg s m⁻⁴. O índice de estabilidade de agregados em água teve correlação significativa com o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ($r = -0,90^{**}$), podendo ser usado para simplificar a predição do mesmo. O conteúdo de argila total e o de óxidos ferro, extraído com oxalato de amônio ácido (Fe_o), explicaram 97% ($p < 0,01$) da erodibilidade em entressulcos dos Latossolos estudados. Os efeitos da condição inicial de umidade e da presença de crosta superficial foram mais pronunciados no solo de textura mais arenosa e com menor estabilidade de agregados em água. O fator declive obtido, para um solo muito argiloso e sob declividades iguais ou maiores que 0,09 m m⁻¹, apresentou um comportamento linear em relação à variação na declividade do solo.

¹ Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (160 p.) Julho de 2006.

INTERRILL EROSION OF OXISOLS FROM RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL ¹

Author: Maria Cândida Moitinho Nunes
Adviser: Prof. Elemar Antonino Cassol

ABSTRACT

The soil water erosion prediction may help to reducing and/or minimizing the process of soil loss either in rills or in interrills areas. To reach that it is essential to know the interrill soil erodibility factor. It is important that the estimation of interrill soil erodibility may be determined in laboratory, with the use of the smallest possible number of parameters, whose determination should be easy, fast and low cost, portraying the maximum of the field conditions. The antecedent soil wetting, surface sealing and crust formation and the variation in slope may also influence the soil resistance to aggregate breakdown and thus the interrill erosion. The effect and the magnitude of these processes, however, may be dependent on soil properties. This study was done in the laboratory, using three oxisols from Rio Grande do Sul State, Brazil, with the following objectives: i) to evaluate the relationship between water aggregates stability and interrill soil erodibility; ii) to compare the use of soil sand and clay contents for the prediction of interrill soil erodibility, and iii) to evaluate the soil pre-wetting, sealing and surface crust formation and slope effects in the interrill soil erosion rate. The interrill soil erosion rates were determined in laboratory, under simulate rainfall and bare soil conditions. Simulated rainfall mean intensity of 88 mm h⁻¹ were applied during 180 minutes on experimental interrill plots of useful area of 0.36 m². The interrill erosion losses varied according the soil type, initial water content, drying and wetting effects and slope steepness. The interrill soil erodibility factor were determined and varied from 0,76x10⁶ to 1,48x10⁶ kg s m⁻⁴, for the studied oxisols. The aggregates water stability index had high correlation with the interrill soil erodibility ($r = - 0.90^{**}$) and could be used for its prediction. Clay and Fe oxides contents of the soil explained 97% ($p < 0.01$) of variation in the interrill soil erodibility. The effect soil pre-wetting and sealing and crust formation on interrill erosion rates were more pronounced in sandy soil of low aggregate stability. For a soil with high clay content, the factor for slope effect on interrill erosion varied linearly with the slope grade from 0.09 m m⁻¹ to 0.45 m m⁻¹ of slope steepness.

¹ Doctorate Thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil (160 p.) July of 2006.

SUMÁRIO		Página
INTRODUÇÃO		1
CAPÍTULO I - Processos e interações envolvidos na suscetibilidade do solo à erosão em entressulcos		6
1.1. INTRODUÇÃO		6
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....		8
1.2.1. Erosão hídrica e erodibilidade do solo em entressulcos		8
1.2.2. Erodibilidade em entressulcos e parâmetros do solo		15
1.2.3. Agregação do solo		17
1.2.4. Agregação do solo e erodibilidade em entressulcos		19
1.2.5. Efeito da umidade inicial na erosão hídrica do solo		21
1.2.6. Formação de selo e de crosta superficiais		23
1.2.7. Erosão em entressulcos e declividade do solo		25
1.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		27
CAPÍTULO II - Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul		34
2.1. INTRODUÇÃO		36
2.2. MATERIAL E MÉTODOS		41
2.2.1. Local		41
2.2.2. Características dos solos e locais de coleta		41
2.2.3. Coleta e preparo das amostras de solo		43
2.2.4. Caracterização física dos solos		44
2.2.4.1. Retenção de água		44
2.2.4.2. Densidade do solo.....		44
2.2.4.3. Densidade de partículas		44
2.2.4.4. Distribuição de diâmetro das partículas do solo		45
2.2.4.5. Distribuição de agregados em classes de diâmetro.....		45
2.2.4.6. Determinação da estabilidade de agregados.....		47

2.2.5. Caracterização química dos solos	47
2.2.5.1. Acidez ativa do solo	47
2.2.5.2. Carbono orgânico total	48
2.2.5.3. Teor de óxidos de ferro pedogênicos dos solos.....	48
2.2.6. Erosão hídrica do solo em entressulcos sob chuva simulada em laboratório.....	48
2.2.6.1. Preparo do solo para uso nas parcelas experimentais	48
2.2.6.2. Parcelas experimentais	48
2.2.6.3. Condição de umidade antecedente à chuva	50
2.2.6.4. Aplicação de chuva simulada em laboratório	50
2.2.6.5. Avaliação de características hidráulicas do escoamento superficial	51
2.2.6.6. Determinação da taxa de desagregação do solo em entressulcos.....	53
2.2.6.7. Erodibilidade do solo em entressulcos	54
2.2.7. Análise estatística dos dados	56
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
2.3.1. Caracterização física e química dos solos	57
2.3.2. Características hidráulicas e taxas de escoamento superficial em entressulcos	60
2.3.3. Taxas de desagregação do solo em entressulcos	65
2.3.4. Erodibilidade do solo em entressulcos	66
2.3.5. Estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos por métodos indiretos	70
2.4. CONCLUSÕES	81
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
CAPÍTULO III - Efeito da umidade inicial e da presença de crosta superficial na erosão hídrica do solo em entressulcos.....	88
3.1. INTRODUÇÃO	90
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	93
3.2.1. Local	93
3.2.2. Características dos solos e locais de coleta	93
3.2.3. Coleta e preparo das amostras de solo	94
3.2.4. Caracterização física e química dos solos	94

3.2.5. Erosão hídrica do solo em entressulcos sob chuva simulada em laboratório.....	96
3.2.5.1. Preparo do solo para uso nas parcelas experimentais	96
3.2.5.2. Parcelas experimentais	96
3.2.5.3. Condição de umidade antecedente à chuva	97
3.2.5.4. Aplicação de chuva simulada em laboratório	97
3.2.5.5. Formação de crosta superficial	98
3.2.5.6. Determinação da taxa de desagregação do solo e da velocidade do escoamento em entressulcos.....	98
3.2.6. Análise estatística dos dados	99
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	101
3.3.1. Taxas de desagregação e perdas de solo em entressulcos, em condição de solo pré-umedecido e inicialmente seco ao ar.....	101
3.3.2. Efeito da formação de crosta superficial na desagregação do solo em entressulcos na condição inicialmente seco ao ar	108
3.4. CONCLUSÕES	114
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

CAPÍTULO IV - Erosão hídrica em entressulcos e declividade do solo.....	120
4.1. INTRODUÇÃO	122
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	125
4.2.1. Local	125
4.2.2. Características do solo e local de coleta.....	125
4.2.3. Coleta e preparo das amostras de solo	125
4.2.4. Caracterização do solo	126
4.2.5. Erosão hídrica em entressulcos sob chuva simulada em laboratório.....	127
4.2.5.1. Preparo do solo para uso nas parcelas experimentais.....	127
4.2.5.2. Parcelas experimentais	127
4.2.5.3. Condição de umidade antecedente à chuva	128
4.2.5.4. Aplicação de chuva simulada	129
4.2.5.5. Determinação da taxa de desagregação do solo	129
4.2.5.6. Determinação do fator declive	131
4.2.6. Análise estatística dos dados	132
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	133
4.4. CONCLUSÕES	140

4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
CONCLUSÕES GERAIS.....	145
APÊNDICES.....	148

RELAÇÃO DE TABELAS

Página

2.1. Resultados do laudo de análises químicas dos solos, obtidos no Laboratório de Análises do Departamento de Solos da FA-UFRGS.....	43
2.2. Distribuição de diâmetro das partículas do solo. Média de três repetições.....	57
2.3. Densidade do solo no local de coleta (D_s), densidade de partículas (D_p), grau de flocculação (GF) e conteúdo volumétrico de água no solo, sob tensão de -6 kPa. Média de três repetições.....	58
2.4. Algumas características químicas dos solos. Média de duas repetições.	59
2.5. Diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) por Kemper & Chepil (1965), modificado por Tisdall & Oades (1979). Média de três repetições.....	60
2.6. Índice de estabilidade de agregados em água - IEA (Kemper & Rosenau, 1986). Média de três repetições.....	60
2.7. Características hidráulicas do escoamento superficial nas áreas em entressulcos. Média de três repetições.....	61
2.8. Valores de taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos (D_i) e descarga unitária do escoamento (q_i), obtidos sob 9% de declive ($S_f = 0,456$) e sob chuva simulada de intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), e o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i). Média de três repetições.....	67
2.9. Correlações entre o índice de estabilidade de agregados (IEA) e alguns parâmetros físicos e químicos do solo.....	68
3.1. Distribuição de diâmetro das partículas do solo, densidade de partículas (D_p), conteúdo volumétrico de água no solo sob tensão de -6 kPa, diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade dos agregados em água (IEA). Média de três repetições.....	95

3.2. Características químicas dos solos em estado natural. Média de duas repetições.....	95
3.3. Tempo de início do escoamento superficial (t_i), velocidade média do escoamento (V) e taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos (D_i), em solo sob condição natural e sem a presença de crosta superficial, sob declividade de 9% e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), durante 180 minutos.....	102
3.4. Tempo de início do escoamento superficial (t_i), velocidade média do escoamento (V) e taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos (D_i), em solo sob condição natural e inicialmente seco ao ar, sob declividade de 9% e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), durante 180 minutos.....	108
4.1. Caracterização física e química do Latossolo Vermelho aluminoférrico típico - LVaf (Erechim), sob condições naturais.....	127
4.2. Fator declive (S_f), taxa de aporte de solo em entressulcos (D_i), taxa de desagregação do solo em entressulcos (D_i), descarga unitária do escoamento superficial (q_i) e fator declive observado (S_{fo}), calculado e corrigido para $S_f = 1$ ($\theta = 45^\circ$).....	135

RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

2.1. Parcela experimental e sistema de umedecimento e drenagem.....	49
2.2. Descarga unitária do escoamento superficial (q_i), sob chuva simulada de intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), em Latossolo Vermelho aluminoférrico natural - LVaf (Erechim), sob declividade de 9% ($S_f = 0,456$)	63
2.3. Descarga unitária do escoamento superficial (q_i), sob chuva simulada de intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), em Latossolo Vermelho distroférico natural - LVd (Santo Ângelo), sob declividade de 9% ($S_f = 0,456$)	64
2.4. Descarga unitária do escoamento superficial (q_i), sob chuva simulada de intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), em Latossolo Vermelho distrófico natural - LVd (Cruz Alta), sob declividade de 9% ($S_f = 0,456$)	64
2.5. Taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i), obtidas sob 9% de declive ($S_f = 0,456$) e intensidade média de chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), de Latossolos do Rio Grande do Sul sob uso natural. (LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico)	65
2.6. Fator de erodibilidade do solo em entressulcos observado (K_i) e estimado pelas equações do WEPP (K_{ib}); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; n = natural; c = cultivado; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico (Cantalice, 2001).....	71
2.7. Comparação entre o fator de erodibilidade do solo em entressulcos observado (K_i) e o estimado pelo modelo de Albuquerque (1998) (K_{iA}); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico (Cantalice, 2001)	72
2.8. Relação entre o conteúdo de areia muito fina e a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtida sob 9% de declividade e chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1})	73

2.9. Relação entre o parâmetro textural M e a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtida sob 9% de declividade e chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1})	74
2.10. Relação entre o teor de argila e a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtida sob 9% de declividade e chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).....	74
2.11. Relação entre o teor de ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_d) e a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtida sob chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}) e 9% de declividade.....	76
2.12. Relação entre o teor de ferro extraído com oxalato amônio ácido (Fe_o) e a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtida sob chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}) e 9% de declividade.....	76
2.13. Relação entre índice de estabilidade de agregados (IEA) (Kemper & Rosenau, 1986) e fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtido sob chuva simulada com intensidade de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}) e declividade de 9%	78
3.1. Taxas de desagregação em entressulcos do solo LVaf - Latossolo Vermelho aluminoférrico (Erechim), sob condições naturais e sem presença de crosta superficial. Valores obtidos sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1})	103
3.2. Taxa de desagregação em entressulcos do solo LVd - Latossolo Vermelho distrófico (Cruz Alta), sob condições naturais e sem presença de crosta superficial. Valores obtidos sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1})	104
3.3. Perdas de solo em entressulcos, acumuladas durante 180 minutos, em solo sob condições naturais e distintas condições de umidade inicial, sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%	107
3.4. Taxas de desagregação em entressulcos do solo Latossolo Vermelho aluminoférrico - LVaf (Erechim), sob condições naturais e inicialmente seco ao ar. Valores obtidos sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1})	110

3.5. Taxas de desagregação em entressulcos do solo Latossolo Vermelho distrófico - LVd (Cruz Alta), sob condições naturais e inicialmente seco ao ar. Valores obtidos sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1})	111
3.6. Perdas acumuladas de solo em entressulcos, sob condições naturais e inicialmente seco ao ar. Valores obtidos sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), durante 180 minutos	112
4.1. Taxas de aporte de solo em entressulcos nas declividades de 9, 18, 36 e 45%, obtidas sob chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).	133
4.2. Relação entre as taxas de perda de solo em entressulcos e a variação na declividade. Valores obtidos com chuva simulada de intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1})	136
4.3. Relação entre a variação na declividade e o fator declive para os solos estudados por Liebenow et al. (1990), sob declives iguais e maiores que $0,09 \text{ m m}^{-1}$ e para o solo LVaf (Erechim).....	137
4.4. Correlação entre a variação na declividade e o fator declive para os solos estudados por Liebenow et al. (1990) (S_f), para declives iguais ou maiores que $0,09 \text{ m m}^{-1}$, e para o solo LVaf - Erechim (S_{fo})	138

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica do solo pode levar os solos agrícolas a perderem sua capacidade produtiva, com conseqüente aumento de custos com saúde, alimentação, poluição e assoreamento dos cursos d'água, incorrendo em elevados custos na recuperação de áreas degradadas. Dessa forma, a erosão hídrica pode prejudicar a qualidade de vida do homem, animais e plantas, além de causar problemas sociais, culturais, econômicos e ambientais.

As perdas de solo por erosão hídrica dependem da chuva e do escoamento associado, da natureza do solo, das características do relevo, das condições de cobertura e de manejo do solo e das práticas conservacionistas utilizadas. Com relação à natureza do solo, cada um apresenta uma suscetibilidade à erosão devida exclusivamente às suas características intrínsecas, a qual é representada pela "erodibilidade do solo", que é um dos principais parâmetros considerados nos modelos de predição de erosão. Em geral, além da erodibilidade do solo, os modelos de predição da erosão necessitam do conhecimento de vários outros parâmetros. A aplicação prática desses modelos pode tornar-se difícil, pois, para a obtenção dos valores de cada parâmetro, é necessária uma grande quantidade de determinações em campo e/ou laboratório, incorrendo em maior tempo e elevado custo.

O uso de um planejamento conservacionista auxilia na redução e/ou minimização do processo de perda de solo, evitando, dessa forma, que o mesmo chegue a um nível irreversível de degradação. A possibilidade de se efetuar a predição de perdas de solo por erosão facilita grandemente a realização de planejamentos conservacionistas de uso e manejo do solo.

A predição da erosão hídrica do solo pode ser realizada por meio de modelos teóricos. Alguns modelos separam o processo de erosão hídrica em sulcos e em entressulcos. A erosão em entressulcos ocorre, principalmente,

devido à desagregação das partículas do solo pelo impacto da gota da chuva e transporte pelo escoamento superficial enquanto que a erosão em sulcos é devida à desagregação, transporte e deposição das partículas do solo pelo escoamento concentrado.

A predição e o controle da erosão hídrica do solo serão facilitados pelo conhecimento dos processos que envolvem a erosão do solo em entressulcos e suas interações. O conhecimento da erodibilidade de um solo nas áreas em entressulcos poderá contribuir para a avaliação do início do processo erosivo e do aporte de sedimentos para os sulcos ou para fora da área de interesse. A erodibilidade do solo em entressulcos é determinada diretamente no campo, por meio de chuva natural ou simulada e, especialmente em laboratório, pela aplicação de chuva simulada. Todos esses procedimentos envolvem tempo e são de alto custo.

A estimativa da erodibilidade do solo em entressulcos também pode ser realizada por meio de métodos indiretos, onde são consideradas as relações entre a erosão hídrica e parâmetros do solo. Com isso, busca-se a utilização de um menor número de parâmetros, para estimar a erodibilidade do solo em entressulcos, os quais devem ser de determinação fácil, rápida e de baixo custo, em laboratório, e retratar ao máximo as condições de campo. Apesar dos dados obtidos em laboratório representarem situações sob condições controladas, os mesmos devem ser semelhantes aos obtidos em campo.

Praticamente todas as características e propriedades do solo envolvidas em sua erodibilidade em entressulcos influenciam também na estabilidade dos agregados em água. Esta é uma característica do solo de fácil determinação em laboratório e de baixo custo e seu uso para estimar a erodibilidade em entressulcos viria a facilitar a determinação desse parâmetro de modelos de predição da erosão.

A estimativa da erodibilidade do solo em entressulcos pela estabilidade dos agregados em água tem como vantagem não necessitar do uso de chuva simulada, fazendo com que a estimativa da erodibilidade em entressulcos possa ser realizada em laboratório, de uma forma fácil, rápida e com menor custo.

A erosão em entressulcos e o aporte de sedimentos aos sulcos variam com a umidade inicial, formação de selo e crosta superficiais e com a declividade, os quais, por sua vez, poderão influenciar na intensidade do escoamento superficial. A resposta do solo a esses efeitos está relacionada com características do solo como textura, teor e tipo de óxidos de ferro e de matéria orgânica, principalmente. A resposta desses parâmetros à erosão hídrica é geralmente bem representada pela estabilidade dos agregados do solo em água.

O conteúdo inicial de água e a forma de umedecimento interferem no mecanismo de quebra dos agregados frente à ação da chuva, influenciando, dessa forma, na erosão hídrica do solo em entressulcos. A quebra dos agregados pode levar à formação de crosta superficial, redução na taxa de infiltração da água no solo e incremento no escoamento superficial e nas perdas de solo por erosão.

A taxa de aporte de sedimentos da erosão em entressulcos para os sulcos ou para fora da área de interesse pode variar com o tipo de solo. Esse efeito tem sido estudado apenas em solos de regiões de clima temperado e é necessário observar o comportamento da erosão em entressulcos frente às variações na declividade e as relações entre esses fatores em solos de regiões tropicais e subtropicais, como é o caso de Latossolos.

A maioria dos métodos e equações utilizados nos modelos de predição da erosão hídrica do solo, como é o caso do modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*), foi desenvolvida para solos de regiões de clima temperado. São raros, se existentes, os modelos desenvolvidos para solos característicos do Brasil e Rio Grande do Sul, como, por exemplo, os Latossolos. Os Latossolos são solos em avançado estágio de intemperização e geralmente apresentam grande quantidade de óxidos, os quais, dependendo do tipo, favorecem a formação de agregados com alta estabilidade. O entendimento dos processos e interações envolvidos na erosão hídrica em entressulcos de Latossolos pode representar uma contribuição para o uso de modelos de predição da erosão hídrica.

O fato da erosão em entressulcos ser um processo dinâmico pode dificultar a sua predição. As interações entre quebra de agregados, conteúdo inicial de água, formação de selo e crosta superficiais e variação de declive nas

taxas de perda de solo e água são complexas e ainda não estão totalmente entendidas. O entendimento desses processos e interações pode auxiliar na predição da erosão hídrica de solos com grande representatividade no Rio Grande do Sul (RS) e no Brasil, como é o caso dos Latossolos.

Com base no que foi exposto anteriormente, foram formuladas as seguintes hipóteses:

I) A erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul pode ser estimada em laboratório, com base na análise da estabilidade de agregados em água, pois os parâmetros do solo envolvidos na suscetibilidade à erosão hídrica em entressulcos e na estabilidade dos agregados em água são praticamente os mesmos;

II) O uso de um índice de estabilidade de agregados em água para estimar a erodibilidade do solo em entressulcos pode ser mais eficiente do que o uso isolado dos teores de areia e de argila, conforme sugerido pelo modelo WEPP, pois a erodibilidade do solo em entressulcos depende de outros parâmetros além da distribuição de diâmetro das partículas do solo;

III) A condição de solo seco ao ar antes de um evento de precipitação, comparada com a condição de solo inicialmente úmido e a presença de crosta superficial nas áreas em entressulcos, comparada com a superfície sem crosta resulta em maiores taxas de perdas de solo devido à quebra dos agregados menos estáveis;

IV) O fator de ajuste da declividade para a taxa de aporte de sedimentos na erosão em entressulcos para um Latossolo do Rio Grande do Sul, sob declives elevados, é diferente do utilizado pelo modelo WEPP, obtido pela avaliação de solos com baixa taxa de intemperismo.

Para testar e avaliar as hipóteses, este trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos:

I) Determinar a correlação entre o fator de erodibilidade do solo em entressulcos e a estabilidade dos agregados do solo em água para Latossolos do Rio Grande do Sul;

II) Comparar o uso da estabilidade de agregados em água com o percentual de areia e de argila, conforme proposto pelo modelo WEPP, para a

predição da erodibilidade do solo em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul;

III) Avaliar a influência da umidade antecedente à chuva e da formação de crosta superficial nas taxas de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos em Latossolo de textura muito argilosa e em Latossolo de textura franco argilo arenosa;

IV) Comparar o uso do fator declive sugerido pelo modelo WEPP, para ajustar as taxas de aporte de sedimentos da erosão em entressulcos, com um fator declive obtido para um Latossolo de textura muito argilosa.

CAPÍTULO I – PROCESSOS E INTERAÇÕES ENVOLVIDOS NA SUSCETIBILIDADE DO SOLO À EROÇÃO EM ENTRESSULCOS

1.1. INTRODUÇÃO

A erosão hídrica do solo pode ser dividida em erosão em entressulcos e em sulcos, dependendo da ação do agente erosivo. A suscetibilidade do solo à erosão hídrica é representada pela sua erodibilidade.

O entendimento do processo de erosão hídrica do solo em entressulcos é de primordial importância, pois faz parte do início do processo de erosão hídrica, influenciando no aporte de sedimentos para os sulcos.

No processo de erosão em entressulcos, a taxa de desagregação e o transporte de sedimentos irão depender da interação entre as características intrínsecas do solo e os tipos e formas de ação dos agentes erosivos. A diversidade de solos existente, associada a diferentes fatores ambientais, como clima e relevo, entre outros, pode originar interações de muita complexidade no processo erosivo. O entendimento desses processos pode auxiliar na predição das perdas de solo por erosão hídrica.

Os Latossolos são os solos mais expressivos do Brasil e no Rio Grande do Sul representam mais de 20% da área total do Estado (Brasil, 1973). A classe dos Latossolos compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, exceto horizonte hístico, sendo solos em avançado estágio de intemperização (Embrapa, 1999). Geralmente esses solos possuem agregados com alta estabilidade, devido, principalmente, ao tipo e quantidade de óxidos presente (Azevedo & Bonumá, 2004).

Para que se possa verificar a adequação de modelos de predição da erosão hídrica desenvolvidos em condições de clima temperado ou frio, para

condições de clima tropical ou subtropical, torna-se necessário uma melhor avaliação e entendimento dos processos e interações envolvidos na erosão hídrica em Latossolos. Este estudo visa uma abordagem abrangente sobre alguns aspectos que envolvem as interações entre estabilidade de agregados, fator de erodibilidade do solo em entressulcos, efeitos da umidade antecedente, formação de selo e de crosta superficiais e variação no gradiente de declive, em relação à erosão hídrica em entressulcos em Latossolos do Estado do Rio Grande do Sul.

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.2.1. Erosão hídrica e erodibilidade do solo em entressulcos

A erosão hídrica do solo se constitui em um processo de desagregação e transporte de suas partículas pelos agentes erosivos (Ellison, 1947). A desagregação e o transporte do solo podem ser subdivididos em sub-processos, os quais podem ocorrer de forma simultânea: i) desagregação do solo pelo impacto direto das gotas de chuva; ii) transporte do solo pelo efeito do salpico; iii) desagregação do solo pela ação do escoamento superficial e iv) transporte do solo pela ação do escoamento superficial (Foster & Meyer, 1975; Meyer & Harmon, 1984).

A separação dos processos de erosão hídrica do solo em entressulcos e em sulcos ocorre devido ao fato do impacto da gota da chuva e do escoamento superficial agirem de forma diferente nessas duas situações, o que justifica o estudo desses processos de forma separada. Cabe ressaltar, entretanto, que essa separação é importante para o entendimento dos processos, mas não há uma limitação física definida entre eles. Além disso, esses dois tipos de erosão podem ocorrer de forma simultânea.

A erosão hídrica do solo nas áreas em entressulcos combina o processo de desagregação do solo pelo impacto das gotas da chuva transporte pelo salpico, e transporte pelo escoamento superficial (Meyer et al., 1975; Foster, 1982; Meyer & Harmon, 1984; Watson & Laflen, 1986; Alberts et al., 1995). O principal mecanismo de transporte de sedimentos nessas áreas é o escoamento superficial, o qual é capaz de carregar os sedimentos em distâncias relativamente curtas para áreas de maior lâmina de escoamento. Dessa forma, as áreas em entressulcos agem como alimentadoras de sedimentos para os sulcos (Nearing, 1997), onde a erosão é devida ao

escoamento superficial concentrado. A erodibilidade em entressulcos é a medida da taxa de aporte de sedimentos para os sulcos, sendo função da intensidade da chuva e da taxa de escoamento superficial (Alberts et al., 1995).

A energia de impacto das gotas é responsável pela desagregação da maioria do material que será transportado pelo escoamento superficial nas áreas em entressulcos (Bradford et al., 1987). Esse escoamento tem início quando a intensidade de chuva é superior à taxa de infiltração instantânea e a água excedente satisfaz a detenção e a retenção superficial (Wischmeier & Smith, 1958; Meyer & Monke, 1965). O efeito do escoamento superficial na erosão hídrica depende de sua velocidade, a qual aumenta com o grau de declive e com a quantidade de escoamento (Meyer & Monke, 1965).

O impacto das gotas de chuva sobre uma fina camada de água provoca turbulência no escoamento superficial, aumentando a capacidade do fluxo em desagregar e transportar partículas de solo. O aumento da espessura do fluxo, a partir de 3 mm e até 3 vezes o diâmetro da gota, causa o amortecimento da energia de impacto das gotas, diminuindo o transporte de partículas (Kinnell, 1988).

O efeito de impacto das gotas da chuva é afetado pela altura de lâmina do escoamento, declividade, vento, ângulo de inclinação das gotas e velocidade e temperatura do escoamento, dependendo, dessa forma, das características hidráulicas do escoamento (Gerits et al., 1990). As características hidráulicas são parâmetros importantes, pois podem representar as interações entre o escoamento superficial e a superfície do solo.

Existem alguns parâmetros hidráulicos que podem ser determinados com base na descarga unitária, velocidade e temperatura do escoamento superficial. Dentre eles destaca-se o número de Reynolds (Re) e o de Froude (Fr). O número de Reynolds relaciona a magnitude das forças de inércia com as forças viscosas. O número de Froude relaciona as forças de inércia com os efeitos das forças gravitacionais (Simons & Senturk, 1992). Baseado nesses parâmetros, o regime do escoamento em entressulcos pode ser classificado como laminar subcrítico ($9 < Re < 40$ e $Fr < 1$) para o transporte de sedimentos sob chuva simulada (Guy et al., 1990), laminar supercrítico ($139 < Re < 399$ e $Fr > 1$) ou laminar de transição ($500 < Re < 760$ e $Fr > 1$) (Farenhorst & Bryan, 1995).

Os primeiros modelos de predição da erosão hídrica foram empiricamente desenvolvidos. Dentre esses modelos, o mais conhecido e mundialmente utilizado é a USLE (*Universal Soil Loss Equation*), onde a erodibilidade do solo é representada pelo fator K (Wischmeier & Smith, 1978). Apesar de sua grande importância, a USLE é baseada em observações experimentais, necessitando, dessa forma, de dados de vários anos. Essa equação não considera a forma do declive e a origem e deposição dos sedimentos.

O desenvolvimento e o uso de modelos de base física necessitam de informações que caracterizem os processos físicos da erosão (Watson & Laflen, 1986). Atualmente, existem vários modelos de predição da erosão hídrica do solo que visam desenvolver equações fundamentais, baseadas em processos e em suas interações. Desses modelos, o WEPP "*Water Erosion Prediction Project*" (Flanagan & Nearing, 1995) é um dos mais conhecidos e separa o processo de erosão hídrica em erosão em entressulcos e erosão em sulcos, conforme proposto por Foster & Meyer (1975).

O modelo WEPP considera o movimento de sedimentos em uma área como um processo em equilíbrio. Para isso, utiliza uma equação de continuidade para descrever o movimento do sedimento ao longo do declive (Foster et al., 1995):

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_f \quad (1.1)$$

onde G é a carga de sedimentos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$); x é a medida longitudinal da encosta (m); D_i é a taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$) e D_f é a taxa de erosão em sulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$).

A taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos irá depender da taxa de desagregação, do efeito de cobertura e raízes, da presença de selo e crosta, da declividade e do efeito de gelo e degelo (Alberts et al., 1995; Foster et al., 1995) e pode ser representada da seguinte forma:

$$D_i = D_i S_f C_i F_{sc} F_{gd} \quad (1.2)$$

onde D_i é a taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); D_i é a taxa de desagregação em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); S_f

é o fator declividade do solo (adimensional); C_i é o fator de cobertura e de raízes; F_{sc} é o fator selo e crosta e F_{gd} é o fator de gelo e degelo.

Nas condições climáticas do Rio Grande do Sul e do Brasil, não há efeito considerável do Fator F_{gd} (fator de gelo e degelo), podendo ser desconsiderado na expressão (1.2). Da mesma forma, em condições de solo descoberto, recentemente trabalhado, sem a presença de cobertura de qualquer tipo e sem efeito de raízes, a equação (1.2) pode ser expressa da seguinte forma:

$$D_i = D_i S_f \quad (1.3)$$

onde D_i é a taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); D_i é a taxa de desagregação em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

Meyer (1981), estudando a erosão hídrica em entressulcos, determinou que a taxa de desagregação do solo está relacionada com a intensidade da chuva, expressando tal relação da seguinte forma:

$$E = a I^b \quad (1.4)$$

onde E é a taxa de erosão do solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}) e a e b são constantes relacionadas com as propriedades do solo. Para a maioria dos solos estudados Meyer (1981) encontrou que o expoente b ficou entre 1,9 e 2,1. Segundo o autor, a proximidade do expoente b em "2" sugere que, para solos siltosos, franco siltosos, franco e franco arenosos, a relação pode ser representada da seguinte forma:

$$E = a I^2 \quad (1.5)$$

Segundo Meyer (1981), a equação (1.5) é menos satisfatória para solos com conteúdo de argila maior que 20%. O autor verificou que o expoente b reduz com um aumento no conteúdo de argila no solo, sendo, dessa forma, inadequado considerá-lo como igual a "2" para solos com alto conteúdo de argila.

Truman & Bradford (1993) estudaram solos com textura variando de franco arenosa a argilosa e concluíram que a maior parte dos valores de b não se aproxima de "2". Segundo os autores, em uma função do tipo potência, o expoente b e o coeficiente a são dependentes um do outro. Desta forma, o

valor de b irá depender do tipo de solo, conteúdo inicial de água e grau de declive.

O modelo WEPP considera que a taxa de desagregação nas áreas em entressulcos (D_i) é diretamente proporcional ao quadrado da intensidade da chuva ($D_i \propto I^2$). Para que esta proporcionalidade se torne uma igualdade, é utilizada uma constante de proporcionalidade, denominada de "erodibilidade do solo em entressulcos" (K_i). A erodibilidade do solo é a recíproca de sua resistência e representa a sua suscetibilidade de erodir em diferentes taxas, devido, exclusivamente, às suas características intrínsecas, dadas por seus parâmetros físicos, químicos e mineralógicos (Wischmeier & Mannering, 1969; Foster, 1982).

A desagregação do solo em entressulcos tem sido considerada como proporcional à potência da intensidade da chuva (Elliot et al., 1989; Liebenow et al., 1990). A taxa de desagregação do solo em entressulcos, em uma declividade padrão de 45°, em condições de solo descoberto, recém preparado e sem resíduos, pode ser calculada pela seguinte equação:

$$D_i = K_i I^2 \quad (1.6)$$

onde D_i é a taxa de desagregação em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_i é o fator erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}) e I é a intensidade da chuva (m s^{-1}).

Para que a taxa de desagregação seja igual à taxa de aporte de sedimentos, ou seja, à perda de solo nas áreas em entressulcos, é necessário considerar o efeito do escoamento superficial da água no transporte do solo desagregado. Dessa forma, a taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos é modelada como sendo proporcional ao produto da intensidade da chuva e da descarga unitária do escoamento, com a constante de proporcionalidade sendo o parâmetro erodibilidade em entressulcos (Flanagan et al., 1995). Nesse caso, considera-se que o escoamento superficial seja suficiente para transportar todo o material desagregado, ou seja, a taxa de desagregação é igual à taxa de aporte de sedimentos.

Alguns trabalhos relacionam a erosão em entressulcos com o quadrado da intensidade da chuva (Meyer, 1981; Liebenow et al., 1990; Rockenbach, 1992; Veiga et al., 1993; Braida & Cassol, 1996; Albuquerque et al. 2000; Schäfer et al., 2001; Cantalice, 2001; Cassol & Lima, 2003). Para os

solos onde a taxa de escoamento superficial for suficiente para transportar o material desagregado, a taxa de desagregação do solo será igual à taxa de aporte de sedimentos para fora da área em estudo. Para solos com alta taxa de infiltração e, portanto, pouco escoamento superficial, a taxa de aporte de sedimentos poderá ser menor do que a taxa de desagregação. Para levar em conta o efeito do escoamento superficial no transporte de sedimentos desagregados, o modelo WEPP passou a considerar a descarga unitária do escoamento e, conseqüentemente, a taxa de infiltração da água na taxa de desagregação. A equação proposta é praticamente a mesma de Kinnell & Cummings (1993), exceto pelo uso de diferentes fatores de declive, sendo expressa da seguinte forma:

$$D_i = K_i I q_i S_f \quad (1.7)$$

onde D_i é a taxa de desagregação em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_i é o fator erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}), q_i é a taxa de excesso de chuva ou descarga unitária do escoamento (m s^{-1}) e S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

Conforme a equação (1.7), a taxa de desagregação será, teoricamente, igual à taxa de aporte de sedimentos. O produto da intensidade da chuva pela taxa de excesso de chuva, ou descarga unitária do escoamento, pode promover uma medida adequada das interações entre o impacto da gota e o escoamento superficial (Kinnell, 1991), bem como dos processos de desagregação e transporte de sedimentos que ocorrem nas áreas em entressulcos (Kinnell, 1991; Truman & Bradford, 1993; Zhang et al., 1998). Isso evidencia a necessidade do uso de metodologias em que haja escoamento superficial suficiente para que todo o material desagregado seja aportado para fora da parcela. A taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos irá depender da taxa de desagregação do solo em entressulcos e da capacidade do escoamento superficial.

Considerando que não haja efeito dos fatores C_i , F_{sc} e F_{gd} , a taxa de aporte de sedimentos, dada pela expressão (1.2), pode ser considerada como sendo igual à taxa de desagregação do solo em entressulcos (equação 1.7), resultando na seguinte expressão:

$$D_i = K_i I q_i S_f \quad (1.8)$$

onde D_i é a taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); K_i é o fator erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}), q_i é a taxa de excesso de chuva ou descarga unitária do escoamento (m s^{-1}) e S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

A descarga unitária, o grau de declive e o tipo de solo, bem como suas interações, afetam significativamente a perda de sedimentos por unidade de área (Zhang et al., 1998). A inclusão do termo descarga unitária do escoamento, portanto, pode melhorar a predição da erosão em entressulcos (Watson & Laflen, 1986; Truman & Bradford, 1995), principalmente para solos com alta permeabilidade e, por conseqüência, pouco escoamento superficial, como é o caso dos Latossolos.

Nos estudos de campo ou de laboratório determinando-se as taxas de aporte de sedimentos e conhecendo-se a intensidade da chuva, a taxa máxima de escoamento superficial e a declividade da área, a expressão (1.8) pode ser rearranjada para determinação do fator de erodibilidade do solo em entressulcos, da seguinte forma:

$$K_i = \frac{D_i}{I q_i S_f} \quad (1.9)$$

onde K_i é o fator erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}); D_i é a taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}), q_i é a taxa de excesso de chuva ou descarga unitária do escoamento (m s^{-1}) e S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

Apesar da erodibilidade em entressulcos ser função de propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo, a mesma não é considerada como uma propriedade fundamental do solo, pois depende da metodologia experimental e da equação utilizada para descrever o processo (Truman & Bradford, 1995; Bradford & Foster, 1996).

Elliot et al. (1989) avaliaram a erodibilidade em entressulcos de solos dos EUA, conforme a metodologia adotada atualmente pelo WEPP, e verificaram uma variação no fator K_i de $0,77 \times 10^6$ a $4,32 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. Liebenow et al. (1990) também avaliaram a erodibilidade em entressulcos de dezoito solos dos EUA e verificaram uma variação de $0,88 \times 10^6$ a $5,26 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. O modelo WEPP (Alberts et al., 1995) sugere que a erodibilidade básica do solo em entressulcos pode variar de $0,5 \times 10^6$ a $12 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos para determinar a erodibilidade em entressulcos de solos do Estado do Rio Grande do Sul (Rockenbach, 1992; Veiga et al., 1993; Braida & Cassol, 1996; Albuquerque et al. 2000; Schäfer et al., 2001; Cantalice, 2001; Cassol & Lima, 2003). Nesses estudos, foram observados valores de erodibilidade em entressulcos que variaram de 0,23 a $5,1 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$.

Devido ao fato do WEPP ser baseado em princípios físicos fundamentais, o conhecimento dos processos envolvidos na erosão hídrica e as suas interações poderão contribuir para a estimativa de perdas de solo do local de interesse.

1.2.2. Erodibilidade em entressulcos e parâmetros do solo

Vários estudos têm sido desenvolvidos no sentido de relacionar os parâmetros do solo com a sua erodibilidade em entressulcos.

Os solos diferem em relação à erodibilidade em entressulcos por possuírem diferentes propriedades físicas, químicas e mineralógicas (Foster, 1982; Veiga et al., 1993; Albuquerque et al., 2000). As propriedades do solo que afetam a sua erodibilidade em entressulcos incluem a textura, mineralogia, agregação, matéria orgânica, pH, teor de cátions trocáveis, grau e forma do declive e umidade inicial (Le Bissonais & Singer, 1993; Veiga et al., 1993; Albuquerque, 1998). Além desse e de outros parâmetros, podem ocorrer ainda múltiplas e complexas interações entre alguns desses parâmetros e a erodibilidade, podendo modificar as influências individuais.

A resistência do solo à desagregação pode ser afetada pela distribuição granulométrica do solo. Solos de textura mais arenosa são geralmente mais fáceis de desagregar, mas seus grandes sedimentos são difíceis de transportar. Os solos siltosos e com fraca agregação são mais suscetíveis à erosão em entressulcos do que os solos argilosos, enquanto que os solos francos e os arenosos apresentam um comportamento intermediário (Meyer & Harmon, 1984). Segundo os autores, a argila reduz a erodibilidade em entressulcos, pois favorece a formação de agregados estáveis.

No Brasil, Lima & Andrade (2001) estudaram alguns solos com B textural e com B latossólico do sul de Minas Gerais e identificaram que os parâmetros do solo que melhor se correlacionam com a erodibilidade em entressulcos foram os teores de óxidos de ferro (extraídos com oxalato amônio ácido, ditonito citrato bicarbonato e pelo ataque sulfúrico), caulinita e gibbsita (quantificada por análise térmica diferencial), argila dispersa em água, volume total de poros, densidades do solo e de partículas, teor de matéria orgânica e agregados com diâmetro menor do que 0,105 mm.

No Rio Grande do Sul, Veiga et al. (1993) verificaram que os solos com menor erodibilidade em entressulcos foram os de maior teor de argila e que apresentavam elevado teor de óxidos de ferro e alumínio (extraídos por HCl 6N) e menor grau de dispersão em água da fração argila mais silte.

Albuquerque (1998) verificou que o parâmetro textural "M", baseado nos teores de argila, silte e areia muito fina (Wischmeier et al., 1971) foi o mais significativamente correlacionado com a erodibilidade em entressulcos de sete solos do RS, expressando o efeito dos teores de silte e areia muito fina em aumentar e da argila em diminuir a erodibilidade em entressulcos. Segundo Albuquerque (1998), o silte correlaciona-se positivamente com a erodibilidade em entressulcos, enquanto que a argila correlaciona-se negativamente. Por outro lado, Veiga et al. (1993) não verificaram correlação significativa da erodibilidade do solo em entressulcos com o parâmetro textural M.

Albuquerque (1998) propôs um modelo de predição da erosão em entressulcos que inclui três variáveis independentes: diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP_{KC} - Kemper & Chepil, 1965), delta pH ($pH_{KCl} - pH_{H_2O}$) e parâmetro textural "M", e para as condições do Sul do Brasil recomendou o uso de modelos que considerem outros parâmetros além da textura do solo.

Uma característica importante dos solos é o tipo e o teor de óxidos (Römken et al., 1977). Os óxidos são indicadores de pedoambientes e sua concentração está relacionada com o material de origem, com grau de intemperização e com processos pedogênicos de acumulação ou remoção. Os óxidos são geralmente abundantes nos Latossolos (Kämpf & Curi, 2003), os quais possuem alto grau de intemperismo, com fertilidade química geralmente baixa, porém com propriedades físicas muito favoráveis ao desenvolvimento

das plantas e à produção agrícola. Os óxidos de ferro mais abundantes na fração argila dos Latossolos são a goethita e a hematita (Azevedo & Bonumá, 2004).

Os óxidos apresentam uma alta área superficial específica, devido ao seu pequeno tamanho e às irregularidades superficiais, constituindo agentes de ligação entre os constituintes do solo (Römkens et al., 1977; Azevedo & Bonumá, 2004), tornando-se importantes, dessa forma, nas propriedades físicas e químicas dos solos (Kämpf & Curi, 2003).

A alta estabilidade dos agregados dos Latossolos é geralmente atribuída à quantidade de óxidos de Fe e Al presente nesses solos, embora não haja consenso sobre os mecanismos envolvidos (Azevedo & Bonumá, 2004). Segundo Reichert et al. (1992), os óxidos de Fe e Al aumentam a estabilidade de agregados e retardam a formação de selo superficial.

As propriedades físicas, químicas e mineralógicas podem influenciar na estabilidade dos agregados do solo e essa, por sua vez, pode influenciar diretamente na suscetibilidade do solo à erosão hídrica.

1.2.3. Agregação do solo

A estrutura do solo é o resultado da agregação ou arranjo espacial das frações granulométricas primárias do solo em agrupamentos secundários denominados de agregados (Arshad et al., 1996).

O grau de agregação das partículas primárias do solo é uma função complexa de vários parâmetros. Os agentes de formação e estabilização de agregados incluem, dentre outros, o teor e a mineralogia da argila, quantidade e natureza dos cátions, produtos da decomposição da matéria orgânica, partículas inorgânicas e ação das raízes e microrganismos (Arca & Wedd, 1966). Dessa forma, a agregação do solo envolve processos físicos, químicos, mineralógicos e biológicos. Os processos físico-químicos são associados principalmente com as argilas e tendem a ter maior importância em solos de textura fina. Os solos arenosos, em geral, apresentam menor agregação (Brady & Weil, 1999). O aumento no conteúdo de silte aumenta a erodibilidade do solo (Wiscmeier & Mannering, 1969).

Kemper et al. (1987) verificaram que a estabilidade de agregados aumentou quando o teor de argila aumentou de 0 a 350 g kg⁻¹. Cabe ressaltar, entretanto, que os dados dos autores foram avaliados para solos com um teor máximo 400 g kg⁻¹ de argila (principalmente ilita), o que reforça necessidade de avaliar se esse efeito permanece para solos com maior teor de argila.

A estabilidade dos agregados do solo é influenciada também por outros fatores, os quais incluem tamanho de agregados, conteúdo inicial de água e taxa de umedecimento (Truman et al. 1990). Para que os agregados do solo sejam estáveis em água, é necessário que as partículas de argila estejam floculadas (Tisdall & Oades, 1982). Se a argila estiver dispersa, haverá menor agregação e tendência de destruição dos microagregados (Dexter, 2001).

A destruição dos agregados exige a imposição de uma força de rompimento (Kemper & Rosenau, 1986), sendo que existem pelo menos dois mecanismos responsáveis pela quebra dos agregados em microagregados. No primeiro, os agentes cimentantes são dispersos na presença de água. No segundo mecanismo, o rápido molhamento do solo seco em contato com a água livre causa a fragmentação do solo, aumentando a friabilidade e reduzindo a força de tensão entre as partículas (Dexter, 2001). Para Baver et al. (1972) e Tisdall & Oades (1982), essa desagregação do solo é afetada pela hidratação, devido ao aumento da massa de solo e liberação do ar interno e pela ação do impacto das gotas da chuva. Essa quebra dos agregados também pode ocorrer por dispersão físico-química, onde se sucede a redução das forças de atração entre as partículas coloidais enquanto umedecidas (Baver et al., 1972), e/ou quando a força imposta excede a resistência interna do agregado (Cousen & Farres, 1984). Segundo Bryan (1968), a distribuição de tamanho e a estabilidade dos agregados são as propriedades físicas mais importantes na resistência à erosão em muitos solos.

O estado de agregação do solo e a distribuição de diâmetro dos agregados podem ser determinados por vários métodos. Dentre eles, destacam-se os métodos de Kemper & Chepil (1965) e de Kemper & Rosenau (1986). Os resultados podem ser expressos pelo diâmetro médio ponderado (DMP), o diâmetro médio geométrico (DMG) e o índice de estabilidade de agregados (IEA).

A distribuição de tamanho e a estabilidade dos agregados do solo são geralmente determinadas pela técnica de peneiramento úmido, originalmente proposta por Yoder (1936), a qual combina quase todos os mecanismos de quebra dos agregados do solo (Le Bissonais, 1996). Dos métodos utilizados para a determinação da estabilidade dos agregados em água, um dos mais conhecidos é o de Kemper & Rosenau (1986), onde é avaliada a estabilidade em água dos agregados menores que 0,250 mm de diâmetro. Cabe salientar, entretanto, que os agregados podem ser estáveis em água e resistentes a quebra por este método, mas não serem estáveis quando sujeitos ao impacto das gotas de chuva (Young, 1984, Truman et al., 1990).

Conforme Bryan (1968), a estabilidade dos agregados do solo é uma propriedade importante porque governa a facilidade com a qual os agregados maiores podem ser quebrados em pequenos agregados ou partículas individuais, tornando-se vulneráveis a erosão. Segundo o autor, a estabilidade dos agregados é, provavelmente, a propriedade do solo mais importante em relação à sua resistência à erosão hídrica.

Os agregados dos solos são geralmente formados e desagregados obedecendo a uma determinada hierarquia, na qual os agregados grandes se desagregam, desfazendo-se em outros menores e assim sucessivamente até que restem argila, silte e areia. Nos Latossolos, entretanto, os agregados não possuem hierarquia e apresentam a forma de pequenos grânulos, com alta estabilidade e resistência (Azevedo & Bonumá, 2004). Esse comportamento diferenciado dos agregados dos Latossolos justifica a necessidade de uma maior investigação em relação à agregação e a suscetibilidade à erosão hídrica em Latossolos.

1.2.4. Agregação do solo e erodibilidade em entressulcos

O estudo das relações entre estabilidade de agregados e erosão hídrica do solo não é recente e tem sido alvo de vários trabalhos (Wischmeier & Mannering, 1969; Meyer & Harmon, 1984; Kemper & Rosenau, 1986; Reichert & Norton, 1994; Albuquerque, 1998). Existe um consenso entre vários autores de que os solos com maior estabilidade de agregados em água são os menos

suscetíveis à erosão hídrica do solo. Dessa forma, a distribuição de tamanho e a estabilidade dos agregados podem ser fatores importantes para a determinação e estimativa da suscetibilidade dos solos à erosão em entressulcos.

A quebra de agregados e a desagregação de partículas do solo pela chuva podem levar à erosão e ao encrostamento superficial dos solos agrícolas. A suscetibilidade do solo a esses processos é freqüentemente inferida pela medida da estabilidade dos agregados (Le Bissonais, 1996), pois a taxa de erosão é predominantemente controlada pelo processo de quebra de agregados (Hairsine & Hook, 1995; Fox & Le Bissonais, 1998).

Conforme Albuquerque et al. (2000), a relação entre a estabilidade dos agregados e a erosão hídrica do solo é, principalmente, devida a dois fatores: i) em solos mais estáveis, a energia necessária para iniciar a formação de selo superficial é maior do que para solos menos estáveis, pois os agregados resistem mais ao impacto da gota da chuva. Além disso, a infiltração da água em solos estáveis é maior e a descarga unitária do escoamento é menor; ii) mesmo na presença de escoamento superficial, as partículas do solo quando agrupadas em agregados são maiores e com mais massa e, quanto maior a massa dos agregados, maior é a resistência ao transporte pelo escoamento.

Young (1984) e Truman et al. (1990) consideram que, para determinar a relação entre a estabilidade dos agregados e a erodibilidade do solo em entressulcos, devem ser consideradas as forças exercidas tanto pelo impacto das gotas quanto pelo escoamento superficial da água. Nesse sentido, Young (1984) desenvolveu um método que envolve efeito do impacto de gotas de energia de queda conhecida e do peneiramento úmido sobre os agregados do solo. Segundo o autor, esse método pode ser usado para caracterizar a suscetibilidade do solo à erosão em sulcos e em entressulcos. Outros trabalhos com esse princípio foram desenvolvidos por Reicher et al. (1992), Veiga et al. (1993) e por Le Bissonais (1996), os quais encontraram correlação significativa entre a estabilidade dos agregados sob o impacto das gotas da chuva e a erodibilidade do solo em entressulcos. Apesar do método baseado no impacto das gotas ser adequado para representar o processo de quebra dos agregados, esse método tem a desvantagem de necessitar a utilização de um

simulador de chuva e, portanto, de toda a estrutura laboratorial para este fim. Isso torna a estimativa da erodibilidade em entressulcos muito morosa.

A suscetibilidade do solo à erosão em entressulcos é um processo dinâmico, onde existem complexas interações entre as propriedades do solo e o processo de erosão hídrica. A modelagem e a predição da erosão na escala de um simples evento de chuva devem levar em consideração esses processos e interações (Le Bissonais et al., 1995).

A estabilidade dos agregados em água tem sido um indicador importante da suscetibilidade dos solos à erosão hídrica (Le Bissonais, 1996). Esta relação sugere que a erodibilidade do solo em entressulcos pode ser determinada apenas pela avaliação da estabilidade dos agregados em água. Em termos práticos, é desejável que a erodibilidade do solo em entressulcos seja estimada sem a necessidade do uso de chuva simulada, de forma fácil, rápida e com baixo custo.

Conforme Albuquerque (1998), apesar da estabilidade de agregados ser uma determinação indireta, dependente de vários parâmetros do solo, a mesma pode ser utilizada para estimar a erodibilidade em entressulcos, pois os parâmetros do solo que determinam a estabilidade de agregados são, em geral, os mesmos que determinam a suscetibilidade do solo à erosão hídrica. Além disso, a estabilidade de agregados é um parâmetro de fácil determinação e baixo custo, que pode ser realizado em qualquer época do ano, sendo, portanto, promissor para estimar a suscetibilidade dos solos à erosão hídrica.

1.2.5. Efeito da umidade inicial na erosão hídrica do solo

O conteúdo inicial de água do solo tem grande influência tanto na quebra de agregados como na erosão hídrica do solo (Cernuda et al., 1953; Truman & Bradford, 1993; Reichert & Norton, 1994; Le Bissonais, 1996; Kuhn & Bryan, 2004).

Se a condição inicial de umidade do solo não for definida, os testes de laboratório que incluem a quebra dos agregados não podem ser considerados precisos. A quebra dos agregados do solo irá depender do volume de ar dentro dos mesmos, das condições iniciais de umidade e da taxa

de aplicação de água, pela chuva ou irrigação (Cernuda et al., 1953; Loch, 1994). Dessa forma, o conhecimento da interação entre a umidade inicial e a quebra dos agregados pode definir, por exemplo, a frequência de irrigação em um determinado local (Cernuda et al., 1953).

Um alto teor de umidade inicial pode reduzir a coesão do solo (Kemper & Rosenau, 1984). Por outro lado, a estabilidade dos agregados pode ser maior em um solo pré-umedecido (Cernuda et al., 1954; Truman et al., 1990). Cousen & Farres (1984) explicam que, com o aumento no conteúdo de água, a resistência dos agregados pode ser reduzida, pois mais poros tornam-se preenchidos por água, tornando-se afetados por mecanismos físicos e químicos, reduzindo sua resistência interna. Por outro lado, para baixos conteúdos de água, apenas uma parte da microestrutura retém água e, desta forma, existe uma grande variação na taxa de quebra dos agregados. Dessa forma, o efeito da quebra de agregados será mais rápido com solo completamente seco do que com o solo inicialmente úmido (Cernuda et al., 1953).

As taxas de desagregação e de perda do solo em entressulcos também são dependentes da umidade inicial do solo. A forma de umedecimento e o conteúdo inicial de água determinam o mecanismo de quebra e o comportamento dos agregados sujeitos à chuva, exercendo, dessa forma, grande influência na erosão do solo em entressulcos (Le Bissonais et al., 1989; Le Bissonais, 1996). Dessa forma, a resistência do solo ao início do processo erosivo, representado pela erosão em entressulcos, irá depender da estabilidade dos agregados do solo na presença da água. Essa relação entre a estabilidade dos agregados e a erosão hídrica do solo é dependente do conteúdo inicial de água e da taxa de umedecimento (Reichert & Norton, 1994; Le Bissonais et al., 1995), dentre outros fatores.

Na literatura internacional de pesquisa em ciência do solo, a quebra dos agregados pela compressão do ar aprisionado durante o rápido umedecimento é denominada de "*slaking*". Como no Brasil não há um termo para esta designação, neste trabalho esse processo será denominado "*quebra dos agregados*".

O aumento na estabilidade dos agregados de solos pré-umedecidos em relação aos solos secos ao ar pode ser função da redução na taxa de

quebra dos agregados (Le Bissonais et al., 1989; Truman et al., 1990; Reichert & Norton, 1994). A redução no volume de ar aprisionado durante o umedecimento lento dos agregados pode causar uma redução no gradiente de potencial mátrico (Le Bissonais, 1996), evitando que ocorra a quebra dos agregados pela saída do ar aprisionado.

A ocorrência de precipitação em um solo inicialmente seco representa uma condição possível de existir no campo. A superfície do solo exposta ao impacto da gota da chuva e aos ciclos de secagem e umedecimento pode formar selo e crosta superficiais, incorrendo em menor taxa de infiltração, aumento do escoamento superficial e maior erosão hídrica. A magnitude desse processo irá depender, principalmente, do tipo de solo e de sua condição de umidade antecedente à chuva.

1.2.6. Formação de selo e de crosta superficiais

Durante a chuva, os agregados do solo são destruídos mecanicamente pelo impacto das gotas e quimicamente devido à dispersão (Reichert et al., 1994), dando origem à formação de selo durante a chuva e de crosta quando o solo secar (Moore & Singer, 1990). O selo superficial é uma camada fina e adensada com baixa condutividade hidráulica saturada localizada na superfície do solo (Reichert et al., 1992).

A quebra de agregados produz microagregados e partículas primárias do solo das unidades estruturais originais (Le Bissonais & Singer, 1993; Levy et al., 1994; Le Bissonais, 1996).

Na formação do selo superficial, as partículas mais finas podem ser transportadas pelo escoamento de água e carregadas para o interior dos poros, obstruindo a passagem de água em uma estrutura mais densa (McIntyre, 1958; Truman et al., 1990; Reichert & Norton, 1995), promovendo um maior escoamento superficial e perda de solo (McIntyre, 1958).

Agassi et al. (1981) indica que a formação de selo em solos expostos ao impacto da gota é devida a dois mecanismos: i) quebra física dos agregados do solo devido ao umedecimento dos agregados e ao impacto

mecânico das gotas da chuva e ii) dispersão físico-química das partículas de argila, as quais migram e preenchem os poros da superfície do solo.

Alguns estudos sobre o efeito do conteúdo inicial de umidade no solo na formação de selo e crosta têm mostrado resultados contraditórios. A consequência da formação de selo pode se manifestar de duas formas distintas: i) o desenvolvimento do selo pode aumentar a resistência da superfície do solo ao cisalhamento (Bradford et al., 1987), reduzindo a desagregação das partículas ou ii) a formação de selo pode aumentar o escoamento superficial, aumentando a capacidade de transporte de material (Moore & Singer, 1990) e, conseqüentemente, causar uma maior desagregação e transporte das partículas.

Reichert et al. (1994) verificaram que o secamento do solo, com solo contendo argila esmectita, após a formação de selo provocou a contração da argila e a ruptura dos agregados e, portanto, da crosta superficial formada, aumentando a suscetibilidade do solo à erosão hídrica. Segundo os autores, a crosta cria resistência quando a sua água evapora, mas, ao mesmo tempo, a superfície do solo geralmente contrai e desenvolve quebras e planos de fraqueza. Uma vez desenvolvida a crosta, entretanto, ela protege os agregados, que ficam abaixo da superfície, da ação direta do impacto das gotas da chuva (Farres, 1978).

A resistência do solo à erosão em entressulcos varia durante a chuva e depende da persistência das mudanças na estrutura do solo, após diferentes ciclos de secagem e umedecimento, refletindo na formação de selo e de crosta superficiais (Kuhn & Bryan, 2004), os quais podem aumentar a erosão hídrica do solo (Huang & Bradford, 1993).

Entre os eventos de secagem e umedecimento pela chuva, pode ocorrer a reestruturação da crosta (Kuhn & Bryan, 2004). A formação de selo pode levar a um aumento temporário da resistência do solo, mas assim que esta for superada poderá ocorrer novamente a quebra dos agregados, ou seja, é um processo cíclico. A magnitude e a variação temporal desse processo, considerando uma mesma precipitação pluvial, serão dependentes do tipo de solo e de suas condições iniciais de umidade.

A formação de selo e de crosta no solo é um processo dinâmico (Moore & Singer, 1990; Truman et al., 1990), que resulta da quebra dos

agregados e pode reduzir a taxa de infiltração da água no solo e induzir à erosão pelo incremento do escoamento superficial (Moore & Singer, 1990; Reichert et al., 1992; Le Bissonais & Singer, 1993; Le Bissonais et al., 1995; Le Bissonais, 1996).

A condição de solo inicialmente seco pode promover uma rápida quebra dos agregados, devido à expulsão do ar aprisionado, resultando na formação de selo e de crosta superficiais. Por outro lado, o pré-umedecimento do solo pode reduzir o desenvolvimento de crosta, diminuir o escoamento superficial e a erosão hídrica do solo em entressulcos (Le Bissonais & Singer, 1992).

A quebra dos agregados depende de muitos fatores e os processos envolvidos são tão numerosos e complexos que não existe um consenso geral sobre a medida dessa propriedade e sua relação com a formação de crosta superficial e a erosão hídrica do solo (Loch, 1994). Dessa forma, ainda existem muitas lacunas no entendimento do processo de erosão hídrica frente aos efeitos de umidade inicial, secagem e umedecimento e formação de selo e de crosta superficiais.

1.2.7. Erosão em entressulcos e declividade do solo

O grau de declive afeta a perda de solo nas áreas em entressulcos (Truman & Bradford, 1993; Kinnell & Cummings, 1993; Zhang et al., 1998). A principal influência do gradiente de declive na erosão em entressulcos aparece através de seu impacto na velocidade do escoamento superficial (Fox & Bryan, 1999).

A relação entre gradiente de declive e perda de solo é freqüentemente caracterizada como uma função única e independente das propriedades do solo e das condições de superfície. Segundo Bradford & Foster (1996), em solos com elevadas taxas de infiltração, onde a taxa de escoamento superficial é baixa, ou para solos onde a capacidade de transporte seja limitante, a relação entre o grau de declive e a erosão em entressulcos é dependente do tipo de solo. Conforme os autores, o uso de uma única equação para descrever o efeito do gradiente de declive pode não ser satisfatório para

representar o processo de erosão em entressulcos em modelos baseados em processos.

O fator declive adotado no modelo WEPP, para levar em conta o efeito do gradiente de declive na erosão em entressulcos, baseia-se na função empírica desenvolvida por Liebenow et al. (1990). Segundo esses autores, o fator declive pode variar em função das propriedades do solo. Dessa forma, o efeito do gradiente de declive na erosão em entressulcos pode não ocorrer como uma relação comum para todos os solos, pois diferentes solos respondem de maneiras distintas aos agentes erosivos (Kinnell & Cummings, 1993).

No trabalho de Truman & Bradford (1993), o fator de ajuste da variação na declividade (S_f) foi função do tipo de solo e do conteúdo antecedente de umidade. Segundo os autores, um apropriado fator declive, para um determinado solo, deve resultar em igual fator de erodibilidade para uma variação no grau de declive.

Para o uso de modelos teóricos de predição da erosão hídrica do solo, é necessário que sejam avaliados os processos envolvidos. Para tanto, os estudos devem contemplar a maior diversidade possível de solos e situações, pois o solo é um sistema extremamente complexo e sujeito a inúmeras interações. A compreensão dos processos envolvidos na erosão hídrica em entressulcos poderá proporcionar uma melhor estimativa da erodibilidade em entressulcos, auxiliando, dessa forma, no manejo e conservação do solo e da água.

1.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGASSI, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.45, p.848-851, 1981.
- ALBERTS, E.E.; NEARING, M.A.; WELTZ, M.A.; RISSE, L.M.; PIERSON, F.B.; ZHANG, J.M.; LAFLEN, J.M.; SIMANTON, J.R. Soil component. In: FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. (Eds.). **Water Erosion Prediction Project** - WEPP. West Lafayette: USDA, 1995. p.1-47. (Report, 10).
- ALBUQUERQUE, J.A. **Suscetibilidade de alguns solos do Rio Grande do Sul à erosão em entressulcos**. 1998. 154f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1998.
- ALBUQUERQUE, J.A.; CASSOL, E.A.; REINERT, D.J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.24, p.141-151, 2000.
- ARCA, M.N.; WEDD, S.B. Soil aggregation and porosity in relation to contents of free iron oxide and clay. **Soil Sci.**, Baltimore, EUA, v.101, p.164-170, 1966.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science of America, 1996. p.123-141.
- AZEVEDO, A.C.; BONUMÁ, A.S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ci. Rural**, Santa Maria, RS, v.34, n.2, p.609-617, 2004.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Física de Suelos**. 4.ed. México: Union Topográfica Hispano Americana, 1972. 529p.
- BRADFORD, J.M.; FERRIS, J.E.; REMLEY, P.A. Interrill soil erosion processes: I Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.51, p.1566-1571, 1987.
- BRADFORD, J.M.; FOSTER, G.R. Interrill soil and slope steepness. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.60, p.909-915, 1996.

- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**, 12.ed. New Jersey, USA: Prentice Hall do Brasil, 1999. 881p.
- BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um podzólico vermelho-escuro franco-arenoso. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.20, p.127-134, 1996.
- BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife : Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária - Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30).
- BRYAN, R.B. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. **Geoderma**, Amsterdam, v.2, p.5-26, 1968.
- CANTALICE, J.R.B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2001. 140f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.
- CASSOL, E.A.; LIMA, V.S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesq. Agropec. Brasileira**, Brasília, DF, v.38, n.1, p.117-124, 2003.
- CERNUDA, C.F.; SMITH, R.M.; VICENTE-CHANDLER, J. Influence of initial soil moisture condition on resistance of macroaggregates to slaking and to water-drop impact. **Soil Sci.**, Baltimore, EUA, v.77, p.19-27, 1953.
- COUSEN, S.M.; FARRES, P.J. The role of moisture content in the stability of soil aggregates from a temperature silty soil to raindrop impact. **Catena**, Amsterdam, v.11, p.313-320, 1984.
- DEXTER, A. Soil structure: The key to soil function. In: SUSTAINABLE SOIL MANAGEMENT FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION SOIL PHYSICAL ASPECTS INTERNATIONAL CONFERENCE, 2001, Florence, Italy. **Anais....** [Florence, Italy] : Institute Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, 2001. p.78-90.
- ELLIOT, W.J.; LIEBENOW, A.M.; LAFLEN, J.M.; KHOL, K.D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987, 1988**. West Lafayette: USDA-ARS, 1989. (Report, 3).
- ELLISON, W.D. Soil detachment and transportation. **Soil Conserv.**, Madison, Wisconsin, USA, v.11, p.171-190, 1946.
- ELLISON, W.D. Soil erosion studies. **Agric. Eng.**, St. Joseph, v.28, p.145-146, 1947.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF, 1999. 412p.

- FARENHORST, A.; BRYAN, R.B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. **Catena**, Amsterdam, v.25, p.47-62, 1995.
- FARRES, P.J. Role of aggregate size and time in the soil crusting process. **Earth Surf. Process**, Madison, Wisconsin, USA, v.3, p.243-254, 1978.
- FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH II, J.C.; NICKS, A.D.; NEARING M.A.; LAFLEN, J.M. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. (Eds.) **Water erosion prediction project – WEPP: Technical Documentation**. West Lafayette: USDA-ARS-NSERL, 1995. (NSERL Report, 10).
- FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. **Water erosion prediction project: Technical Documentation**. West Lafayette: USDA-ARS-NSERL, 1995. (NSERL Report, 10).
- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process: Hydrologic modeling of small watersheds. In: HANN, C.T. (Ed.). St. Joseph: ASAE, 1982. p.297-380. (Monogr. 5).
- FOSTER, G.R.; FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A.; LANE, L.J.; RISSE, L.M.; FINKNER, S.C. Hillslope erosion component. In: FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. (Eds.). **Water erosion prediction project – WEPP: Technical Documentation**. West Lafayette: USDA-ARS-NSERL, 1995. (NSERL Report, 10).
- FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: PROCEEDING SEDIMENT-YIELD WORKSHOP, 1972, Oxford. **Proceedings...** Washington: USDA, 1975. p.190-207.
- FOX, D.M.; BRYAN, R.B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. **Catena**, Amsterdam, v.38, p.211-222, 1999.
- FOX, D.M.; LE BISSONNAIS, Y. Process-based analysis of aggregate stability effects on sealing, infiltration, and interrill erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.62, p.717-724, 1998.
- GERITS, J.J.P.; LIMA, J.L.P.D.; BROEK, T.M.W.V.D. Overland flow and erosion. In: ANDERSON, M.G.; BURT, T.P. **Process studies in hillslope hydrology**. Chichester: J. Wiley & Sons, 1990. p.173-214.
- GUY, B.T.; DICKINSON, W.T.; RUDRA, R.P.; WALL, G.J. Hydraulics of sediment-laden sheetflow and the influence of simulated rainfall. **Earth Surf. and Landforms**, New York, USA, v.15, p.101-118, 1990.
- HAIRSINE, P.B.; HOOK, R.A. Relating soil erosion by water to nature of soil surface. In: SO, H.B.; SMITH, G.D.; RAINE, S.R.; SCHAFER, B.M.; LOCH, R.J. (Eds.). **Sealing, crusting and hardsetting soils: Productivity and conservation**. Melbourne : Australian Soc. of Soil Sci., 1995. p.77-91.

- HUANG, Chi-hua; BRADFORD, J.M. Analyses of slope and runoff factors based on the WEPP erosion model. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.57, n.5, p.1176-1183, 1993.
- KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: TÓPICOS em Ciência do Solo. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2003. v.3, p.1-54.
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L. (Eds.). **Methods of soil analysis**. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, 1965. p.499-510. (Agronomy Monogr., 9).
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. 2.ed. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America: 1986. p.425-441.
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C.; DEXTER, A.R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.51, p.860-867, 1987.
- KINNELL, P.I.A. The influence of flow discharge on sediment concentrations in raindrops induced flow transport. **Australian J. Soil Res.**, Melbourne, v.26, p.575-582, 1988.
- KINNELL, P.I.A. The effects of flow on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.34, p.161-168, 1991.
- KINNELL, P.I.A.; CUMMINGS, D. Soil/Slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.36, p.381-387, 1993.
- KUHN, N.J.; BRYAN, R.B. Drying, soil surface condition and interrill erosion on two Ontário soils. **Catena**, Amsterdam, v.57, p.113-133, 2004.
- LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. **European J. Soil Sci.**, Orléans, France, v.47, p.425-437, 1996.
- LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A.; ORLÉANS, J. Laboratory experimental study of soil crusting: Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. **Catena**, Amsterdam, v.16, p.377-392, 1989.
- LE BISSONNAIS, Y.; RENAUX, B.; DELOUCHE, H. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. **Catena**, Amsterdam, v.25, p.33-46, 1995.

- LE BISSONNAIS, Y.; SINGER, M.J. Seal formation, runoff, and interrill erosion from seventeen California soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.57, p.224-229, 1993.
- LEVY, G.J.; LEVIN, J.; SHAINBERG, I. Seal formation and interrill soil erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.58, p.203-209, 1994.
- 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, v.33, p.1882-1888, 1990.
- LIMA, P.M.P.; ANDRADE, H. Erodibilidade em entressulcos e atributos de solos com B textural e B latossólico do Sul de Minas Gerais. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.25, p.463-474, 2001.
- LOCH, R.J. A method for measuring aggregate water stability with relevance to surface seal development. **Australian J. Soil Sci.**, Melbourne, v.32, p.687-700, 1994.
- McINTYRE, D.S. Permeability measurement of soil crusts formed by raindrop impact. **Soil Sci.**, Baltimore, EUA, v.58, p.185-189. 1958.
- MEYER, L.D. Rain Intensity affects interrill erosion. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n.6, p.1472-1475, 1981.
- MEYER, L.D.; FOSTER, G.R.; RÖMKENS, M.J.M. Source of soil eroded by water from uplands slopes. In: PRESENT and perspective technology for predicting sediment yields and sources. Washington: USDA-Agricultural Research, 1975. p.177-189.
- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.48, p.1152-1157, 1984.
- MEYER, L.D.; MONKE, E.J. Mechanics of erosion bay rainfall and overland flow. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.8, p.572-577, 1965.
- MOORE, D.C.; SINGER, M.J. Crust formation effects on soil erosion processes, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.54, p.1117-1123, 1990.
- NEARING, M.A. The mechanics of soil detachment by raindrops an runoff. **Eurasian Soil Sci.**, Amsterdam, v.30. n.5, p.552-556, 1997.
- REICHERT, J.M.; NORTON, L.D. Aggregate stability and rain-impacted sheet erosion of air-dried and prewetted clayey surface soils under intense rain. **Soil Sci.**, Baltimore, v.158, p.159-169, 1994.
- REICHERT, J.M.; NORTON, L.D. Surface seal micromorphology as affected by fluidized bed combustion bottom-ash. **Soil Technol.**, Netherlands, v.7, p.303-310, 1995.

- REICHERT, J.M.; NORTON, L.D.; HUANG, C. Sealing amendment, and rain intensity effects on erosion of high-clay soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.58, p.1199-1205, 1994.
- REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Campinas, SP, v.16, p.289-298, 1992.
- ROCKENBACH, C.A. **Erosão em entressulcos sob diferentes coberturas por resíduos de trigo em um podzólico vermelho-amarelo sob chuva simulada**. 1992. 108f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1992.
- RÖMKENS, M.J.M.; ROTH, C.B.; NELSON, D.W. Erodibility of select clay subsoils in relation to physical and chemical properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.41, p.954-960, 1977.
- SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; CASSOL, E.A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.25, n.2, p.431-441, 2001.
- SIMONS, D.B.; SENTURK, F. Sediment Transport Technology: water and sediment dynamics. In: WATER Resources Publications. [S.l. : s.n], 1992. 897p.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water stable aggregates in soils. **J. Soil Sci.**, New Zealand, v.33, p.141-163, 1982.
- TRUMAN, C.C.; BRADFORD, J.M. Laboratory determination of interrill soil erodibility. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.59, p.519-526, 1995.
- TRUMAN, C.C.; BRADFORD, J.M. Relationships between rainfall intensity and the interrill soil loss-slope steepness ratio as affected by antecedent water content. **Soil Sci.**, Baltimore, EUA, v.156, p.405-413, 1993.
- TRUMAN, C.C.; BRADFORD, J.M.; FERRIS, J.E. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.54, p.1385-132, 1990.
- VEIGA, M. da; CABEDA, M.S.V.; REICHERT, J.M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Campinas, SP, v.17, n.1, p.289-298, 1993.
- WATSON, D.A.; LAFLEN, J. M. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.1, p.98-102, 1986.

- WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **J. Soil Water Conserv.**, Akey, v.26, p.189-193, 1971.
- WISCHMEIER, W.H.; MANNERING, J.V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, Wisconsin, USA, v.33, p.131-137, 1969.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses** – a guide to conservation planning. Washington :USDA, 1978. (Agr. Handbook, 537).
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions Am. Geophys. Union**, Washington, USA, v.39, p.285-291, 1958.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **J. Am. Soc. Agron.**, Madison, Wisconsin, USA, v.28, p.337-351, 1936.
- YOUNG, R.A. A method of measuring aggregate stability under waterdrop impact. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, p.1351-1354, 1984.
- ZHANG, X.C.; NEARING, M.A.; MILLER, W.P.; NORTON, L.D.; WEST, L.T. Modeling Interrill Sediment Delivery. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.62, p.438-444, 1998.

CAPÍTULO II

ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE EM ENTRESSULCOS DE LATOSSOLOS DO RIO GRANDE DO SUL

Autor: Maria Cândida Moitinho Nunes

Orientador: Prof. Elemar Antonino Cassol

RESUMO

A erosão hídrica do solo pode ser estudada pela separação do processo em erosão em sulcos e erosão em entressulcos. O entendimento do comportamento da desagregação do solo ao longo de um evento de chuva pode contribuir para a estimativa da suscetibilidade do solo à erosão em entressulcos. Alguns modelos representam a suscetibilidade do solo à erosão por um fator de erodibilidade do solo em entressulcos. A determinação experimental desse parâmetro, tanto no campo quanto no laboratório, é bastante demorada e onerosa. A determinação de algumas características ou propriedades do solo pode facilitar a estimativa indireta da erodibilidade do solo em entressulcos. Este estudo foi realizado com os seguintes objetivos: i) verificar a existência de correlação entre a estabilidade dos agregados em água e o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i); ii) avaliar o uso do percentual de areia e de argila, conforme proposto pelo modelo WEPP, para a predição do fator K_i e iii) identificar os parâmetros do solo que melhor se correlacionam com o fator K_i . Em laboratório foram determinadas as taxas de erosão em entressulcos, para três Latossolos, com diferentes classes texturais (Latosolo Vermelho aluminoférrico típico- LVaf; Latossolo Vermelho distroférico- LVdf; Latossolo Vermelho distrófico- LVd). Os solos mobilizados e descobertos foram acondicionados em parcelas experimentais com área útil de $0,36 \text{ m}^2$, mantidas com declividade de $0,09 \text{ m m}^{-1}$, sujeitos a pré-umedecimento e tensão de água de -6 kPa , aplicando-se chuva simulada com intensidade média de 88 mm h^{-1} , durante 180 minutos. Solos com maior teor de argila e de óxidos de ferro e maior estabilidade de agregados em água apresentam menor suscetibilidade à erosão em entressulcos; O fator de erodibilidade do solo em entressulcos variou conforme o tipo de solo. A determinação experimental do fator K_i (erodibilidade do solo) resultou em um valor de $0,76 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ para o Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (LVaf), $0,97 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ para o Latossolo Vermelho distroférico típico (LVdf) e $1,48 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ para o Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd). O uso dos teores de areia e de argila, conforme sugerido pelo modelo WEPP, não foi adequado para prever o fator de erodibilidade em entressulcos dos solos estudados. O índice de estabilidade de agregados em água teve correlação altamente significativa ($r = -0,90^{**}$) com o fator de erodibilidade do solo em entressulcos. Os teores de argila e de óxidos de ferro de baixa cristalinidade explicaram 97% ($p < 0,01$) da erodibilidade do solo em entressulcos, podendo, dessa forma, ser utilizados para estimar o fator de erodibilidade do solo em entressulcos, para solos com características semelhantes as dos Latossolos estudados.

CHAPTER II

ESTIMATING INTERRILL SOIL ERODIBILITY OF OXISOLS FROM RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

Author: Maria Cândida Moitinho Nunes

Adviser: Prof. Elemar Antonino Cassol

ABSTRACT

Soil water erosion may be studied by dividing it into processes of rill and interrill erosion. The understanding of the behavior and of the interactions involved in soil detachment may contribute to adequate estimation of interrill soil erodibility. Some erosion models represent the susceptibility to interrill erosion as soil erodibility. The experimental procedure to determine the interrill soil erodibility under field or laboratory conditions is laborious, time consuming and has high cost. Indirect determination of the interrill soil erodibility based on some soil characteristics may facilitate this task. A study was carried out with the following objectives: i) to verify the correlation among aggregate water stability and interrill soil erodibility; ii) to evaluate the use of soil sand and clay content for the prediction of interrill soil erodibility, as presented in the WEPP model. Interrill erosion rates were determined in the laboratory under simulated rainfall of 88 mm h^{-1} applied during 180 minutes on three oxisols of different clay content from Rio Grande do Sul, Brasil, on bare soil using experimental plots of $0,36 \text{ m}^2$ and kept at water tension of -6 kPa and slope of 0.09 m m^{-1} . Soils with higher clay content and iron oxide of low content showed less susceptibility to interrill erosion. Values of soil erodibility (K_i factor) experimentally determined varied from $0.76 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ to $1.48 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ for the studied oxisols. Using soil sand and clay contents, as suggested by the WEPP model, did not show to be adequate to estimating the interrill soil erodibility (K_i factor). The aggregate water stability index showed high correlation ($r = -0.90^{**}$) with the interrill soil erodibility. The variation in clay and low cristalinity iron oxide contents explained 97% ($p < 0.01$) of the interrill soil erodibility variation and, thus, may be used as a K_i factor estimation for soils with characteristics near to the oxisols of this study.

CAPÍTULO II – ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE EM ENTRESSULCOS DE LATOSSOLOS DO RIO GRANDE DO SUL

2.1. INTRODUÇÃO

O entendimento do processo erosivo pode auxiliar na tomada de decisões sobre o tipo e a forma de manejo e conservação do solo e da água a serem adotados em uma determinada área. O conhecimento do processo de erosão hídrica também é essencial para o desenvolvimento de modelos de predição das perdas de solo por erosão.

O processo de erosão pode ser dividido em erosão em entressulcos e em erosão em sulcos (Foster & Meyer, 1975). A erosão em entressulcos é causada, principalmente, pela desagregação das partículas do solo devido ao impacto da gota da chuva e transporte pelo escoamento superficial. A erosão em sulcos é devida à desagregação, transporte e deposição das partículas do solo pelo escoamento concentrado (Foster & Meyer, 1975; Foster, 1982, Alberts et al., 1995).

No modelo WEPP - *Water Erosion Prediction Project* (Flanagan & Nearing, 1995), o aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos, para uma dada declividade, sem efeito de cobertura, de raízes, de selo e crosta e de gelo e degelo, é modelado como sendo proporcional ao produto da intensidade da chuva e da descarga unitária do escoamento, com a constante de proporcionalidade sendo o parâmetro erodibilidade do solo em entressulcos (Flanagan et al., 1995).

A erodibilidade de um solo representa a sua suscetibilidade em erodir devido às suas características intrínsecas, sendo, portanto, função de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas (Foster, 1982).

A taxa de desagregação do solo nas áreas em entressulcos é diretamente proporcional ao quadrado da intensidade da chuva (Meyer, 1981). Essa relação foi inicialmente adotada pelo modelo WEPP, considerando condições de solo descoberto, recém preparado e sem resíduos, e utilizada por vários autores (Elliot et al., 1989; Meyer & Harmon, 1984; Rockenbach, 1992; Braida & Cassol, 1996; Albuquerque et al., 2000; Schäfer et al., 2001; Cantalice, 2001; Cassol & Lima, 2003), sendo representada da seguinte forma:

$$D_i = K_i I^2 S_f \quad (2.1)$$

onde D_i é a taxa de desagregação em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_i é o fator erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}) e S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

O modelo WEPP considera que o escoamento superficial deve ser suficiente para transportar todo o material desagregado, quando, então, a taxa de desagregação em entressulcos será igual à taxa de aporte de sedimentos. Para solos com elevada taxa de infiltração e, portanto, pouco escoamento superficial, a taxa de aporte de sedimentos poderá ser menor que a taxa de desagregação, pela limitação da capacidade de transporte do escoamento superficial em entressulcos. Nesse caso a expressão (2.1) pode não ser capaz de mostrar os efeitos do escoamento superficial da água na erosão em entressulcos, sendo sugerido pelo modelo WEPP a inclusão da taxa máxima de escoamento superficial, considerada com sendo a taxa unitária do escoamento, q_i (Kinnell, 1991; Kinnell & Cummings, 1993; Truman & Bradford, 1995; Zhang et al., 1998). Dessa forma a taxa de aporte de sedimentos dependerá do produto da intensidade da chuva pela taxa unitária do escoamento, ao invés da intensidade da chuva ao quadrado.

Zhang et al. (1998) avaliaram o transporte de sedimentos nas áreas em entressulcos para um solo franco arenoso e para um argiloso. Concluíram que a perda de sedimentos se correlacionou com o fator descarga unitária do escoamento, indicando a importância desse fator na predição da perda de sedimentos. Segundo os autores, o escoamento superficial laminar é um importante agente no aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos.

Para solos com escoamento superficial suficiente para transportar todo o material desagregado, a taxa de aporte de material para fora da área em

estudo será igual à taxa de desagregação do solo nas áreas em entressulcos. Isto ocorre quando, em condições de equilíbrio, a taxa de escoamento superficial atinge a taxa de precipitação pluvial. Neste caso, a equação (2.1) pode ser utilizada para expressar a taxa de aporte de sedimentos da erosão em entressulcos para os sulcos.

Para solos com alta taxa de infiltração e, portanto, pouco escoamento superficial, a taxa de desagregação do solo poderá ser maior do que a taxa de aporte de sedimentos. Para levar em conta o efeito do escoamento superficial e, indiretamente, da infiltração da água no transporte de sedimentos, o modelo WEPP passou a considerar a descarga unitária do escoamento na taxa de desagregação do solo em entressulcos, da seguinte forma:

$$D_i = K_i I q_i S_f \quad (2.2)$$

onde D_i é a taxa de desagregação em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_i é o fator erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}); q_i é a taxa de excesso de precipitação ou descarga unitária do escoamento (m s^{-1}) e S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

Admitindo-se que a taxa de aporte de sedimentos e a taxa de desagregação são iguais, o rearranjo da expressão (2.2) permite determinar o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) em estudos de campo ou de laboratório, onde são determinadas as taxas de aporte de sedimentos e conhecidas a intensidade da chuva, a taxa máxima de escoamento superficial e a declividade da área, da seguinte forma:

$$K_i = \frac{D_i}{I q_i S_f} \quad (2.3)$$

onde K_i é o fator erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}); D_i é a taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}), q_i é a taxa de excesso de chuva ou descarga unitária do escoamento (m s^{-1}) e S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

O fator erodibilidade em entressulcos (K_i) depende do tipo de solo (Liebenow et al., 1990; Veiga et al., 1993; Kinnell & Cummings, 1993; Truman & Bradford, 1995; Alberts et al., 1995; Albuquerque et al., 2000). A erodibilidade do solo em entressulcos é influenciada por propriedades como textura do solo (Meyer & Harmon, 1984; Bradford et al., 1987; Arshad et al., 1996), teor e

mineralogia da argila (Albuquerque, 1998), distribuição, tipo e quantidade de matéria orgânica (Meyer & Harmon, 1984; Lima & Andrade, 2001), teor e tipo de óxidos (Reichert et al., 1992; Le Bissonais & Singer, 1993; Veiga et al., 1993; Lima & Andrade, 2001). A estabilidade dos agregados do solo combina e integra os efeitos de praticamente todos os parâmetros texturais e químicos bem como suas interações dentro de um único valor (Legout et al., 2005).

A determinação da erodibilidade do solo em entressulcos em laboratório com aplicação de chuva simulada pode se tornar dispendiosa e demandar tempo e no campo as dificuldades são ainda maiores. Vários autores têm estudado relações entre parâmetros do solo e sua suscetibilidade à erosão em entressulcos (Meyer & Harmon, 1984; Veiga et al., 1993; Le Bissonais & Singer, 1993; Alberts et al., 1995; Albuquerque et al., 2000; Lima & Andrade, 2001).

A distribuição de diâmetro dos agregados e sua estabilidade são características que influem na desagregação do solo pelo impacto das gotas da chuva (Al-Durrah & Bradford, 1982). Fica evidente, dessa forma, que a estabilidade dos agregados pode ser um parâmetro adequado para estimar a erodibilidade do solo em entressulcos.

O fator de erodibilidade do solo em entressulcos no modelo WEPP pode ser estimado por meio dos teores de areia e argila (Alberts et al., 1995). Esse modelo foi desenvolvido com base em solos de clima temperado (Elliot et al., 1989) sujeitos, portanto, a uma taxa de intemperismo menor do que a dos Latossolos brasileiros. Para a estimativa da erodibilidade em entressulcos desses Latossolos, pode ser necessário o uso de outros parâmetros, além dos teores de areia e argila.

Uma característica importante dos solos é o tipo e o teor de óxidos (Römken et al., 1977). Os óxidos, geralmente abundantes nos Latossolos, são indicadores de pedoambientes e sua concentração está relacionada com o material de origem, com o grau de intemperização e com os processos pedogenéticos de acumulação ou remoção (Kämpf & Curi, 2003). Os óxidos apresentam uma alta área superficial específica, constituindo importantes agentes de ligação entre os constituintes do solo (Römken et al., 1977; Azevedo & Bonumá, 2004), dessa forma influenciando nas propriedades físicas e químicas dos solos (Kämpf & Curi, 2003). A alta estabilidade dos agregados

dos Latossolos é geralmente atribuída à quantidade de óxidos presente nesses solos (Azevedo & Bonumá, 2004). Solos com elevada estabilidade de agregados tendem a ter uma menor erodibilidade em entressulcos (Meyer & Harmon, 1984; Reichert & Norton, 1994; Le Bissonais, 1996, Albuquerque et al., 2000). Dessa forma, é provável que a quantidade de óxidos presente nos Latossolos possa proporcionar uma elevada estabilidade de agregados e uma menor suscetibilidade do solo à erosão hídrica em entressulcos.

A quebra dos agregados é o primeiro passo no processo de erosão hídrica em entressulcos (Legout et al., 2005), influenciando na taxa de desagregação e no aporte de sedimentos. A avaliação da estabilidade dos agregados em água pode indicar o grau de suscetibilidade de um solo à erosão hídrica em entressulcos e, portanto, a erodibilidade do solo em entressulcos.

De forma geral, a erodibilidade do solo em entressulcos irá depender da capacidade dos agregados superficiais em resistir aos efeitos da chuva e do escoamento superficial combinados. Portanto, pode ser que a erodibilidade do solo em entressulcos possa ser estimada por meio da estabilidade dos agregados do solo, com a vantagem de não necessitar o uso de chuva simulada, tornando a determinação mais fácil, rápida e com menor custo.

O presente trabalho teve os seguintes objetivos:

I) Verificar a existência de correlação entre a estabilidade dos agregados do solo em água e a erodibilidade do solo em entressulcos;

II) Avaliar se o uso do percentual de areia e de argila, conforme proposto pelo modelo WEPP, é adequado para a predição da erodibilidade do solo em entressulcos, para três Latossolos do Rio Grande do Sul;

III) Identificar os parâmetros que melhor se correlacionam com o fator de erodibilidade do solo em entressulcos e que possam constituir um modelo simples de predição desse fator.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Local

A pesquisa foi desenvolvida nos Laboratórios de Erosão, Física e Química do Solo do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, em Porto Alegre (RS), Brasil, no período de 2003 a 2005.

2.2.2. Características dos solos e locais de coleta

Para a realização deste estudo foram utilizados três Latossolos do Estado do Rio Grande do Sul, com diferentes teores de argila.

O critério de seleção dos solos teve como base o teor de argila, a representatividade no Estado e a presença e tipo de efeito residual de uso e manejo.

Segundo Brasil (1973) os Latossolos representam aproximadamente 21% dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. As classes de solos usadas neste estudo representam aproximadamente 15% dos solos do Estado. Esses solos são referidos por Brasil (1973) como pertencentes às unidades de mapeamento Erechim, Santo Ângelo e Cruz Alta, os quais são classificados por Embrapa (1999), respectivamente, como Latossolo Vermelho aluminoférrico (LVaf), Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd).

As amostras de solo foram coletadas o mais próximo possível do local de descrição do perfil modal da unidade de mapeamento utilizada em Brasil (1973). Os solos de cada unidade foram coletados em duas situações distintas de uso e manejo: em condições naturais (sem uso agrícola) e sob cultivo agrícola continuado.

O solo da unidade de mapeamento Erechim (Brasil, 1973) é classificado como Latossolo Vermelho aluminoférrico típico textura muito argilosa - LVaf (Embrapa, 1999). Esse solo foi coletado no município de Erechim-RS, em área de mata nativa (uso natural) e sob cultivo, no Campus da URI (Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões), na estrada para Gaurama-RS, km 5 da RS 211. O solo cultivado estava sob semeadura direta há aproximadamente 5 anos. Anteriormente, o mesmo fora usado por mais de 20 anos com cultivo convencional. Essa área cultivada vinha sendo usada para o cultivo de aveia no inverno e de milho ou soja no verão. Na época da coleta, a área estava sob cultivo de soja.

O solo da unidade de mapeamento Santo Ângelo (Brasil, 1973) é classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico textura muito argilosa - LVdf (Embrapa, 1999). Esse solo foi coletado no município de Santo Ângelo-RS, em área de campo nativo (uso natural) e sob cultivo, na propriedade do Sr. Júlio Antunes Vieira Filho, a 2 km da sede do município, km 2 da RS 218, direção Santo Ângelo – Catuípe. O solo cultivado estava sob semeadura direta há aproximadamente 5 anos. Anteriormente, a área fora utilizada com cultivo convencional por, pelo menos, 30 anos. Essa área era cultivada com soja no verão e azevém no inverno. No momento da coleta, a área estava sob azevém espontâneo.

O solo da unidade de mapeamento Cruz Alta (Brasil, 1973) é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico textura franco argilo arenosa - LVd (Embrapa, 1999). Esse solo foi coletado no município de Cruz Alta-RS, em área de campo nativo (uso natural) e sob cultivo, na propriedade do Sr. Jorge A. Grubert Filho, distante 7 km da sede do município, próximo a BR 158, no sentido de Cruz Alta a Santa Maria, a 1 km do trevo de acesso a Salto do Jacuí (à direita e a 300 m do acesso para a Área Industrial – Vila Benjamin Not). O solo cultivado estava sob semeadura direta há 10 anos. Anteriormente, a área fora utilizada com cultivo convencional por mais de 20 anos. Esta área cultivada vinha sendo semeada com aveia ou trigo no inverno e soja no verão. No momento da coleta, a área estava sob cultivo de soja.

Na Tabela 2.1 são mostrados alguns dados de análises químicas dos solos, com base no Laudo do Laboratório de Análises do Departamento de Solos da FA-UFRGS.

Tabela 2.1. Resultados do laudo de análises químicas dos solos, obtidos no Laboratório de Análises do Departamento de Solos da FA-UFRGS.

Determinação	Erechim (LVaf)		Santo Ângelo (LVdf)		Cruz Alta (LVd)	
	natural	cultivado	natural	cultivado	natural	cultivado
pH H ₂ O	5,2	5,8	4,3	6,0	5,0	5,3
Índice SMP	5,4	5,9	4,4	6,1	5,6	6,1
P (mg dm ⁻³)	1,3	6,4	4,3	9,9	4,6	25
K (mg dm ⁻³)	319	343	97	152	151	400
M.O. (%)	3,3	4,1	5,0	4,3	3,3	3,6
Al trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,9	0	4,6	0	1,5	0,1
Ca trocável (cmol _c dm ⁻³)	3,1	7,4	1,0	7,4	0,9	3,6
Mg trocável (cmol _c dm ⁻³)	2,3	4,9	0,4	3,4	0,9	1,7
Al+H (cmol _c dm ⁻³)	8,7	4,9	27,4	3,9	6,9	3,9
CTC (cmol _c dm ⁻³)	15,0	18,1	29,7	15,1	9,2	10,3
% Sat CTC (em Bases)	41	73	6	74	24	61

LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico.

2.2.3. Coleta e preparo das amostras de solo

A coleta dos solos foi realizada na camada de 0 a 20 cm, por meio de uma pá-de-corte, após a remoção da vegetação e de 1 a 2 cm da superfície do solo. Feito isso, o solo foi acondicionado em recipientes plásticos (bombonas) e transportado para o Laboratório de Erosão do Solo do Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

Ao lado do local de coleta dos solos, foram retiradas amostras com estrutura preservada por meio de anéis cilíndricos de volume conhecido, para a determinação da densidade do solo e da curva de retenção de água no solo. As demais determinações físicas e as determinações químicas foram realizadas em sub-amostras do material coletado no campo, com estrutura alterada.

Para as determinações físicas (densidade das partículas e distribuição de diâmetro das partículas) e químicas (acidez ativa, carbono orgânico e teor de óxidos de ferro pedogênicos), as amostras de solo foram secas ao ar, moídas com rolo de madeira e passadas em peneira com abertura

de malha de 2 mm, para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA), conforme Embrapa (1997).

Para a caracterização física dos solos as determinações foram efetuadas em três repetições cada. Para as determinações químicas foram utilizadas duas repetições.

2.2.4. Caracterização física dos solos

Os solos foram fisicamente caracterizados pela determinação da curva de retenção de água no solo, densidade de partículas, distribuição de diâmetro das partículas do solo e distribuição de diâmetro e estabilidade dos agregados em água.

2.2.4.1. Retenção de água

A retenção de água, com base em volume, foi avaliada pela determinação da curva característica de água no solo, em amostras indeformadas, com volume médio de $2,75 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Foi utilizado um funil de placa porosa para as tensões de -1; -6 e -10 kPa. Para as tensões de -33,3; -100; -300; -500 e -1500 kPa foram usadas câmaras de pressão de Richards.

2.2.4.2. Densidade do solo

No local de coleta das amostras de solo no campo, foram coletadas amostras com estrutura natural, por meio de cilindros coletores, com volume médio de $2,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, para a determinação da densidade do solo, segundo Embrapa (1997), a qual foi calculada pela seguinte equação:

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad (2.4)$$

onde D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}); M_{ss} é a massa do solo seco a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ (Mg) e V_t é o volume total do solo (m^3).

2.2.4.3. Densidade de partículas

A densidade das partículas foi determinada pelo método do picnômetro, segundo Blake & Hartge (1986), utilizando 5 g de terra fina seca em estufa (TFSE) a $105 \text{ }^\circ\text{C}$. No solo LVaf (LVaf), devido ao alto teor de matéria

orgânica (MO) existente, foi realizada a queima da mesma com peróxido de hidrogênio, antes da determinação da densidade de partículas.

2.2.4.4. Distribuição de diâmetro das partículas do solo

A análise granulométrica do solo foi realizada pela distribuição de diâmetro das partículas primárias do solo, conforme o método da pipeta (Embrapa, 1997), usando hidróxido de sódio (NaOH - 1N) como agente dispersante.

Para a determinação da argila dispersa em água foi utilizado o mesmo procedimento da determinação da argila total, porém, sem o uso de dispersante químico. A partir dos dados obtidos foi possível calcular o grau de floculação, obtido da seguinte forma:

$$GF = \frac{Arg - Arg_{H_2O}}{Arg} \times 100 \quad (2.5)$$

onde GF é o grau de floculação (%); Arg é a fração da argila dispersa em hidróxido de sódio - NaOH ($g\ kg^{-1}$) e Arg_{H_2O} é a fração da argila dispersa em água ($g\ kg^{-1}$).

Para o solo LVaf (Erechim), tanto natural como cultivado, a determinação da distribuição de diâmetro e da densidade de partículas foi realizada após a destruição da matéria orgânica, com peróxido de hidrogênio, conforme sugerido por Embrapa (1997), para solos com mais de 5% de matéria orgânica.

A fração areia foi dividida, por tamisamento a seco, em cinco classes de diâmetro (mm), conforme classificação USDA: areia muito fina (AMF: 0,053-0,105 mm), areia fina (AF: 0,105-0,250 mm), areia média (AM: 0,250-0,50 mm), areia grossa (AG: 0,50-1,00 mm) e areia muito grossa (AMG: 1,00-2,00 mm).

A partir dos dados obtidos pelos métodos anteriormente mencionados, foi possível determinar o parâmetro textural M (Wischmeier et al., 1971), obtido da seguinte forma:

$$M = (Sil + AMF) \cdot (100 - Arg) \quad (2.6)$$

onde Sil é o teor silte ($g\ kg^{-1}$); AMF é o teor de areia muito fina ($g\ kg^{-1}$) e Arg é o teor de argila ($g\ kg^{-1}$), todos obtidos com dispersante químico (NaOH).

2.2.4.5. Distribuição de agregados em classes de diâmetro

A distribuição de tamanho dos agregados foi obtida conforme o método original de Kemper & Chepil (1965). Este parâmetro também foi obtido pelo método de Kemper & Chepil (1965) modificado por Tisdall & Oades (1979). Para as determinações da distribuição de agregados em classes de diâmetro, as amostras coletadas foram destorroadas manualmente, com o cuidado de separar os agregados nos planos de fraqueza natural, e passadas em peneira com abertura de malha de 9,51 mm. Após, as amostras foram espalhadas em bandejas para secar ao ar e à sombra. Foram usadas subamostras equivalentes a 50 g de solo seco em estufa (umidade corrigida), as quais foram colocadas sobre papel filtro para a saturação por capilaridade por um período de 24 horas. Após, as amostras foram colocadas sobre um conjunto de peneiras com diâmetros de malha de 4,76; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm. O conjunto foi colocado em um agitador vertical, semelhante ao de Yoder (1936), com 45 oscilações por minuto e posto a agitar por um período de 10 minutos. Após, o material menor que 0,25 mm foi passado manualmente em peneiras com abertura de malha de 0,105 e 0,053 mm. Todo o material retido em cada peneira foi seco em estufa e a massa determinada por pesagens. A fração menor do que 0,053 mm foi obtida pela decantação e pesagem do material que passou pela peneira.

O solo retido em cada classe foi seco a 105°C e pesado. Após, foi determinada a quantidade de areia em cada classe (não considerada como agregado), pela dispersão das partículas com uso de NaOH 1N. O material retido nas peneiras foi seco a 105 °C, pesado e descontado da massa de agregados mais partículas, resultando na massa de agregados estáveis em água.

O cálculo da proporção de agregados estáveis em água, o qual desconta as partículas individuais do solo, foi realizado conforme a seguinte expressão:

$$A_{gri} = \left[\frac{MA_{gri} - m_i}{\sum_{i=1}^n MA_{gri} - m_i} \right] \times 100 \quad (2.7)$$

onde A_{gri} é a proporção de agregados estáveis em água em determinada classe i ($g\ kg^{-1}$); MA_{gri} é a massa de agregados + material inerte na classe i (g) e m_i é a massa de material inerte (cascalho, areia, raízes, restos de cultura, etc.) na classe i (g).

Para o cálculo do diâmetro médio ponderado (DMP), conforme o método de Kemper & Chepil (1965), foi utilizada a seguinte expressão:

$$DMP = \left[\frac{\sum_{i=1}^n D_{Mi} \cdot (MA_{gri} - m_i)}{\sum_{i=1}^n MA_{gri} - m_i} \right] \quad (2.8)$$

onde DMP é o diâmetro médio ponderado de agregados (mm); D_{Mi} é o diâmetro médio da classe i (mm). MA_{gri} é a massa de agregados + material inerte na classe i (g) e m_i é a massa de material inerte (cascalho, areia, raízes, restos de cultura, etc.) na classe i (g).

2.2.4.6. Determinação da estabilidade de agregados

O índice de estabilidade dos agregados em água (IEA) foi obtido conforme a metodologia de Kemper & Rosenau (1986). Nesse método, são considerados os agregados da classe de diâmetro entre 1 e 2 mm, para a representação da estabilidade dos agregados de todo o solo. Essa metodologia considera como fração estável os agregados retidos na peneira de 0,25 mm de diâmetro de malha, após uma agitação de 5 minutos, de um solo pré-umedecido por capilaridade antes do peneiramento úmido.

2.2.5. Caracterização química dos solos

Os solos foram quimicamente caracterizados pela determinação da acidez ativa do solo, do teor de carbono orgânico e do teor de óxidos de ferro pedogênicos dos solos.

2.2.5.1. Acidez ativa do solo

A acidez ativa do solo foi determinada pelo pH em água (pH_{H_2O}) e pH em KCl $1\ mol\ L^{-1}$ (pH_{KCl}), na relação gravimétrica solo/solução de 1:1, conforme a metodologia descrita por Mekarú & Uehara (1972) e Embrapa

(1979). Com base nestes dados, foi obtido o parâmetro ΔpH , obtido da seguinte forma:

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.9)$$

2.2.5.2. Carbono orgânico total

O teor de carbono orgânico total do solo foi determinado pela leitura do volume de gás (CO_2) proveniente da oxidação do carbono (combustão seca), captado por raios infravermelhos, por meio do uso do equipamento Total Organic Carbon Analyzer /TOC-V CSH (Shimadzu, 2001).

2.2.5.3. Teor de óxidos de ferro pedogênicos dos solos

A determinação do teor de ferro dos solos, relativo aos óxidos de baixa cristalinidade, foi realizada pela extração com oxalato de amônio ácido no escuro (Fe_o), conforme Schwertmann (1964). Foi utilizada também a determinação do teor de ferro relativo aos óxidos de ferro pedogênicos pela extração com ditionito-citrato-bicarbonato/DCB (Fe_d), conforme Mehra & Jackson (1960).

2.2.6. Erosão hídrica do solo em entressulcos sob chuva simulada em laboratório

2.2.6.1. Preparo do solo para uso nas parcelas experimentais

As amostras de solo coletadas foram destorroadas manualmente, com o cuidado de separar os agregados nos planos de fraqueza natural, e passadas em peneira com abertura de malha de 10 mm. Após, as amostras foram espalhadas em bandejas para secar ao ar e à sombra. Nessas condições, o solo foi colocado na parcela experimental, em laboratório, para aplicação da chuva simulada. Foram realizadas três repetições para cada série de chuva simulada.

2.2.6.2. Parcelas experimentais

A erosão hídrica dos solos em entressulcos foi determinada em laboratório, sob chuva simulada, em solo descoberto, simulando as condições de solo e de superfície proporcionadas pelo preparo convencional.

Foram utilizadas parcelas experimentais de formato quadrado com 0,6 m de lado e 0,1 m de profundidade, totalizando uma área útil de teste de 0,36 m², com bordadura de 0,2 m. A bordadura teve por objetivo compensar as perdas líquidas de solo por salpico do interior da área de teste. Neste estudo, durante a aplicação da chuva simulada, as parcelas foram mantidas em uma declividade de 0,09 m m⁻¹.

A parcela experimental foi constituída de material acrílico e montada sobre uma estrutura metálica (Figura 1), semelhante a utilizada por Cantalice (2001). O fundo da parcela apresentava 6 furos, conectados a mangueiras de 6 mm de diâmetro cada. Estas mangueiras ficavam conectadas também a um reservatório, externo à área da parcela. Este sistema serviu para o umedecimento do solo por capilaridade antes da aplicação da chuva, para obter-se uma mesma tensão de água no solo ao iniciar os testes e para a drenagem da água do solo, durante a aplicação da chuva simulada.



Figura 2.1. Parcela experimental e sistema de umedecimento e drenagem.

Para a determinação da erosão em entressulcos é importante que haja escoamento suficiente para transportar o material desagregado. O modelo WEPP considera que, nas áreas em entressulcos, todo o material desagregado é transportado.

O volume das parcelas foi preenchido por duas camadas de solo, sendo a inferior com de 3 cm de espessura de solo, acondicionado com densidade de empacotamento (D_e) de $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$. Sobre essa camada foi colocado um tecido de algodão cru, sobre o qual foi colocada uma camada de 7 cm de solo seco ao ar, previamente tamisado em peneira com malha de 10 mm de diâmetro, conforme descrito no item 2.2.7.1. Esta camada de solo foi acondicionada na parcela de forma a obter-se uma densidade de empacotamento de 1 Mg m^{-3} , com mínima segregação dos agregados e rugosidade superficial homogênea.

2.2.6.3. Condição de umidade antecedente à chuva

Para proporcionar a condição de solo pré-umedecido, o solo da parcela foi saturado por pressão, de baixo para cima, de 10 cm, durante uma noite. Após, o solo foi mantido a uma tensão de 60 cm de coluna de água (-6 kPa) por um período de 2 horas. Feito isto, foi aplicada a chuva simulada, mantendo-se a condição de drenagem nessa tensão. Segundo Levy et al. (1994) não existe diferença no efeito do método de umedecimento, se realizado de baixo para cima ou por cima, pela simulação de chuva de baixa intensidade, na formação de selo, no escoamento superficial e na erosão hídrica do solo.

Baseado nos dados da curva de retenção de água, os solos LVaf (Erechim), LVdf (Santo Ângelo) e LVd (Cruz Alta), sob tensão de -6 kPa, respectivamente, apresentam capacidade média de retenção de água de 0,42; 0,43 e $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Apêndice 5).

2.2.6.4. Aplicação de chuva simulada em laboratório

As chuvas foram aplicadas em laboratório, por meio do uso de um simulador de chuvas, conforme o princípio descrito por Meyer & Harmon (1979). Foi utilizado um simulador composto de um bico aspersor com 12,7 mm de diâmetro interno (Veejet 80-150 / Spraying Systems Company, Chicago,

USA). Este simulador, descrito por Souza (1985), fica a 3,05 m da superfície do solo, com pressão constante de saída de água no bico de 41 kPa (6 lb pol⁻²). A energia cinética do impacto das gotas nessa pressão, independente da intensidade aplicada, é de, aproximadamente, 275 kJ ha⁻¹ mm⁻¹. Conforme Meyer & Harmon (1979), essa energia é equivalente ao impacto de uma chuva natural com intensidade igual a 80 mm h⁻¹, com distribuição de gotas com 2,3 mm de diâmetro e velocidade terminal de 8,8 m s⁻¹.

As intensidades das chuvas aplicadas foram determinadas por meio de um conjunto de 10 pluviômetros, colocados ao lado da área útil das parcelas experimentais. Para todos os solos e em todos os testes, foram aplicadas chuvas simuladas, com três repetições cada, com intensidade média de 88 mm h⁻¹, durante 180 minutos. A intensidade da chuva simulada aplicada variou de 85,1 a 91,5 mm h⁻¹ (Apêndice 6), com um desvio padrão de 1,65 mm h⁻¹. Salienta-se a importância do tempo de aplicação de chuva, pois um intervalo de tempo pequeno pode não ser suficiente para que o solo atinja a sua taxa máxima de desagregação.

2.2.6.5. Avaliação de características hidráulicas do escoamento superficial

Para a avaliação de algumas características hidráulicas do escoamento superficial em entressulcos foi medida a temperatura da água do escoamento, a velocidade e a descarga líquida do escoamento superficial, durante a aplicação de cada evento de chuva simulada.

A velocidade do escoamento superficial foi obtida pela medição do tempo gasto para um corante (azul de metileno a 0,25%) percorrer uma distância conhecida na parcela experimental. As medidas foram feitas a cada 5 minutos, a partir de 120 minutos de chuva simulada. A velocidade assim determinada é considerada como a velocidade máxima do escoamento. Para as avaliações da hidráulica do escoamento, utilizou-se a velocidade média do escoamento, a qual, conforme Farenhorst & Bryan (1995), é dada pelo produto da velocidade observada por um fator de ajuste $\alpha = 2/3$.

A altura da lâmina do escoamento foi obtida conforme Chow (1959), pela seguinte expressão:

$$h = \frac{q_t}{V} \quad (2.10)$$

onde h é a altura da lâmina do escoamento (m); q_t é a descarga líquida total por unidade de largura ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), obtida a partir das coletas de enxurrada, e V é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}).

O número de Reynolds foi determinado, conforme Simons & Senturk (1992), da seguinte forma:

$$Re = \frac{V \cdot h}{\nu} \quad (2.11)$$

onde Re é o número de Reynolds (adimensional); V é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}); h é a altura da lâmina do escoamento (m) e ν é a viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

A viscosidade cinemática foi determinada, conforme a variação da temperatura pela expressão de Julien (1995), da seguinte forma:

$$\nu = [1,14 - 0,031 (T-15) + 0,00068 (T-15)^2] \times 10^{-6} \quad (2.12)$$

onde ν é a viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e T é a temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$).

O número de Froude foi determinado, conforme Simons & Senturk (1992), da seguinte forma:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (2.13)$$

onde Fr é o número de Froude (adimensional); V é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}); g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}) e h é a altura da lâmina do escoamento (m).

A resistência ao escoamento foi determinada a partir do fator perda de carga, sugerido por Darcy-Weisbach, da seguinte forma:

$$f = \frac{8 g h S}{V^2} \quad (2.14)$$

onde f é o fator perda de carga (adimensional); g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}); h é a altura da lâmina do escoamento (m); S é a inclinação do declive (m m^{-1}) e V é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}).

O fator perda de carga pode ser representado também da seguinte forma (Yoon & Wenzel, 1971):

$$f = \frac{K}{Re} \quad (2.15)$$

onde f é o fator perda de carga (adimensional); K é um parâmetro hidráulico (adimensional); Re é o número de Reynolds (adimensional).

Igualando as equações 2.14 e 2.15 e rearranjando-se os termos, obtém-se a seguinte relação:

$$K = \left(\frac{8ghS}{V^2} \right) Re \quad (2.16)$$

onde K é um parâmetro hidráulico (adimensional); g é a aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); h é a altura da lâmina do escoamento (m); S é a inclinação do declive ($m\ m^{-1}$); V é a velocidade média do escoamento ($m\ s^{-1}$) e Re é o número de Reynolds (adimensional).

A tensão de cisalhamento do escoamento foi obtida pela seguinte relação:

$$\tau = \gamma h S \quad (2.17)$$

onde τ é a tensão cisalhante média do escoamento ($N\ m^{-2}$); γ é o peso específico da água ($N\ m^{-3}$); h é a altura da lâmina do escoamento (m) e S é a inclinação da superfície do solo ($m\ m^{-1}$).

A velocidade de cisalhamento foi determinada da seguinte forma:

$$u^* = \sqrt{g h S} \quad (2.18)$$

onde u^* é a velocidade de cisalhamento ($m\ s^{-1}$).

2.2.6.6. Determinação da taxa de desagregação do solo em entressulcos

O escoamento superficial foi amostrado em potes plásticos de 920 mL, colocados na extremidade inferior da calha coletora. As amostras foram coletadas durante 60 segundos, com intervalos de 2 minutos entre as coletas.

As amostras de solo e água coletadas em potes plásticos foram pesadas e após, foi adicionado 5 mL de solução concentrada de sulfato duplo de alumínio e potássio ($K\ Al(SO_4)_2 \cdot 12\ H_2O$ - alúmen de potássio a 5%), para a decantação das partículas. Após 24 horas o sobrenadante foi succionado e os potes foram levados para estufa a $50\ ^\circ C$, até atingir peso constante, sendo, posteriormente, pesados com e sem o solo seco.

A taxa de desagregação do solo em entressulcos, D_i ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$), foi considerada como igual à taxa de aporte de sedimentos, ou seja, à perda de solo em entressulcos, e determinada para cada intervalo de amostragem por

meio da divisão da massa de solo coletado em cada intervalo de coleta pela área da parcela ($0,36 \text{ m}^2$) e pelo período de cada coleta (60 s).

Após a plotagem dos valores de taxa de desagregação para cada intervalo de coleta, foi ajustada uma equação para expressar o comportamento da taxa de desagregação ao longo do tempo de chuva. Quando a curva apresentou um ponto de máxima, este valor foi utilizado como a taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos. Quando não houve um ponto de máxima ou quando a taxa de desagregação era crescente até o final da chuva, foi utilizada a média dos últimos cinco valores de taxa de desagregação, conforme proposto por Elliot et al. (1989) e adotado pelo modelo WEPP.

2.2.6.7. Erodibilidade do solo em entressulcos

A erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) foi determinada conforme proposto pelo modelo WEPP (Flanagan & Nearing, 1995), em condições de solo descoberto, recém preparado e sem resíduos, da seguinte forma:

$$K_i = \frac{D_i}{I q_i S_f} \quad (2.19)$$

onde K_i é o fator erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}), D_i é a taxa de desagregação em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}), q_i é a descarga unitária do escoamento superficial (m s^{-1}) e S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

Para solos com baixa taxa de infiltração e alta suscetibilidade à formação de escoamento superficial, como no caso de alguns Argissolos, é comum a determinação da erodibilidade em entressulcos pela consideração da intensidade da chuva ao quadrado, sendo desconsiderada a descarga unitária do escoamento superficial. Como exemplo, podem ser citados os trabalhos de Rothenbach (1992), Braidá & Cassol (1996), Albuquerque et al. (2000), Schäfer et al. (2001), Cantalice (2001) e Cassol & Lima (2003). Nestes trabalhos, a erodibilidade do solo em entressulcos foi calculada da seguinte forma:

$$K_i = \frac{D_i}{I^2 S_f} \quad (2.20)$$

onde K_i é o fator erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}), D_i é a taxa de desagregação em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}) e S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

No presente estudo foi utilizada a expressão (2.19) para a determinação do fator K_i , pois os Latossolos são altamente permeáveis, com tendência à formação de uma taxa constante de escoamento superficial bem inferior à taxa de chuva.

Para uma declividade diferente de 45° deve ser realizado o ajuste da erodibilidade do solo em entressulcos por meio de um fator de declive. Foi utilizado o ajuste do fator declividade em entressulcos conforme Liebenow et al. (1990), pela seguinte expressão:

$$S_f = 1,05 - 0,85 e^{-4 \text{ sen}\theta} \quad (2.21)$$

onde S_f é o fator declividade do solo (adimensional) e θ é o ângulo do declive (graus).

A erodibilidade do solo em entressulcos foi estimada também por equações baseadas nos teores de areia e argila, conforme proposto pelo modelo WEPP (Alberts et al., 1995). Neste caso, o fator K_i refere-se à erodibilidade básica do solo (K_{ib}), para uma declividade padrão de 45° , a qual pode ser determinada das seguintes formas:

a) Para solos que contêm 30% ou mais de areia na superfície:

$$K_{ib} = 2728000 + 19210000.amf \quad (2.22)$$

onde K_{ib} é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}) e amf é a fração de areia muito fina na superfície do solo (kg kg^{-1}). Se a fração amf for maior que 0,4, deve ser considerado um valor máximo de 0,4 na equação.

b) Para solos que contêm menos de 30% de areia na superfície:

$$K_{ib} = 6054000 - 5513000.arg \quad (2.23)$$

onde K_{ib} é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}) e arg é a fração de argila na superfície do solo (kg kg^{-1}). Se a fração argila for menor do que 0,1, deve ser considerado o valor de 0,1 na equação.

O fator de erodibilidade do solo em entressulcos também foi estimado conforme o modelo sugerido por Albuquerque (1998), pela seguinte expressão:

$$K_{iA} = 7,19.10^5 - (2,2.10^5 . DMPA_{KC}) - (7,2.10^5 . \Delta pH) + 148.M \quad (2.24)$$

onde K_{iA} é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}) de Albuquerque (1998); $DMPA_{KC}$ é o diâmetro médio ponderado dos agregados em água (mm) (Kemper & Chepil, 1965); ΔpH é um parâmetro obtido pela equação (2.8) e M é um parâmetro textural, obtido pela equação (2.6).

2.2.7. Análise estatística dos dados

A análise estatística foi realizada utilizando-se os programas estatísticos SAS - Statistical Analytical Systems/9.1 (SAS, 2003) e SPSS - Statistical Package For The Social Science/8.0 (SPSS, 1997).

Foi utilizado o delineamento fatorial, com dois fatores (solos e uso), com nível de significância de 5%. Os solos foram analisados com 3 níveis (1 - LVaf (Erechim); 2 - LVdf (Santo Ângelo); 3 - LVd (Cruz Alta) e dois tipos de uso (1 - natural; 2 - cultivado).

Foram utilizadas análises de variância (ANOVA) (Apêndices 1 - 4), comparações múltiplas de médias e análise de medidas repetidas, com ajuste pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%.

Para as relações entre os parâmetros de interesse foram utilizadas correlações simples e análises de regressão linear múltipla, pelo modelo Stepwise, com base no teste "t".

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Caracterização física e química dos solos

Na Tabela 2.2 são apresentados os valores da distribuição de diâmetro das partículas do solo para os Latossolos sob uso natural e cultivado. Detalhamentos desses resultados estão no Apêndice 7.

Após a análise de distribuição de diâmetro das partículas do solo (Tabela 2.2), verifica-se que os solos LVaf (Erechim) e LVdf (Santo Ângelo) pertencem à classe textural muito argilosa. O solo LVd (Cruz Alta), apresenta uma textura franco argilo arenosa.

Tabela 2.2. Distribuição de diâmetro das partículas do solo. Média de três repetições.

Solos			Arg _{H2O}	Argila	Silte	Areia	AMF	AF	AM	AG	AMG
U.M. ¹	Classe ²	Uso	g kg ⁻¹								
Erechim	LVaf	natural	240,6b	760,7a	209,6c	29,7e	7,6	10,0	5,7	4,2	2,2
		cultivado	424,4a	683,1b	277,6b	39,3d	6,2	8,2	9,6	6,9	8,4
		Média	332,5	721,9	243,6	34,5	6,9	9,1	7,6	5,6	5,3
Santo Ângelo	LVdf	natural	238,7b	680,2b	255,3b	64,5b	12,6	22,8	15,4	8,9	4,8
		cultivado	286,4b	578,5c	371,4a	50,1c	12,3	17,7	11,1	4,8	4,2
		Média	259,8	629,4	313,3	57,3	12,5	20,3	13,2	6,8	4,5
Cruz Alta	LVd	natural	84,7d	227,6d	109,9d	662,5a	104,4	410,0	131,5	14,7	2,0
		cultivado	124,5c	209,7d	151,7d	638,6a	101,8	399,2	122,3	15,3	0,0
		Média	104,6	215,1	134,3	650,6	103,1	404,6	126,9	15,0	1,0

⁽¹⁾ Unidade de Mapeamento - Brasil (1973); ⁽²⁾ Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; Arg_{H2O} = argila dispersa em água; AMF = areia muito fina; AF = areia fina; AM = areia média; AG = areia grossa; AMG = areia muito grossa. Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Na Tabela 2.2, observa-se que os solos LVaf e LVdf apresentam quantidades elevadas de argila, variando de 760,7 a 578,5 g kg⁻¹. O solo LVd,

entretanto, apresenta teores elevados de areia, com uma média de 650,6 g kg⁻¹, além disso, tem um elevado teor de areia muito fina (AMF), o qual é aproximadamente 8 e 15 vezes maior do que o percentual de AMF dos solos LVdf e LVaf, respectivamente.

A densidade média dos solos varia de 0,96 a 1,48 Mg m⁻³ (Tabela 2.3), semelhante aos valores de densidade de empacotamento utilizados para a montagem das camadas de solo na parcela (1,0 e 1,5 Mg m⁻³).

O grau de flocculação dos solos sob cultivo agrícola foi menor do que o grau de flocculação dos solos naturais. Isto se deve, possivelmente, ao efeito do preparo do solo em reduzir a estabilidade dos agregados do solo e aumentar a dispersão das partículas.

Tabela 2.3. Densidade do solo no local de coleta (Ds), densidade de partículas (Dp), grau de flocculação (GF) e conteúdo volumétrico de água no solo, sob tensão de -6 kPa. Média de três repetições.

Solos			Dp	Ds	GF	Água a -6 kPa
U.M. ¹	Classe ²	Uso	— Mg m ⁻³ —	—	%	m ³ m ⁻³
		natural	2,62	0,79	68	0,42
Erechim	LVaf	cultivado	2,59	1,13	38	0,42
		Média	2,61	0,96	54	0,42
		natural	2,62	1,29	65	0,44
Santo Ângelo	LVdf	cultivado	2,70	1,38	51	0,41
		Média	2,66	1,34	59	0,43
		natural	2,68	1,58	62	0,37
Cruz Alta	LVd	cultivado	2,77	1,37	41	0,35
		Média	2,73	1,48	51	0,36

(¹) Unidade de Mapeamento - Brasil (1973); (²) Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico.

Os solos cultivados apresentaram um maior teor de argila dispersa em água do que os solos naturais. Isto se deve, possivelmente, ao efeito da calagem normalmente utilizada em solos agrícolas e ao fato de que o preparo do solo favorece a quebra dos agregados (Bayer & Mieleniczuk, 1999),

facilitando a dispersão física das partículas. Esse comportamento pode ser observado também pelo maior ΔpH em KCl desses solos (Tabela 2.4 e Apêndice 8), pois quanto maior o ΔpH em KCl maior o afastamento do pH em relação ao ponto de carga zero (PCZ) e maior a dispersão entre as partículas (Sposito, 1989).

Tabela 2.4. Algumas características químicas dos solos. Média de duas repetições.

Solos			pH (H ₂ O)	pH (KCl)	ΔpH	CO	Fe _o	Fe _d	Fe _o /Fe _d
U. M. ¹	Classe ²	Uso	g kg ⁻¹						
Erechim	LVaf	natural	4,08	3,68	-0,40	29,90	2,40	95,18	0,025
		cultivado	5,65	4,55	-1,10	23,12	2,53	94,74	0,027
		Média	4,87	4,12	-0,75	26,51	2,47A	94,96A	0,026
Santo Ângelo	LVdf	natural	4,99	4,46	-0,53	22,00	2,67	92,31	0,029
		cultivado	5,60	4,50	-1,10	19,53	1,92	92,51	0,021
		Média	5,30	4,48	-0,82	20,77	2,30A	92,41A	0,025
Cruz Alta	LVd	natural	5,06	3,92	-1,14	14,87	1,57	17,25	0,091
		cultivado	5,54	4,61	-0,93	16,22	1,16	19,31	0,060
		Média	5,30	4,27	-1,04	15,55	1,37B	18,28B	0,076

⁽¹⁾ Unidade de Mapeamento - Brasil (1973); ⁽²⁾ Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; CO = carbono orgânico (Shimadzu, 2001); Fe_o = ferro extraído com oxalato amônio ácido (Schwertmann, 1964) e Fe_d = ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato/DCB (Mehra & Jackson, 1960). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Os solos LVaf e LVdf apresentaram maior diâmetro médio ponderado (DMP) (Tabela 2.5) e índice de estabilidade de agregados em água (IEA) (Tabela 2.6) do que o solo LVd.

Os dados de diâmetro médio geométrico - DMG (Kemper & Chepil, 1965, modificado por Tisdall & Oades, 1979) e de diâmetro médio ponderado - DMP, pelo método de Kemper e Chepil (1965), encontram-se no Apêndice 9.

Não houve diferença significativa entre a estabilidade de agregados dos solos LVaf e LVdf sob uso natural. Já entre os solos cultivados, existe diferença significativa entre as médias desse índice. O solo LVd, entretanto, apresentou uma estabilidade de agregados significativamente menor que a do LVaf e do LVdf, tanto para os solos naturais como para os cultivados.

Possivelmente, isto ocorre porque o solo LVd tem elevado teor de areia, principalmente de areia muito fina e menor teor de argila (Tabela 2.2), de carbono orgânico e de óxidos de ferro (Tabela 2.4 e Apêndice 8), em relação aos solos LVaf e LVdf.

Tabela 2.5. Diâmetro médio ponderado dos agregados - DMP (Kemper & Chepil, 1965, modificado por Tisdall & Oades, 1979). Média de três repetições.

Uso	LVaf ¹ (Erechim) ²	LVdf ¹ (Santo Ângelo) ²	LVd ¹ (Cruz Alta) ²
mm			
Natural	4,1 Aab	4,99 Aa	3,53 Ab
Cultivado	4,73 Aa	4,37 Aab	3,53 Ab
Média	4,42a	4,68a	3,53b

LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; Letras maiúsculas comparam médias na mesma coluna. Letras minúsculas comparam médias na mesma linha. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Tabela 2.6. Índice de estabilidade de agregados em água - IEA (Kemper & Rosenau, 1986). Média de três repetições.

Uso	LVaf ¹ (Erechim) ²	LVdf ¹ (Santo Ângelo) ²	LVd ¹ (Cruz Alta) ²
Natural	0,97 Aa	0,98 Aa	0,38 Ab
Cultivado	0,85 Aa	0,91 Aa	0,33 Ab
Média	0,91a	0,95a	0,36b

¹ LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; ² Unidade de Mapeamento (Brasil, 1973); Letras maiúsculas comparam médias na mesma coluna. Letras minúsculas comparam médias na mesma linha. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

2.3.2. Características hidráulicas e taxas de escoamento superficial em entressulcos

O regime do escoamento em entressulcos pode ser classificado como laminar subcrítico ($9 < Re < 40$ e $Fr < 1$) para o transporte de sedimentos

sob chuva simulada (Guy et al., 1990), laminar supercrítico ($139 < Re < 399$ e $Fr > 1$) ou laminar de transição ($500 < Re < 760$ e $Fr > 1$) (Farenhorst & Bryan, 1995). Em relação às características hidráulicas (Tabela 2.7), todos os solos estudados apresentaram regime de escoamento laminar subcrítico. É importante salientar, entretanto, que nos solos estudados, o escoamento é impactado pela gota de chuva e apresenta efeito da turbulência, pois a altura de lâmina de escoamento é menor do que 3 mm (Kinnell, 1988). Nesse caso, a turbulência provocada tende a aumentar a capacidade do fluxo em desagregar e transportar partículas de solo.

Tabela 2.7. Características hidráulicas do escoamento superficial nas áreas em entressulcos. Média de três repetições.

Solos			t_i	q_t ($\times 10^{-4}$)	V	h ($\times 10^{-4}$)	τ	Re	Fr	f	K	u_*
U. M. ¹	Classe ²	Uso	min	$m^2 s^{-1}$	$m s^{-1}$	m	$N m^{-2}$					$m s^{-1}$
		natural	11,3	0,13	0,025	5,10	0,45	12,59	0,36	5,75	72,4	0,021
Erechim	LVaf	cultivado	7,0	0,13	0,026	5,15	0,45	13,82	0,36	5,53	76,4	0,021
		Média	9,2	0,13	0,026	5,12	0,45	13,21	0,36	5,64	74,4	0,021
		natural	15,7	0,12	0,021	5,94	0,52	10,71	0,28	11,80	126,4	0,023
Santo Ângelo	LVdf	cultivado	6,8	0,12	0,028	4,28	0,38	12,46	0,43	3,94	49,1	0,019
		Média	11,3	0,12	0,025	5,11	0,45	11,59	0,36	7,87	87,8	0,021
		natural	3,8	0,13	0,046	2,90	0,26	15,09	0,86	0,97	14,7	0,016
Cruz Alta	LVd	cultivado	2,2	0,14	0,043	3,14	0,28	15,04	0,78	1,20	18,1	0,017
		Média	3,0	0,13	0,045	3,02	0,27	15,07	0,82	1,09	16,4	0,017

⁽¹⁾ Unidade de Mapeamento - Brasil (1973); ⁽²⁾ Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; t_i = tempo de início do escoamento; q_t = descarga líquida total do escoamento; V = velocidade média do escoamento; h = altura da lâmina de escoamento; τ = tensão de cisalhamento; Re = número de Reynolds; Fr = número de Froude; f = fator perda de carga; K = parâmetro hidráulico e u_* = velocidade de cisalhamento.

A resistência ao escoamento foi menor no solo LVd do que nos solos LVaf e LVdf, pois o solo LVd apresenta um menor fator de perda de carga (f) e um maior número de Reynolds (Re). Isso indica uma redução nos efeitos viscosos, provavelmente, devido a uma formação de selo superficial no solo LVd.

Na Tabela 2.7 (detalhes no Apêndice 11), observa-se que no solo LVd, tanto natural quanto cultivado, o tempo de início do escoamento superficial foi menor que nos demais solos, ou seja, o escoamento superficial iniciou mais rapidamente. Isto pode ser devido à baixa estabilidade dos

agregados em água deste solo, os quais são mais facilmente desestruturados. As partículas de solo desagregadas, possivelmente, causaram a obstrução dos poros causando uma redução na taxa de infiltração da água no solo e formação de selo superficial.

De forma geral, o solo LVd apresentou um escoamento superficial com maior velocidade e menor altura de lâmina de água, em relação aos outros solos. O que pode indicar uma menor rugosidade superficial desse solo, indicada também pelo menor fator de perda de carga (f) e baixo valor do parâmetro hidráulico K , em relação aos solos LVaf e LVdf.

O parâmetro hidráulico K é adimensional e representa a resistência ao escoamento. O valor teórico de K varia com a rugosidade superficial, com o efeito de impacto das gotas da chuva, grau de declive e descarga líquida do escoamento superficial (Yoon & Wenzel, 1971). Esse fator foi obtido pela equação (2.15) e está expresso na Tabela 2.7.

O valor médio do parâmetro hidráulico K do solo LVd (natural e cultivado) foi de 16,4 (Tabela 2.7). Esse valor se aproxima do valor teórico igual a 24, sugerido por Yoon & Wenzel (1971), para escoamento laminar, e é praticamente igual ao sugerido por Foster & Huggins (1977), que é de 16.

No solo LVaf, o valor médio do parâmetro hidráulico K foi de 74,4 e no LVdf é de 87,8. Esses valores são, aproximadamente, cinco vezes maior que o fator K do solo LVd. Esse resultado indica uma maior rugosidade superficial dos solos LVaf e LVdf, tanto na condição de solo natural quanto sob cultivo agrícola. Possivelmente, essa maior rugosidade superficial deve-se ao maior diâmetro médio dos agregados e à elevada estabilidade dos agregados desses solos (Tabela 2.6). Isso resulta em menor desagregação em entressulcos, maior infiltração e maior tempo de início do escoamento superficial, em relação ao solo LVd, o qual possui um índice de estabilidade de agregados em água aproximadamente três vezes menor do que os dos solos LVaf e LVdf.

O fato dos solos LVaf e LVdf apresentarem um valor do parâmetro hidráulico K superior aos indicados na bibliografia, pode ser devido ao elevado teor de argila e de óxidos de ferro desses solos, resultando em alta estabilidade de agregados, maior rugosidade superficial, ocasionando maior resistência ao escoamento superficial.

Nos solos LVaf e LVdf sob uso natural (Figuras 2.2 e 2.3), a descarga unitária do escoamento não se aproximou da intensidade da chuva, ao contrário do que ocorre com o solo LVd sob uso natural (Figura 2.4). O comportamento desses solos sob uso natural foi semelhante ao comportamento dos mesmos quando sob cultivo.

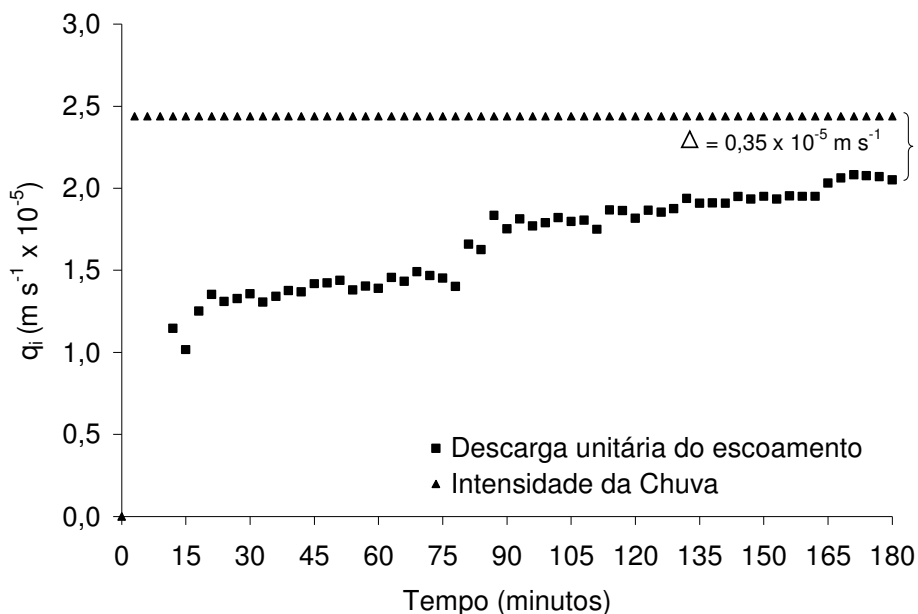


Figura 2.2. Descarga unitária do escoamento superficial (q_i), sob chuva simulada de intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), em Latossolo Vermelho aluminoférrico natural - LVaf (Erechim), sob declividade de 9% ($S_f = 0,456$).

A menor taxa de escoamento superficial dos solos LVaf e LVdf pode indicar que o mesmo apresenta alta taxa de infiltração, decorrente, provavelmente, de seu alto teor de argila, de óxidos de ferro e de matéria orgânica e, conseqüentemente, elevada estabilidade dos agregados em água.

Na Figura 2.4, observa-se que a descarga unitária do escoamento do solo LVd, ao longo de praticamente todo o evento de chuva, se aproximou da intensidade da chuva. Esse comportamento indica uma baixa taxa de infiltração e/ou formação selo superficial nesse solo, devido, provavelmente, a sua baixa estabilidade de agregados em água.

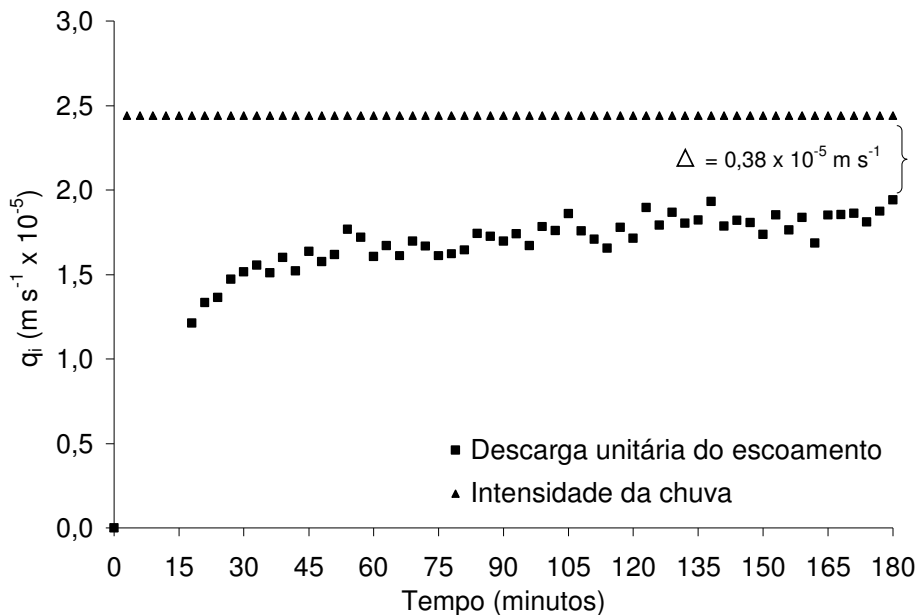


Figura 2.3. Descarga unitária do escoamento superficial (q_i), sob chuva simulada de intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), em Latossolo Vermelho distroférico natural - LVd (Santo Ângelo), sob declividade de 9% ($S_f = 0,456$).

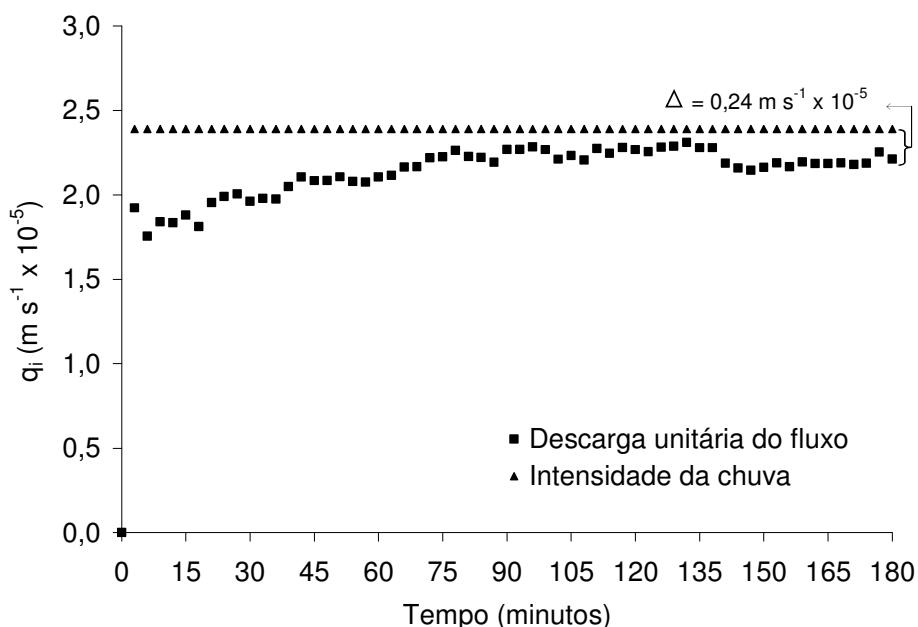


Figura 2.4. Descarga unitária do escoamento superficial (q_i), sob chuva simulada de intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), em Latossolo Vermelho distrófico natural - LVd (Cruz Alta), sob declividade de 9% ($S_f = 0,456$).

2.3.3. Taxas de desagregação do solo em entressulcos

Na Figura 2.5, observa-se que a taxa de desagregação em entressulcos do solo LVaf natural foi praticamente constante ao longo do tempo de duração da chuva. Observa-se que esse comportamento é semelhante ao do solo LVdf.

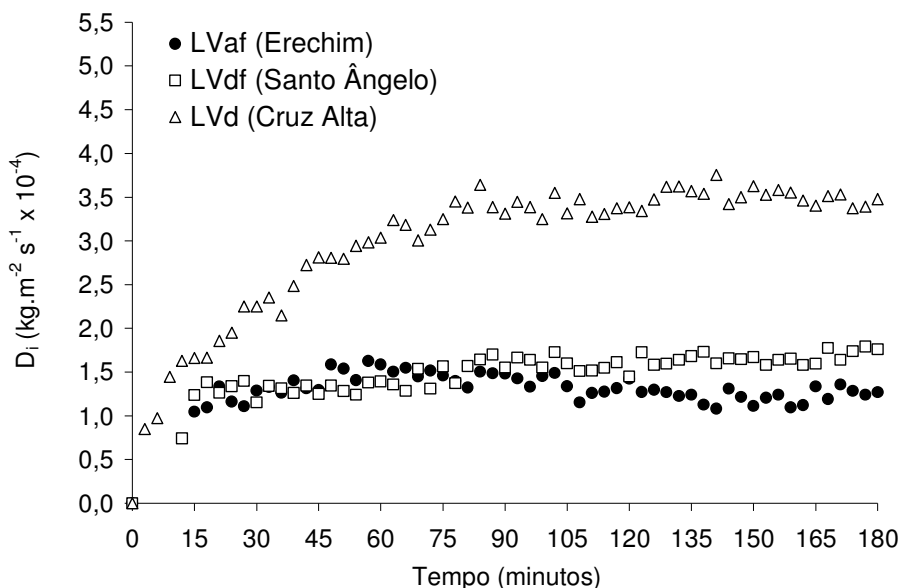


Figura 2.5. Taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i), obtidas sob 9% de declive ($S_f = 0,456$) e intensidade média de chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), de Latossolos do Rio Grande do Sul sob uso natural. (LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico).

O comportamento constante da taxa de desagregação em entressulcos dos solos LVaf e LVdf, após os primeiros minutos de chuva simulada, pode ser função do alto teor de argila, matéria orgânica e óxidos de ferro, bem como da alta estabilidade de agregados em água desses solos, em relação o solo LVd. Resultados semelhantes foram encontrados por Le Bissonais & Singer (1993), os quais estudaram alguns solos da Califórnia e verificaram que os solos com maior teor de carbono orgânico e óxidos de Fe e Al (extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato - DCB) apresentaram maior taxa de infiltração e menor erosão em entressulcos. Possivelmente, os agregados dos solos LVaf e LVdf foram resistentes à quebra pelo impacto da gota da chuva e à ação do escoamento superficial, impactado pela chuva,

proporcionando uma taxa de desagregação praticamente constante ao longo do tempo.

Durante o evento de chuva simulada, a taxa de desagregação do solo LVdf teve um comportamento semelhante a do solo LVaf. O solo LVdf natural apresenta uma maior taxa de desagregação em aproximadamente 60 min, após, ocorre uma leve redução. O material desagregado no início da chuva, pode ter preenchido os poros e criado um selo que protegeu o solo subjacente do impacto das gotas.

No solo LVd, a taxa de desagregação em entressulcos aumentou rapidamente ao longo do tempo, atingindo seu máximo em aproximadamente 75 minutos de chuva simulada. Após, a taxa de desagregação desse solo manteve-se praticamente constante. Esse comportamento pode ser devido ao fato da taxa de escoamento ter atingido seu máximo em aproximadamente 75 minutos (Figura 2.4).

De forma geral, pode-se dizer que a textura mais arenosa, a baixa estabilidade dos agregados e o menor teor de óxidos de ferro do solo LVd, em relação aos solos LVaf e LVdf, resultaram em uma elevada taxa de desagregação do solo em entressulcos.

Na modelagem da erosão em entressulcos, é necessário que se considere o efeito da chuva ao longo do tempo. Braida & Cassol (1996), estudaram um Argissolo Vermelho distrófico arênico (Unidade de mapeamento São Pedro) e verificaram que as taxas de erosão em entressulcos foram crescentes com o tempo de chuva, até atingirem um valor máximo, tornando-se, então, decrescentes. Dessa forma, o tempo de aplicação da chuva deve ser suficiente para que seja alcançada a taxa máxima de desagregação. Esse tempo, conforme observado na Figura 2.5, irá depender do tipo de solo. Observa-se que para o solo LVd, por exemplo, aproximadamente 75 minutos de chuva simulada foram suficientes para que seja atingida a taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos.

2.3.4. Erodibilidade do solo em entressulcos

Os valores médios de taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos (D_i), descarga unitária do escoamento (q_i) e fator de erodibilidade

do solo em entressulcos (K_i) são mostrados na Tabela 2.8. Nos Apêndices 7 e 11 são apresentados os dados referentes a cada repetição desses parâmetros.

Tabela 2.8. Valores de taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos (D_i) e descarga unitária do escoamento (q_i), obtidos sob 9% de declive ($S_f = 0,456$) e sob chuva simulada de intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), e o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i). Média de três repetições.

Solos			D_i ($\times 10^4$)	q_i ($\times 10^5$)	K_i ($\times 10^{-6}$)
U. M. ¹	Classe ²	Uso	$\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	m s^{-1}	kg s m^{-4}
		natural	1,74	2,09	0,75
Erechim	LVaf	cultivado	1,88	2,20	0,77
		Média	1,81	2,15	0,76
		natural	1,76	2,06	0,77
Santo Ângelo	LVdf	cultivado	2,52	1,99	1,16
		Média	2,14	2,03	0,97
		natural	3,46	2,20	1,41
Cruz Alta	LVd	cultivado	3,83	2,26	1,54
		Média	3,64	2,23	1,48

⁽¹⁾ Unidade de Mapeamento - Brasil (1973); ⁽²⁾ Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico.

As taxas de desagregação em entressulcos do solo LVd foram, aproximadamente, o dobro das observadas para os solos LVaf e LVdf (Tabela 2.8). Isto pode ser devido ao alto teor de areia do solo LVd, principalmente de areia muito fina (AMF) (Tabela 2.2), baixo teor de carbono orgânico (Tabela 2.4) e baixo índice de estabilidade de agregados em água (Tabela 2.6). Os solos arenosos geralmente apresentam menor agregação (Brady & Weil, 1999). Em geral, solos franco, franco siltosos e siltosos são facilmente desagregados e transportados (Ellison, 1947), portanto, são muito suscetíveis à erosão hídrica em entressulcos, em relação aos solos argilosos (Meyer & Harmon, 1984). Conforme Kemper et al. (1987), quanto maior a quantidade de argila maior a área superficial e maior a tensão entre as partículas do solo. Segundo os autores, a estabilidade dos agregados aumenta quando a

quantidade de argila aumenta até 350 g kg⁻¹. Observa-se que a distribuição de diâmetro das partículas do solo influencia na estabilidade dos agregados e esta na taxa de desagregação do solo em entressulcos.

O fator de erodibilidade do solo em entressulcos dos solos LVaf e LVdf foi significativamente menor que o do solo LVd. Este resultado deve-se, possivelmente, ao elevado teor de argila (Tabela 2.2), carbono orgânico e óxidos de ferro (Tabela 2.4) dos solos LVaf e LVdf, em relação ao solo LVd.

Apesar dos solos terem sido cultivados, em épocas anteriores, no sistema de preparo convencional e o preparo do solo acarretar em perda de agregação (Bayer e Mielniczuk, 1999), deve-se considerar que, nos últimos 5 a 10 anos, os solos cultivados estavam sendo utilizados com sistema sem preparo do solo. Por isso não foi verificada diferença significativa no fator de erodibilidade em entressulcos entre os solos sob usos natural e cultivado (Tabela 2.9). Dessa forma, para os Latossolos estudados, a metodologia proposta pelo WEPP, para determinar o fator de erodibilidade do solo em entressulcos, pode ser usada tanto para solos sob uso natural quanto para solos sob cultivo. Este resultado demonstra que não há necessidade de uso de solos naturais para as determinações do fator de erodibilidade do solo em entressulcos. Atualmente, são raros os solos em condições naturais, sem uso agrícola, no Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 2.9. Fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtido sob 9% de declive ($S_f = 0,456$) e intensidade média de chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h⁻¹). Média de três repetições.

Uso	LVaf ¹ (Erechim) ²	LVdf ¹ (Santo Ângelo) ²	LVd ¹ (Cruz Alta) ²
	kg s m ⁻⁴ (10 ⁻⁶)		
Natural	0,75 Ab	0,77 Ab	1,41 Aa
Cultivado	0,77 Ab	1,16 Aab	1,54 Aa
Média	0,76b	0,97b	1,48a

⁽¹⁾ LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; (Embrapa, 1999);

⁽²⁾ Unidade de Mapeamento - (Brasil, 1973); Letras maiúsculas comparam médias na mesma coluna. Letras minúsculas comparam médias na mesma linha. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

O fator de erodibilidade em entressulcos dos solos é a média do fator obtido para os solos naturais e os cultivados, pois não há diferença significativa no fator de erodibilidade em entressulcos dos solos, entre essas condições de uso. Dessa forma, os fatores de erodibilidade em entressulcos dos solos LVaf, LVdf e LVd são de $0,76 \times 10^6$; $0,97 \times 10^6$ e $1,48 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, respectivamente. O fator K_i para os Latossolos em estudo variou de $0,75 \times 10^6$ a $1,54 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ (Tabela 2.9). Esses valores situam-se dentro da faixa de variação do fator K_i obtido por Alberts et al. (1995), que é de $0,5 \times 10^6$ a $12 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ e que consiste a base para o modelo WEPP (Flanagan & Nearing, 1995).

No Rio Grande do Sul, vários têm sido os trabalhos desenvolvidos para avaliar a erodibilidade do solo nas áreas em entressulcos. Rockenbach (1992), em um trabalho a campo, encontrou um fator K_i de $2,83 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ em um Argissolo Vermelho-amarelo franco arenoso (São Jerônimo). Veiga et al. (1993) estudaram, em laboratório, a erodibilidade em entressulcos de sete solos do Rio Grande do Sul e verificaram uma variação no K_i de $0,23 \times 10^6$ a $3,37 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. Braida e Cassol (1996) obtiveram a campo um fator K_i de $5,1 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, em um Argissolo Vermelho distrófico arênico (São Pedro). Schäfer et al. (2001), ao estudarem em campo um Argissolo Vermelho-amarelo, obtiveram um fator de erodibilidade do solo em entressulcos de $1,77 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. Albuquerque et al. (2000) obtiveram, em laboratório, dados de erodibilidade do solo em entressulcos que variaram de $0,17 \times 10^6$ a $1,96 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. Cassol e Lima (2003), em um trabalho a campo, encontraram um fator K_i de $2,83 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, para um Argissolo Vermelho distrófico típico franco argilo-arenoso.

A única referência de determinação do fator de erodibilidade do solo em entressulcos tanto no campo como em laboratório, em solos do Rio Grande do Sul, refere-se ao trabalho de Cantalice (2001), o qual obteve um valor médio de erodibilidade do solo em entressulcos de $2,55 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ para um Argissolo Vermelho distrófico típico (São Jerônimo). A metodologia desse autor proporcionou dados de laboratório que se aproximaram dos dados obtidos no campo. Além disso, o fator de erodibilidade do solo em entressulcos verificada por este autor, para um Argissolo Vermelho ($2,55 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$) foi semelhante a encontrada em experimentos de campo por Rockenbach (1992) e Cassol e

Lima (2003), $2,83 \times 10^6$ e $2,94 \times 10^6$ kg s m⁻⁴, respectivamente, ambos em Argissolo Vermelho.

O fator de erodibilidade do solo em entressulcos é dependente apenas das características intrínsecas do solo, ou seja, depende do tipo de solo. Nota-se, entretanto, que existem variações nos dados de erodibilidade em entressulcos entre autores. Estas variações podem ser devidas ao tipo de metodologia usada para a sua determinação (Truman & Bradford, 1995) e às variações granulométricas dos solos.

De forma geral, a taxa de desagregação e a erodibilidade do solo nas áreas em entressulcos foram menores para os solos de textura mais argilosa, com maior teor de óxidos de Fe_o e com maior estabilidade de agregados em água.

2.3.5. Estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos por métodos indiretos

No modelo WEPP, o fator de erodibilidade do solo em entressulcos pode ser estimado, indiretamente, pela determinação dos teores de areia muito fina (AMF) e de argila, conforme as equações (2.22) ou (2.23), dependendo do teor de areia na composição granulométrica do solo.

Comparando-se os valores de erodibilidade do solo em entressulcos obtidos experimentalmente no presente estudo, com os valores estimados pelas equações utilizadas no WEPP, observa-se que o uso dessas equações proporcionou valores que superestimaram em 2,4 a 3,6 vezes o fator de erodibilidade em entressulcos dos Latossolos em estudo (Figura 2.6). Isso ocorre, possivelmente, porque as equações utilizadas no WEPP foram desenvolvidas no campo e com base em solos característicos de regiões de clima temperado, sem a inclusão na base de dados de solos com características semelhantes as dos Latossolos brasileiros.

A estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos de um Argissolo Vermelho distrófico (PVd) do Rio Grande do Sul, pelo uso da equação (2.22), sugerida pelo WEPP para solos com mais de 30% de areia, resultou em uma erodibilidade em entressulcos 1,63 vezes maior que a determinada para este mesmo solo, em campo e em laboratório, por Cantalice (2001). Os dados dos parâmetros desse solo encontram-se no Apêndice 15.

Observa-se que as equações propostas pelo modelo WEPP superestimaram mais o fator de erodibilidade em entressulcos dos Latossolos do que o fator de erodibilidade em entressulcos do Argissolo. Esse comportamento deve-se, possivelmente, ao baixo teor de areia muito fina desses solos (entre 6,9 e 103,1 g kg⁻¹) (Tabela 2.2), a qual, conforme metodologia proposta pelo modelo WEPP, é diretamente proporcional à erodibilidade básica em entressulcos para solos com mais de 30% de areia.

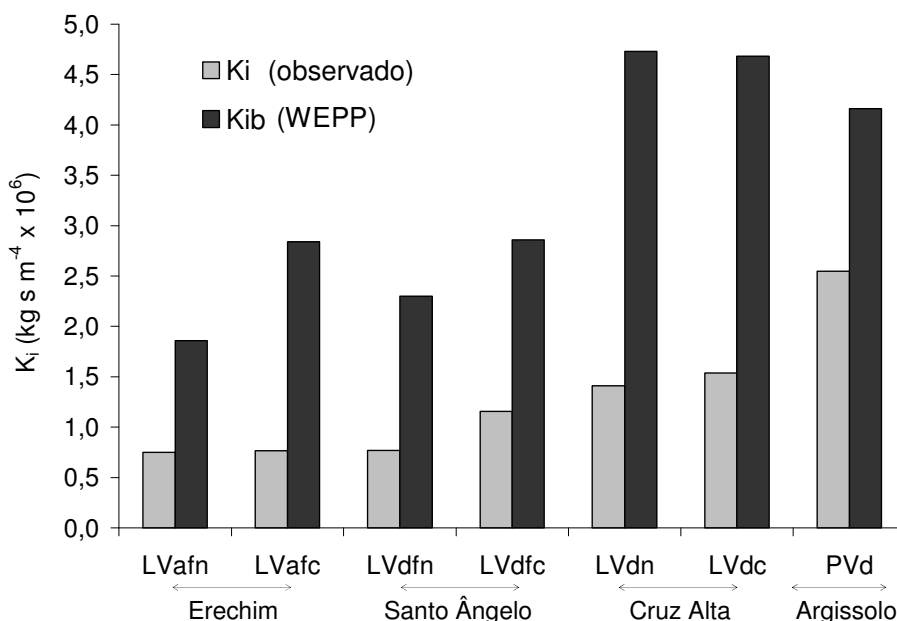


Figura 2.6. Fator de erodibilidade do solo em entressulcos observado (K_i) e estimado pelas equações do WEPP (K_{ib}); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; n = natural; c = cultivado; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico (Cantalice, 2001).

Albuquerque (1998) também avaliou o uso da estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos sugerido pelo modelo WEPP, para solos do Rio Grande do Sul, e verificou que o modelo superestimou em 6 vezes os valores obtidos em laboratório. Segundo o autor, esta superestimativa do modelo deve-se a diferenças entre as metodologias de determinação do fator K_i .

Duiker et al. (2001) também observaram que as equações propostas pelo WEPP, baseadas na textura do solo, superestimaram o fator K_i . Os autores estudaram alguns solos da Espanha e concluíram que essas equações

superestimaram de duas a quatro vezes o valor do fator de erodibilidade do solo em entressulcos.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que, apesar da granulometria influenciar na resistência do solo à desagregação em entressulcos (Meyer & Harmon, 1984; Bradford et al., 1987), a mesma pode não ser suficiente para explicar a variação na erodibilidade do solo em entressulcos.

Utilizando o modelo sugerido por Albuquerque (1998), equação (2.24), para a estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos para os Latossolos em estudo e para o Argissolo Vermelho estudado por Cantalice (2001), verificou-se que o modelo subestimou os dados observados (Figura 2.7), não sendo adequado para estimar o fator de erodibilidade em entressulcos desses solos. Isto se deve, possivelmente, à presença do parâmetro ΔpH no modelo sugerido pelo autor, pois quanto mais próximo de zero o ΔpH (Tabela 2.4) menor a erodibilidade do solo em entressulcos.

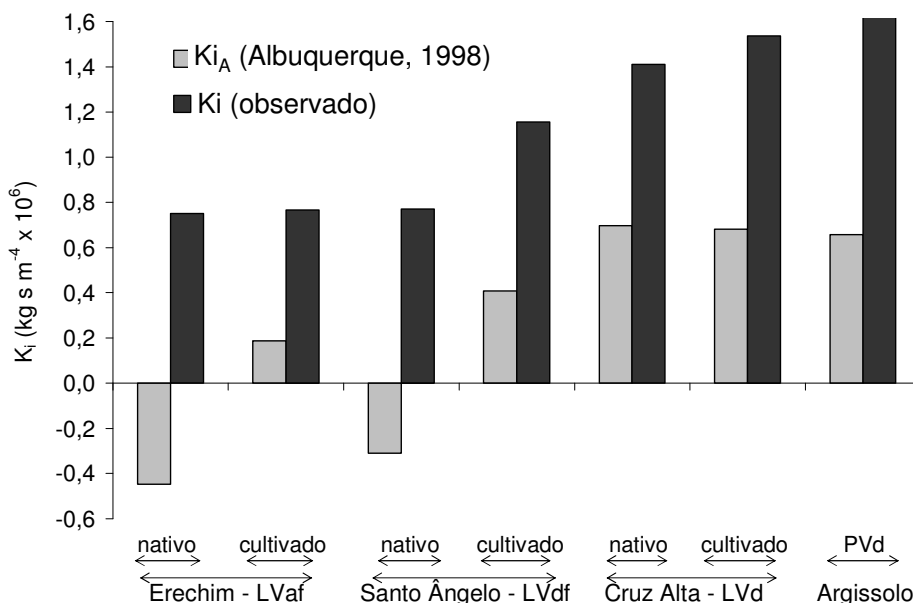


Figura 2.7. Comparação entre o fator de erodibilidade do solo em entressulcos observado (K_i) e o estimado pelo modelo de Albuquerque (1998) (K_{iA}); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico (Cantalice, 2001).

O fator de erodibilidade do solo em entressulcos teve correlação significativa com vários dos parâmetros do solo avaliados (Apêndices 7, 8 e 9).

Na Figura 2.8 observa-se que o aumento no teor de areia muito fina do solo (AMF) resultou em uma maior erodibilidade em entressulcos. Isto pode ser devido ao fato de que, na erosão hídrica, a areia muito fina comporta-se como silte (Wischmeier & Mannering, 1969), o qual aumenta a erodibilidade em entressulcos (Meyer & Harmon, 1984).

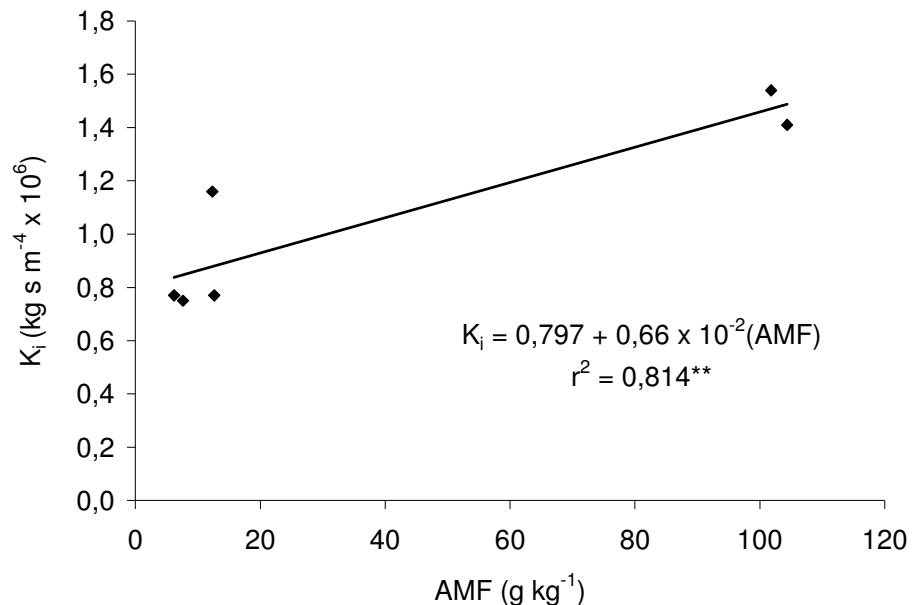


Figura 2.8. Relação entre o conteúdo de areia muito fina e a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtida sob 9% de declividade e chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).

Assim como o teor de silte, o parâmetro textural M (Wischmeier et al., 1971), que expressa a influência da distribuição de diâmetro das partículas, também apresentou correlação positiva e altamente significativa com o fator K_i (Figura 2.9). Resultado semelhante foi obtido por Albuquerque (1998). Essa correlação mostra que a textura do solo tem grande influência na erodibilidade do solo em entressulcos.

O teor de argila também teve correlação altamente significativa com o fator K_i (Figura 2.10). Entretanto, nesse caso, a correlação é negativa.

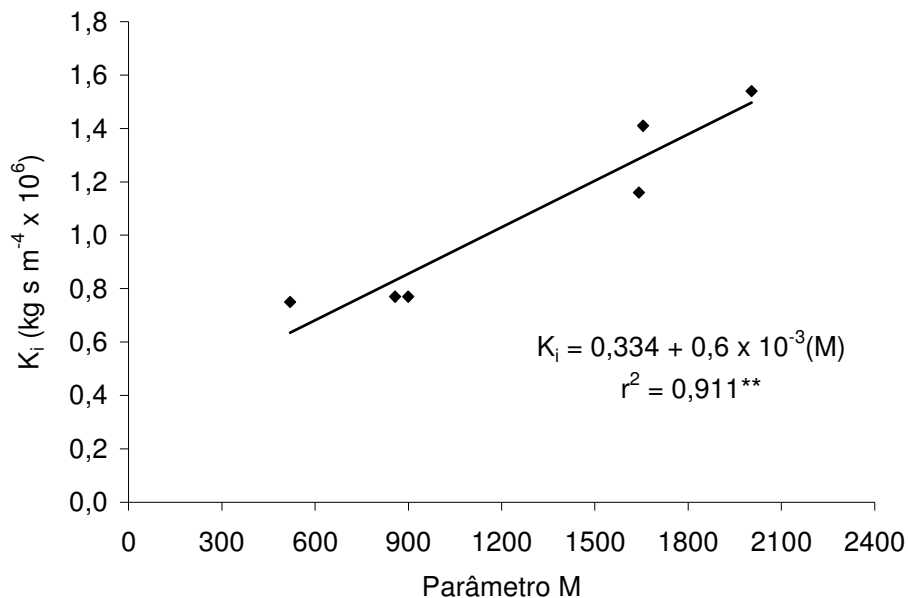


Figura 2.9. Relação entre o parâmetro textural M e a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtida sob 9% de declividade e chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).

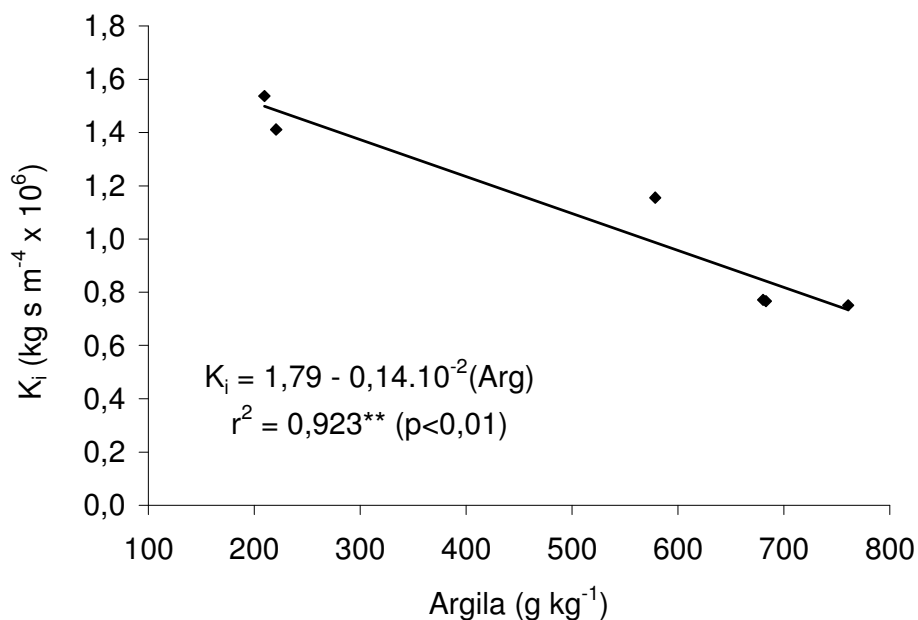


Figura 2.10. Relação entre o teor de argila e a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtida sob 9% de declividade e chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).

Na Figura 2.10, observa-se que quanto maior o teor de argila menor a erodibilidade do solo em entressulcos. Para teores maiores que 680 g kg^{-1} , entretanto, o aumento no teor de argila não se refletiu em menor erodibilidade

do solo em entressulcos. Essa relação é semelhante à proposta pelo modelo WEPP, para estimar o fator de erodibilidade básica em entressulcos de solos com menos de 30% de areia. A semelhança deve-se, possivelmente, ao relativamente baixo teor de areia dos Latossolos estudados. Provavelmente, se fosse utilizado um maior número de solos neste estudo, com uma maior variação nos teores de argila e areia, seria possível obter-se também, como no modelo WEPP, relações diferenciadas, conforme a textura do solo, para a estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos. Albuquerque (1998) observou que este limite de influência situa-se em 400 g kg^{-1} de argila. Kemper et al. (1987) observou que a estabilidade de agregados foi maior quando o teor de argila aumentou até 350 g kg^{-1} . Meyer & Harmon (1984), Veiga et al. (1993) e Albuquerque (1998) também obtiveram correlação negativa e significativa entre o teor de argila e o fator de erodibilidade do solo em entressulcos. Isto se deve ao fato de que o aumento no teor de argila aumenta a estabilidade dos agregados (Kemper et al., 1987) reduzindo a erodibilidade em entressulcos (Meyer & Harmon, 1984).

Os teores de óxidos de ferro pedogênicos, extraídos ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_d) e com oxalato amônio ácido (Fe_o) também apresentaram correlação negativa e altamente significativa com o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (Figuras 2.11 e 2.12). Isso pode ser devido ao fato de que os Latossolos geralmente apresentam alta estabilidade de agregados, a qual é geralmente atribuída à grande quantidade de óxidos de ferro presente nestes solos (Azevedo & Bonumá, 2004). Veiga et al. (1993) e Lima & Andrade (2001) também obtiveram correlação significativa entre o teor de óxidos de ferro (Fe_o e Fe_d) e o fator de erodibilidade do solo em entressulcos.

A maior correlação obtida entre o Fe_o e o fator K_i , em relação ao Fe_d , pode ser devido ao fato do componente Fe_o (baixa cristalinidade) ser mais efetivo na estabilidade dos agregados do solo do que o Fe_d , apesar de estar presente em baixas concentrações. Isto ocorre porque os óxidos de ferro de baixa cristalinidade têm área superficial muito maior e mais reativa do que os óxidos de Fe cristalinos (Duiker et al., 2003).

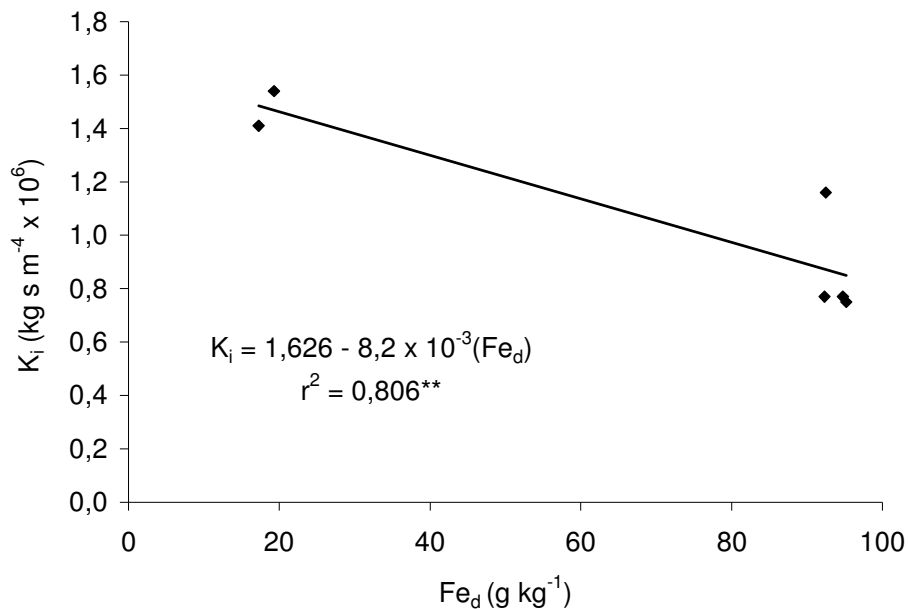


Figura 2.11. Relação entre o teor de ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_d) e a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtida sob chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}) e 9% de declividade.

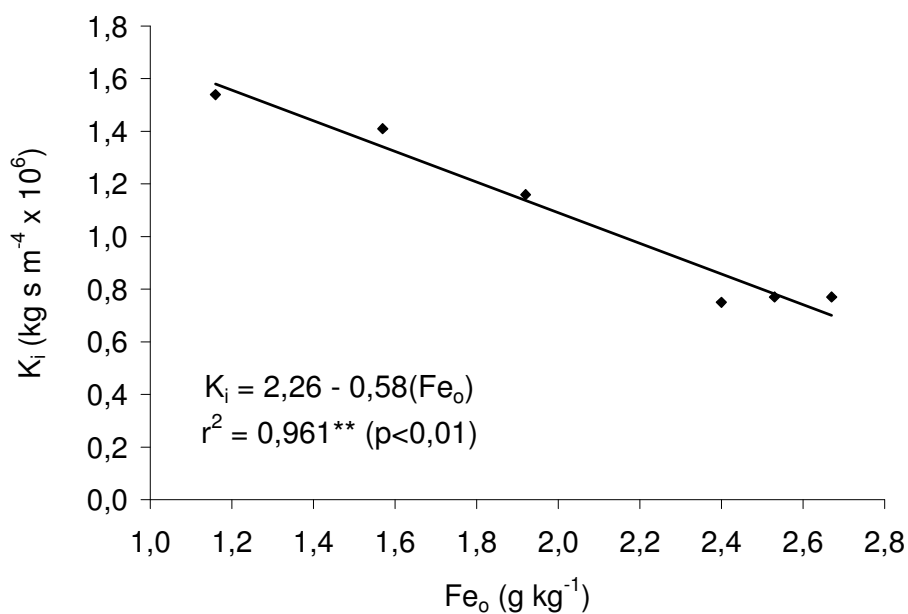


Figura 2.12. Relação entre o teor de ferro extraído com oxalato amônio ácido (Fe_o) e a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtida sob chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}) e 9% de declividade.

A redução do fator de erodibilidade do solo em entressulcos com o aumento do teor de óxidos de ferro pode ser devido ao fato dos óxidos

apresentarem elevada área superficial específica, devido ao seu pequeno tamanho e às irregularidades superficiais, constituindo-se em importantes agentes de ligação entre os constituintes do solo (Römken et al., 1977) aumentando, dessa forma, a estabilidade dos agregados (Azevedo & Bonumá, 2004), a qual reduz a erodibilidade do solo em entressulcos (Meyer & Harmon, 1984).

Após uma análise de regressão (modelo Stepwise) entre os parâmetros dos solos avaliados no presente estudo, foi obtido um modelo para estimar o fator de erodibilidade do solo em entressulcos. O modelo obtido considera apenas o conteúdo de argila e o de óxidos de ferro extraído com oxalato de amônio ácido (Fe_o), e apresentou um coeficiente de determinação da erodibilidade em entressulcos de 0,974** ($p < 0,01$). Esse modelo pode ser expresso da seguinte forma:

$$K_i = [1,982 - 8,886 \cdot 10^{-4} (\text{Arg}) - 0,228 (Fe_o)] \times 10^6 \quad r^2 = 0,974^{**} \quad (2.25)$$

onde K_i é a erodibilidade do solo em entressulcos ($kg \ s \ m^{-4}$); Arg é o teor de argila ($g \ kg^{-1}$), obtido por dispersão com NaOH 1N e Fe_o é o teor de ferro extraído com oxalato de amônio ácido no escuro ($g \ kg^{-1}$) (Schwertmann, 1964).

Analisando-se a relação 2.25, observa-se que, nos raros casos de solos sem argila e sem Fe_o , o fator K_i seria de $1,982 \times 10^{-6} \ kg \ s \ m^{-4}$. Isto ocorre porque existem outros parâmetros, além do teor de argila e de Fe_o , que influenciam na erodibilidade do solo em entressulcos, conforme comentado anteriormente. Além disso, salienta-se que esse efeito dos óxidos refere-se a Latossolos hematíticos e sem presença de gibbsita.

Pela equação (2.25), a variação no conteúdo de argila e de óxidos de ferro (Fe_o) pode explicar até 97,4% da variação na erodibilidade do solo em entressulcos dos Latossolos estudados. Observa-se que, em relação a correlação obtida entre o conteúdo de argila e o fator K_i (Figura 2.10), a inclusão do conteúdo de Fe_o melhora a estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos.

Römken et al. (1977) estudaram a erodibilidade global de sete solos dos EUA e obtiveram dados muito semelhantes aos obtidos para os Latossolos em estudo. Os autores concluíram que os óxidos de Fe e Al, extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), de solos argilosos,

combinados com um parâmetro granulométrico, estimaram adequadamente a erodibilidade global dos solos.

A relação obtida (2.25) pode ser usada como uma ferramenta prática e precisa para estimar o fator de erodibilidade em entressulcos para Latossolos, pois necessita de poucos parâmetros, apenas o teor de argila e o de óxidos de ferro, os quais são de determinação fácil e rápida em laboratório. Essa relação pode contribuir para uma estimativa fácil, rápida e de baixo custo do fator de erodibilidade do solo em entressulcos para Latossolos, os quais são os mais representativos e de maior importância agrícola do Brasil e do Rio Grande do Sul.

A erodibilidade do solo em entressulcos também teve correlação altamente significativa ($p < 0,01$) com o índice de estabilidade de agregados em água de Kemper & Rosenau (1986) (Figura 2.13). Observa-se que 81,4% da variação no fator de erodibilidade em entressulcos é explicada pela variação do índice de estabilidade de agregados.

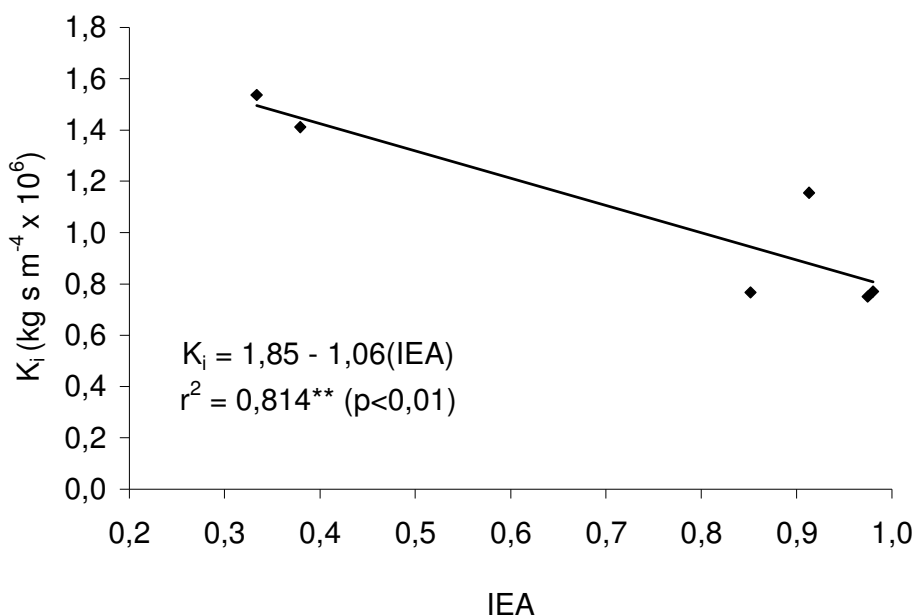


Figura 2.13. Relação entre índice de estabilidade de agregados (IEA) (Kemper & Rosenau, 1986) e fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtido sob chuva simulada com intensidade de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}) e declividade de 9%.

Na Figura 2.13, observa-se que quanto maior o índice de estabilidade de agregados em água menor a erodibilidade do solo em

entressulcos. Verificou-se também que os dados de estabilidade de agregados em água e de erodibilidade em entressulcos concentraram-se em dois grupos de valores extremos, semelhante ao que ocorre na relação entre o teor de argila e o fator K_i (Figura 2.10). Para uma melhor avaliação da relação entre esses parâmetros, seriam necessários estudos com outros solos argilosos, com índices de estabilidade de agregados intermediários, entre 0,4 e 0,8, aos utilizados neste estudo.

Conforme os resultados obtidos, verificou-se que o fator de erodibilidade do solo em entressulcos pode ser estimado pelo índice de estabilidade dos agregados do solo em água (Figura 2.13), o qual é dependente, dentre outros, do conteúdo de argila (Bradford et al., 1987; Kemper et al., 1987; Albuquerque et al., 2000) e do conteúdo e tipo de óxidos (Römken et al., 1977; Reichert et al., 1992; Le Bissonais & Singer, 1993).

O índice de estabilidade de agregados não está presente no modelo obtido (equação 2.25) porque, dessa forma, o mesmo estaria sendo erroneamente considerado como um parâmetro independente do teor de argila e de óxidos de ferro. Na Tabela 2.10, observa-se que o índice de estabilidade de agregados tem correlação significativa com vários parâmetros do solo, inclusive com o teor de argila e de óxidos de ferro.

O índice de estabilidade de agregados é um parâmetro muito importante, pois, além de ter correlação altamente significativa com a erodibilidade do solo em entressulcos (Meyer & Harmon, 1984; Reichert & Norton, 1994; Albuquerque et al., 2000), correlaciona-se também com praticamente todos os parâmetros do solo (Tabela 2.10). Dessa forma, a estabilidade dos agregados é uma forma simples e prática de representar várias características e propriedades do solo por meio de um único parâmetro.

Em geral, solos com alta estabilidade de agregados em água têm alto teor de argila e de óxidos, o que lhes confere elevada área superficial específica e maior contato e tensão entre as partículas do solo (Kemper et al., 1987). Essas propriedades tornam os agregados do solo mais resistentes ao efeito do impacto da gota da chuva e escoamento superficial combinados. Além disso, se os agregados são mais estáveis, podem permanecer maiores e, portanto, com maior massa, o que dificulta o transporte dos mesmos para fora da área em entressulcos.

Tabela 2.10. Correlações entre o índice de estabilidade de agregados (IEA) e alguns parâmetros físicos e químicos do solo.

Solos			ΔpH	CO	Fe _d	Fe _o	Arg _{H₂O}	Argila	AMF	M	DMP	IEA
U. M. ¹	Classe ²	Uso	g kg ⁻¹						mm			
Erechim	LVaf	natural	-0,40	29,9	95,18	2,40	240,6	760,7	7,6	519,8	4,10	0,97
		cultivado	-1,10	23,1	94,74	2,53	424,4	683,1	6,2	899,4	4,73	0,85
Santo Ângelo	LVdf	natural	-0,53	22,0	92,31	2,67	238,7	680,2	12,6	856,7	4,99	0,98
		cultivado	-1,10	19,5	92,51	1,92	286,4	578,5	12,3	1642,2	4,37	0,91
Cruz Alta	LVd	natural	-1,14	14,9	17,25	1,57	84,7	227,6	104,4	1655,3	3,53	0,38
		cultivado	-0,93	16,2	19,31	1,16	124,5	209,7	101,8	2003,4	3,53	0,33
r			0,51	0,791*	0,984**	0,893**	0,722*	0,973**	-0,980**	-0,789*	0,847**	

(¹) Unidade de Mapeamento - Brasil (1973); (²) Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; CO = carbono orgânico (Shimadzu, 2001); Fe_d = ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato (Mehra & Jackson, 1960); Fe_o = ferro extraído com oxalato amônio ácido (Schwertmann, 1964) e. AMF = areia muito fina; M = parâmetro textural; DMP = diâmetro médio ponderado (Kemper & Chepil, 1965; modificado por Tisdall & Oades, 1979); IEA = índice de estabilidade de agregados (Kemper & Rosenau, 1986).

A taxa de erosão do solo é controlada principalmente pelo processo de quebra dos agregados, que é o primeiro passo no processo de erosão em entressulcos (Legout et al., 2005). O índice de estabilidade dos agregados é um parâmetro que quantifica a suscetibilidade dos agregados do solo ao processo de quebra (Kemper et al., 1987). Dessa forma, a determinação da estabilidade dos agregados pode indicar a suscetibilidade de um solo à erosão em entressulcos, representada pelo fator de erodibilidade do solo em entressulcos. O uso do índice de estabilidade de agregados em água pode significar um melhor "custo-benefício" para a estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos do que o uso de modelos que considerem vários parâmetros, onde, geralmente, são necessárias várias determinações laboratoriais, incorrendo em alto custo e maior morosidade. Como o índice de estabilidade de agregados é um parâmetro de determinação fácil, rápida e de baixo custo, sugere-se que o mesmo seja adequado para estimar com precisão e de forma simplificada o fator de erodibilidade do solo em entressulcos de Latossolos.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que, para os solos estudados, o fator de erodibilidade do solo em entressulcos é mais bem estimado pela relação que considera o teor de argila e o de óxidos de ferro (Fe_o).

2.4. CONCLUSÕES

- O fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) dos solos LVaf (Erechim), LVdf (Santo Ângelo) e LVd (Cruz Alta) foi de $0,76 \times 10^6$; $0,97 \times 10^6$ e $1,48 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, respectivamente. Os solos mais argilosos apresentaram um menor fator de erodibilidade em entressulcos;

- O uso dos teores de areia muito fina (AMF) e de argila, conforme sugerido pelo modelo WEPP, não foi adequado para prever a erodibilidade em entressulcos dos Latossolos do Rio Grande do Sul estudados, pois superestimou os dados obtidos experimentalmente;

- O índice de estabilidade de agregados em água teve correlação negativa e altamente significativa com o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ($r = -0,90^{**}$), podendo ser utilizado para simplificar a predição do fator de erodibilidade do solo nas áreas em entressulcos;

- O conteúdo de argila total e o de óxidos ferro de baixa cristalinidade, extraído com oxalato de amônio ácido (Fe_o), explicaram 97% ($p < 0,01$) do fator de erodibilidade em entressulcos dos solos estudados, podendo, dessa forma, ser utilizados para a estimativa desse fator, para solos com características semelhantes as dos solos estudados.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTS, E.E.; NEARING, M.A.; WELTZ, M.A. RISSE, L.M.; PIERSON, F.B.; ZHANG, J.M. LAFLÉN, J.M.; SIMANTON, J.R. Soil component. In: FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. (Eds.) **Water Erosion Prediction Project** - WEPP. West Lafayette: USDA, 1995. p.1-47 (Report, 10).
- ALBUQUERQUE, J.A. **Suscetibilidade de alguns solos do Rio Grande do Sul à erosão em entressulcos**. 1998. 154f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1998.
- ALBUQUERQUE, J.A; CASSOL, E.A.; REINERT, D.J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.24, p.141-151, 2000.
- AL-DURRAH, M.M.; BRADFORD, J.M. The mechanism of raindrop splash on soil surface. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.46, p.1086-1090, 1982.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science of America, 1996. p.123-141.
- AZEVEDO, A.C.; BONUMÁ, A.S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ci. Rural**, Santa Maria, RS, v.34, n.2, p.609-617, 2004.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A., CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, RS: Gênese, 1999. p.09-26.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Physical and mineralogical methods. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, 1986. p.363-382.
- BRADFORD, J.M.; FERRIS, J.E.; REMLEY, P.A. Interrill soil erosion processes: I Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.51, p.1566-1571, 1987.

- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 12.ed. New Jersey, USA : Prentice Hall do Brasil, 1999. 881p.
- BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um podzólico vermelho-escuro franco-arenoso. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.20, p.127-134, 1996.
- BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife : Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30).
- CANTALICE, J.R.B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2001. 140f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.
- CASSOL, E.A.; LIMA, V.S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesq. Agropec. Brasileira**, Brasília, DF, v.38, n.1, p. 117-124, 2003.
- CHOW, V.T. **Open-channel hydraulics**. New York, USA : McGraw-Hill, 1959. 680p.
- DUIKER, S.W.; FLANAGAN, D.C.; LAL, R. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. **Catena**, Amsterdam, v.45, p.103-121, 2001.
- DUIKER, S.W.; RHOTON, F.E.; TORRENT, J.; SMECK, N.E.; LAL, R. Iron (Hydr) Oxide cristallinity effects on soil aggregation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.67, p.606-611, 2003.
- ELLIOT, W.J.; LIEBENOW, A.M.; LAFLEN, J.M.; KHOL, K.D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987, 1988**. West Lafayette: USDA-ARS, 1989. (Report, 3).
- ELLISON, W.D. Soil erosion studies. **P.I Agric. Eng.**, St. Joseph, v.28, p.145-146, 1947.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF, 1999. 412p.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro, RJ, 1979. 215p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ, 1997. 212p.
- FARENHORST, A.; BRYAN, R.B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. **Catena**, Amsterdam, v.25. p.47-62, 1995.

- FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH II, J.C.; NICKS, A.D.; NEARING, M.A.; LAFLEN, J.M. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. (Eds.). **Water erosion prediction project – WEPP: Technical Documentation**. West Lafayette: USDA-ARS-NSERL, 1995. (NSERL Report, 10).
- FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. **Water erosion prediction project: Technical Documentation**, West Lafayette: USDA-ARS-NSERL, 1995. (NSERL Report, 10).
- FOSTER, G.R.; HUGGINS, L.F. Deposition of sediment by overland flow on concave slopes. In: SOIL Erosion – Prediction and Control. [S.l.] : Soil Conservation Society of America, 1977. p.167-180 (Special Publication, 1)
- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process: Hydrologic modeling of small watersheds. In: HANN, C.T. (Ed.). St. Joseph: ASAE, 1982. p.297-380. (Monogr. 5).
- FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: PROCEEDING SEDIMENT-YIELD WORKSHOP, 1972, Oxford. **Proceedings...** Washington: USDA, 1975. p.190-207.
- GUY, B.T.; DICKINSON, W.T.; RUDRA, R.P.; WALL, G.J. Hydraulics of sediment-laden sheetflow and the influence of simulated rainfall. **Earth Surf. and Landforms**, New York, USA, v.15, p.101-118, 1990.
- JULIEN, P.Y. **Erosion and Sedimentation**. Melbourne: Cambridge Univ. Press, 1995. 280p.
- KÄMPF, N.; CURTI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: TÓPICOS em Ciência do Solo. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2003. v.3, p.1-54.
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L. (Eds.). **Methods of soil analysis**. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, 1965. p.499-510. (Agronomy, Monogr., 9).
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. 2.ed. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America: 1986. p.425-441.
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C.; DEXTER, A.R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.51, p.860-867, 1987.
- KINNELL, P.I.A. The effects of flow on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.34, p.161-168, 1991.

- KINNELL, P.I.A.; CUMMINGS, D. Soil/Slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.36, p.381-387, 1993.
- LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. **European J. Soil Sci.**, Orléans, France, v.47, p.425-437, 1996.
- LE BISSONNAIS, Y.; SINGER, M.J. Seal formation, runoff, and interrill erosion from seventeen California soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.57, p.224-229, 1993.
- LEGOUT, C.; LEGUÈDOIS, S.; LE BISSONNAIS, Y. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. **European J. Soil Sci.**, Orléans, France, v. 56, p.225-237, 2005.
- LEVY, G.J.; LEVIN, J.; SHAINBERG, I. Seal formation and interrill soil erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.58, p.203-209, 1994.
- 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, v.33, p.1882-1888, 1990.
- LIMA, P.M.P.; ANDRADE, H. Erodibilidade em entressulcos e atributos de solos com B textural e B latossólico do Sul de Minas Gerais. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.25, p.463-474, 2001.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE CLAYS & CLAY MINERALS, [1960, Ottawa]. **Proceedings...** Ottawa, 1960. p.317-327.
- MEKARU, T.; UEHARA, G. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, Wisconsin, USA, v.36, p.296-300, 1972.
- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, p.100-103, 1979.
- MEYER, L.D. Rain Intensity affects interrill erosion. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n.6, p.1472-1475, 1981.
- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.48, p.1152-1157, 1984.
- MOORE, D.C.; SINGER, M.J. Crust formation effects on soil erosion processes, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.54, p.1117-1123, 1990.

- REICHERT, J.M.; NORTON, L.D. Aggregate stability and rain-impacted sheet erosion of air-dried and prewetted clayey surface soils under intense rain. **Soil Sci.**, Baltimore, EUA, v.158, p.159-169, 1994.
- REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Campinas, SP, v.16, p.289-298, 1992.
- ROCKENBACH, C.A. **Erosão em entressulcos sob diferentes coberturas por resíduos de trigo em um podzólico vermelho-amarelo sob chuva simulada**. 1992. 108f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1992.
- RÖMKENS, M.J.M.; ROTH, C.B.; NELSON, D.W. Erodibility of select clay subsoils in relation to physical and chemical properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.41, p.954-960, 1977.
- SAS Institute. **Statistical Analytical Systems - SAS for Windows Procedures Guide**: Version 9.1. Cary, USA, 2002-2003.
- SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; CASSOL, E.A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.25, n.2, p.431-441, 2001.
- SCHWERTMANN, U. **Differenzierung der eisen oxide des bodens durch extraktion mit saurer ammoniumoxalat-losung**. Z. Pflanzenernaehr: Bodenkd, 1964. p.194-202.
- SHIMADZU. **Total Organic Carbon Analyzer (TOC-V CSH)**. Manual do Usuário. Tóquio, 2001. 144p.
- SIMONS, D.B.; SENTURK, F. **Sediment Transport Technology**: water and sediment dynamics. In: WATER Resources Publications. [S.l. : s.n], 1992. 897p.
- SOUZA, M.D. de. **Infiltração de água em Latossolo roxo distrófico submetido a diferentes manejos**. 1985. 131f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1985.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soil**. New York: Oxford University Press, 1989. 277p.
- STATISTICAL Package For The Social Sciences. SPSS for Windows, copy right, Version 8.0. Cary, USA, 1979-1997.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water stable aggregates in soils. **J. Soil Sci.**, Madison, Wisconsin, USA, v.33, p.141-163, 1982.

- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Stabilization of soil aggregate by the root systems of ryegrass. **Australian J. Soil Res.**, Melbourne, v.17, n.3, p.429-441, 1979.
- TRUMAN, C.C.; BRADFORD, J.M. Laboratory determination of interrill soil erodibility. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.59, p.519-526, 1995.
- VEIGA, M. da; CABEDA, M.S.V.; REICHERT, J.M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Campinas, SP, v.17, n.1, p.289-298, 1993.
- WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **J. Soil Water Conserv.**, Akey, v.26, p.189-193, 1971.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **J. Am. Soc. Agron.**, Madison, Wisconsin, USA, v.28, p.337-351, 1936.
- YOON, Y.N.; WENZEL, H.G. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. **J. of the Hydraulics Division**, New York, v.97, p.1367-1386, 1971.
- ZHANG, X.C.; NEARING, M.A.; MILLER, W.P.; NORTON, L.D.; WEST, L.T. Modeling interrill sediment delivery. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.62, p.438-444, 1998.

CAPÍTULO III

EFEITO DA UMIDADE INICIAL E DA PRESENÇA DE CROSTA SUPERFICIAL NA EROÇÃO HÍDRICA DO SOLO EM ENTRESSULCOS

Autor: Maria Cândida Moitinho Nunes

Orientador: Prof. Elemar Antonino Cassol

RESUMO

A forma de umedecimento e o conteúdo inicial de água no solo afetam o mecanismo de quebra dos agregados do solo sujeitos à chuva, influenciando, dessa forma, a desagregação e o transporte das partículas do solo. Durante um evento pluvial e entre eventos de secagem e umedecimento do solo, pode ocorrer formação de selo e de crosta superficiais, resultando na quebra dos agregados e aumento da erosão pelo incremento do escoamento superficial. Este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito da umidade antecedente à chuva e da formação de crosta superficial na erosão hídrica do solo em entressulcos. Foram utilizados dois Latossolos do Rio Grande do Sul. Um Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (LVaf) textura muito argilosa (Unidade de mapeamento Erechim) e um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) textura franco argilo arenosa (unidade de mapeamento Cruz Alta). As taxas de erosão em entressulcos foram determinadas em laboratório, em solo descoberto, sob chuva simulada com intensidade média de 88 mm h^{-1} , durante 180 minutos, em solo sob condição inicial úmido e em solo inicialmente seco ao ar. Foram utilizadas parcelas experimentais com área útil de $0,36 \text{ m}^2$, mantidas com declividade de $0,09 \text{ m m}^{-1}$. Em cada solo, foram aplicadas duas séries de chuva simulada, com um intervalo de sete dias entre cada uma, para que, após a primeira chuva o solo secasse ao ar, possibilitando assim a formação da crosta superficial antes da segunda chuva. Solo LVd (Cruz Alta), com conteúdo relativamente baixo de argila, de matéria orgânica e de óxidos de ferro e baixa estabilidade de agregados em água, teve maior taxa de desagregação e perda de solo em entressulcos do que o solo LVaf (Erechim), com elevado teor de argila, matéria orgânica e óxidos de ferro e com alta estabilidade de agregados em água, independente da variação na umidade inicial e do efeito de encrustamento superficial. No solo LVaf (Erechim), com alto teor de argila e elevada estabilidade de agregados em água, a variação no teor de umidade inicial e a presença de crosta superficial não causaram diferença significativa na taxa de desagregação e perda de solo por erosão em entressulcos. No solo LVd (Cruz Alta), sem presença de crosta superficial, a condição inicial de solo seco ao ar proporcionou uma maior suscetibilidade à erosão em entressulcos do que em solo inicialmente úmido, devido a uma possível quebra dos agregados menos estáveis, pelo rápido umedecimento da superfície do solo. O efeito da variação na umidade inicial do solo e da secagem e umedecimento da superfície, na taxa de desagregação do solo nas áreas em entressulcos, foi mais pronunciado em solo de textura arenosa e de baixa estabilidade de agregados em água.

CHAPTER III

EFFECT OF SURFACE CRUSTING AND INITIAL WATER CONTENT ON INTERRILL SOIL EROSION

Author: Maria Cândida Moitinho Nunes

Adviser: Prof. Elemar Antonino Cassol

ABSTRACT

The pre-wetting type and initial soil water content may determine soil aggregate breakdown by rainfall and, thus, increase soil aggregates detachment and transportation. In a rainfall event and between cycles of soil wetting and drying sealing and surface crust formation may occur. Soil surface crust formation resulting from aggregate breakdown and may facilitate soil erosion due to increased surface flow. This study was done with the objective to evaluate the effect of initial soil water content and soil surface crust formation on soil interrill erosion rates. Two oxisols from Rio Grande do Sul, Brazil, were used in this study, one of them with high clay content and the other with medium clay content. Interrill soil erosion rates were determined at laboratory under conditions of bare soil on experimental plots of 0.36 m² and slope of 0.09 m m⁻¹. Simulated rainfall of 88 mm h⁻¹ was applied during 180 minutes on soil initially wet and initially air-dried. Two rainfall series were applied on each soil, in a 7-days interval, thus allowing crust formation before the second rainfall by air-drying the soil. The sandier oxisol which has low water aggregate stability index, low clay, organic matter and iron oxide contents showed higher detachment and interrill erosion rates than the oxisol with high clay and organic matter contents, independently of the initial soil water content and crust formation. The variation in initial soil water content and the presence or not of soil crust had no effect in the interrill erosion rates on the clayey oxisol. Contrarily for the sandier oxisol the interrill soil erosion susceptibility increased with the soil initially air dry and with no crusting. In sandy oxisols the initial soil water content and the presence of soil crusting caused significant effect on interrill soil erosion rates.

CAPÍTULO III – EFEITO DA UMIDADE INICIAL E DA FORMAÇÃO DE CROSTA SUPERFICIAL NA EROSÃO HÍDRICA DO SOLO EM ENTRESSULCOS

3.1. INTRODUÇÃO

A condição de umidade do solo ao iniciar a chuva e os processos de umedecimento e secagem da superfície do solo, podem causar a formação de crosta superficial e afetar as taxas de perda de solo por erosão hídrica em entressulcos.

O processo de erosão hídrica do solo pode ser dividido em erosão em entressulcos e em sulcos (Foster & Meyer, 1975). A erosão em entressulcos é causada, principalmente, pela desagregação das partículas do solo devido ao impacto da gota da chuva e transporte pelo escoamento superficial. A erosão em sulcos é devida à desagregação, transporte e deposição das partículas do solo pelo escoamento superficial concentrado (Foster, 1982; Meyer & Harmon, 1984; Watson & Laflen, 1986; Alberts et al., 1995). Essa divisão do processo de erosão hídrica é uma das bases do Projeto de Predição da Erosão Hídrica - WEPP "*Water Erosion Prediction Project*" (Flanagan & Nearing, 1995). A taxa de aporte de sedimentos das áreas em entressulcos para os sulcos depende, além da suscetibilidade à erosão hídrica característica de cada solo, denominada "erodibilidade em entressulcos", da ação de diversos agentes externos, dentre os quais, os efeitos da formação de selo e de crosta superficiais.

As interações entre quebra de agregados, formação de selo e de crosta superficiais, escoamento superficial e erosão hídrica são extremamente complexas. O conteúdo inicial de umidade do solo tem influência tanto na quebra de agregados quanto na erosão hídrica do solo (Cernuda et al., 1953;

Truman et al., 1990; Reichert & Norton, 1994; Le Bissonais, 1996; Kuhn & Bryan, 2004). Se a condição inicial de umidade não for definida, os testes de laboratório que incluem a quebra de agregados não podem ser considerados precisos (Cernuda et al., 1953).

A predição da erosão hídrica do solo em entressulcos pode ser mais adequada e condizente com as condições de campo se for considerado o teor de umidade inicial do solo, pois as chuvas naturais podem ocorrer sobre o solo nas mais variadas condições de umidade. A umidade antecedente à chuva e a secagem e umedecimento do solo podem influenciar na formação de crosta superficial e na erosão hídrica do solo em entressulcos. O efeito e a magnitude destes processos dependem das propriedades do solo (Le Bissonais et al., 1995).

Um alto teor inicial de água pode reduzir a coesão do solo (Kemper & Rosenau, 1986). Por outro lado, a estabilidade dos agregados pode ser maior em um solo inicialmente úmido, reduzindo, dessa forma, a suscetibilidade das partículas à desagregação (Cernuda et al., 1954; Truman et al., 1990). Essa desagregação pode ser influenciada por mudanças nas propriedades do solo com o tempo, como o desenvolvimento de selo e de crosta superficiais (Bradford et al., 1987).

O selo superficial é uma camada fina e adensada com baixa condutividade hidráulica saturada localizada na superfície do solo (Reichert et al., 1992). A formação de selo superficial ocorre durante a chuva, enquanto que a formação de crosta superficial ocorre quando o selo superficial estiver seco (Moore & Singer, 1990).

A formação de selo em solos expostos ao impacto da gota da chuva pode ser devida a dois mecanismos: i) quebra física dos agregados, devido ao umedecimento e ao impacto mecânico das gotas da chuva e ii) dispersão físico-química das partículas de argila, as quais migram e preenchem os poros da superfície do solo (Agassi et al., 1981), dando origem à formação de selo durante a chuva e de crosta quando o solo estiver seco (Moore & Singer, 1990).

O resultado da formação de selo pode se manifestar de duas formas distintas: i) pode aumentar a resistência da superfície do solo, reduzindo a desagregação pelo impacto das gotas (Bradford et al., 1987) ou ii) pode causar

a quebra dos agregados e redução da taxa de infiltração da água no solo, induzindo à erosão pelo incremento do escoamento superficial (Moore & Singer, 1990).

A erosão em entressulcos depende da persistência das mudanças na estrutura do solo, após diferentes ciclos de umedecimento e secagem (Kuhn & Bryan, 2004). A redução do conteúdo de água no solo, após a formação de crosta superficial, pode provocar a contração da argila e a ruptura dos agregados e da crosta superficial, aumentando a suscetibilidade do solo à erosão hídrica (Huang & Bradford, 1993). A formação de selo e de crosta superficiais pode reduzir a infiltração da água no solo, aumentando o escoamento superficial e a erosão hídrica do solo.

A condição de solo inicialmente seco ao ar e a formação de crosta superficial podem ter menos influência na taxa de desagregação em entressulcos em solos com elevado conteúdo de argila e, conseqüentemente, alta estabilidade de agregados.

A compreensão dos processos e interações envolvidos no comportamento do solo ao longo de um evento de chuva e entre eventos pode contribuir para o avanço nos estudos de predição e controle da erosão hídrica.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da umidade antecedente à chuva e da formação de crosta superficial na erosão hídrica em entressulcos de Latossolos de diferentes classes texturais.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Local

O trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Erosão, Física e Química do Solo do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre-RS, Brasil, no período de 2003 a 2005.

3.2.2. Características dos solos e locais de coleta

Para a realização deste estudo foram utilizados Latossolos do Estado do Rio Grande do Sul, pertencentes às unidades de mapeamento LVaf e LVd (Brasil, 1973).

O solo da unidade de mapeamento Erechim (Brasil, 1973) é classificado como Latossolo Vermelho aluminoférrico típico textura muito argilosa LVaf - (Embrapa, 1999). Este solo foi coletado no município de Erechim-RS, em área de mata nativa (uso natural), no Campus da URI (Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões), na estrada para Gaurama-RS, km 5 da RS 211.

O solo da unidade de mapeamento Cruz Alta (Brasil, 1973) é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico textura franco argilo arenosa - LVd (Embrapa, 1999). Este solo foi coletado no município de Cruz Alta-RS, em área de campo sob uso natural (sem uso agrícola), na propriedade do Sr. Jorge A. Grubert Filho, situada a 7 km da sede do município, próximo a BR 158, no sentido de Cruz Alta a Santa Maria, a 1 km do trevo de acesso a Salto do Jacuí (à direita e a 300 m do acesso para a Área Industrial – Vila Benjamin Not).

3.2.3. Coleta e preparo das amostras de solo

A coleta dos solos foi realizada na camada de 0 a 20 cm, por meio de uma pá-de-corte, após a remoção da vegetação e de 1 a 2 cm da superfície do solo. Feito isso, o solo foi acondicionado em recipientes plásticos (bombonas) e transportado para o Laboratório de Erosão do Solo do Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

Ao lado do local de coleta dos solos, foram retiradas amostras com estrutura preservada por meio de anéis cilíndricos de volume conhecido, para a determinação da curva de retenção de água no solo. As demais determinações físicas e as determinações químicas foram realizadas em sub-amostras do material coletado a campo, com estrutura alterada, e transportado para o laboratório.

Para as determinações físicas (densidade das partículas e distribuição de diâmetro das partículas) e químicas (acidez ativa, carbono orgânico e teor de óxidos de ferro pedogênicos), as amostras de solo foram secas ao ar, moídas com rolo de madeira e passadas em peneira com abertura de malha de 2 mm, para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA), conforme Embrapa (1997).

Para a caracterização física dos solos as determinações foram efetuadas em três repetições cada. Para as determinações químicas foram utilizadas duas repetições.

3.2.4. Caracterização física e química dos solos

Os solos utilizados neste trabalho estavam sob condições naturais de uso, ou seja, no momento da coleta encontravam-se sem terem tido qualquer uso antrópico. Algumas das características desses solos são mostradas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Os solos foram fisicamente caracterizados pelas determinações de curva de retenção de água no solo (método do funil de placas porosas e das câmaras de pressão de Richards), densidade de partículas (Blake & Hartge, 1986), distribuição de diâmetro das partículas do solo (Método da pipeta - Embrapa, 1997), distribuição de diâmetro dos agregados do solo (Kemper &

Chepil, 1965 e Kemper & Chepil, 1965, modificado por Tisdall & Oades, 1979) e estabilidade dos agregados em água (Kemper & Rosenau, 1986).

Os solos foram quimicamente caracterizados pela determinação da acidez ativa do solo (Mekaru & Uehara, 1972; Embrapa, 1979), do teor de carbono orgânico por combustão seca (Shimadzu, 2001) e do teor de óxidos de ferro pedogênicos, pela extração com oxalato de amônio ácido no escuro (Fe_o), conforme Schwertmann (1964) e pela extração com ditionito-citrato-bicarbonato/DCB (Fe_d), conforme Mehra & Jackson (1960).

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os resultados da caracterização física, química e mineralógica dos solos utilizados.

Tabela 3.1. Distribuição de diâmetro das partículas do solo, densidade de partículas (Dp), conteúdo volumétrico de água no solo sob tensão de -6 kPa, diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade dos agregados em água (IEA), em solo sob estado natural. Média de três repetições.

Solos	Arg _{H₂O}	Argila	Silte	Areia	AMF	Dp	Água a -6 kPa	DMP ³	DMG ³	IEA ⁴	
U.M. ¹	Classe ²	g kg ⁻¹				Mg m ⁻³	m ³ m ⁻³	mm			
Erechim	LVaf	240,6a	760,7a	209,6a	29,7b	7,6b	2,62	0,42	4,10a	2,47a	0,97a
Cruz Alta	LVd	84,7b	227,6b	109,9b	662,5a	104,4a	2,68	0,22	3,53b	1,87b	0,38b

¹Unidade de Mapeamento (Brasil, 1973); ²Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; ARG_{H₂O} = argila dispersa em água; AMF = areia muito fina; ³Kemper & Chepil (1965), modificado por Tisdall & Oades, 1979; ⁴Kemper & Rosenau (1986). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Tabela 3.2. Características químicas dos solos em estado natural. Média de duas repetições.

Solos	pH _(H₂O)	pH _(KCl)	ΔpH	CO	Fe _o	Fe _d	
U.M. ¹	Classe ²				g kg ⁻¹		
Erechim	LVaf	4,08	3,68	-0,40	29,90	2,40a	95,18a
Cruz Alta	LVd	5,06	3,92	-1,14	14,87	1,57b	17,25b

¹Unidade de Mapeamento (Brasil, 1973); ²Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; CO = carbono orgânico (Shimadzu, 2001); Fe_o = ferro extraído com oxalato amônio ácido (Schwertmann, 1964); Fe_d = ferro extraído com ditionito citrato bicarbonato/DCB (Mehra & Jackson, 1960). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

3.2.5. Erosão hídrica do solo em entressulcos sob chuva simulada em laboratório

3.2.5.1. Preparo do solo para uso nas parcelas experimentais

As amostras de solo coletadas foram destorroadas manualmente, com o cuidado de separar os agregados nos planos de fraqueza natural, e passadas em peneira com abertura de malha de 10 mm. Após, as amostras foram espalhadas em bandejas para secar ao ar e à sombra. Nessas condições, o solo foi colocado na parcela experimental, em laboratório, para aplicação da chuva simulada. Foram realizadas três repetições para cada série de chuva simulada.

3.2.5.2. Parcelas experimentais

A erosão hídrica dos solos em entressulcos foi determinada em laboratório, sob chuva simulada, em solo descoberto, simulando as condições de solo e de superfície proporcionadas pelo preparo convencional.

Foram utilizadas parcelas experimentais de formato quadrado com 0,6 m de lado e 0,1 m de profundidade, totalizando uma área útil de teste de 0,36 m², com bordadura de 0,2 m. A bordadura teve por objetivo compensar as perdas líquidas de solo por salpico do interior da área de teste. Neste estudo, durante a aplicação da chuva simulada, as parcelas foram mantidas em uma declividade de 0,09 m m⁻¹.

A parcela experimental foi constituída de material acrílico e montada sobre uma estrutura metálica, semelhante à utilizada por Cantalice (2001). O fundo da parcela apresentava 6 furos, conectados a mangueiras de 6 mm de diâmetro cada. Estas mangueiras ficavam conectadas também a um reservatório de água, externo à área da parcela. Este sistema serviu para o umedecimento do solo por capilaridade antes da aplicação da chuva, para obter a mesma tensão de água no início da chuva e para a drenagem da água do solo, durante a aplicação da chuva simulada.

O volume das parcelas foi preenchido por duas camadas de solo, sendo a mais profunda com de 3 cm de espessura de solo, acondicionado com densidade de empacotamento (D_e) de 1,5 Mg m⁻³. Sobre essa camada foi colocado um tecido de algodão cru, sobre o qual foi colocada uma camada de 7

cm de solo seco ao ar, previamente tamisado em peneira com malha de 10 mm de diâmetro, conforme descrito no item 3.2.5.1. Esta camada de solo foi acondicionada na parcela de forma a obter-se uma densidade de empacotamento de 1 Mg m^{-3} , com mínima segregação dos agregados e rugosidade superficial homogênea.

3.2.5.3. Condição de umidade antecedente à chuva

Para proporcionar a condição de solo pré-umedecido, o solo da parcela foi saturado por pressão, de baixo para cima, de 10 cm, durante uma noite. Após, o solo foi mantido a uma tensão de 60 cm de coluna de água (-6 kPa) por um período de 2 horas. Feito isto, foi aplicada a chuva simulada, mantendo-se a condição de drenagem sob tensão de -6 kPa.

Para a condição de solo inicialmente seco, o solo da parcela não foi saturado na noite anterior. Nesta condição, a chuva simulada foi aplicada diretamente sobre o solo seco ao ar.

3.2.5.4. Aplicação de chuva simulada em laboratório

As chuvas foram aplicadas em laboratório, por meio do uso de um simulador de chuvas, conforme o princípio descrito por Meyer & Harmon (1979). Foi utilizado um simulador composto de um bico aspersor com 12,7 mm de diâmetro interno (Veejet 80-150 / Spraying Systems Company, Chicago, USA). Este simulador, descrito por Souza (1985), fica a 3,05 m da superfície do solo, com pressão constante de saída de água no bico de 41 kPa (6 lb pol^{-2}). A energia cinética do impacto das gotas nessa pressão, independente da intensidade aplicada, é de, aproximadamente, $275 \text{ kJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Conforme Meyer & Harmon (1979), esta energia é equivalente ao impacto de uma chuva natural com intensidade igual a 80 mm h^{-1} , com distribuição de gotas com 2,3 mm de diâmetro e velocidade terminal de $8,8 \text{ m s}^{-1}$.

As intensidades das chuvas aplicadas foram determinadas por meio de um conjunto de 10 pluviômetros, colocados ao lado da área útil das parcelas experimentais. Para todos os solos e em todos os testes, foram aplicadas chuvas simuladas, com três repetições cada. A intensidade da chuva simulada variou de

85,1 a 91,5 mm h⁻¹ (Apêndice 6), com um desvio padrão de 1,65 mm h⁻¹ e média de 88 mm h⁻¹, durante 180 minutos.

Nesta parte do trabalho, foram aplicadas chuvas simuladas sobre o solo com tensão de água equivalente a 60 cca (-6 kPa) e sobre o solo inicialmente seco ao ar, correspondente a tensões menores que -1500 kPa, em superfície sem presença de crosta superficial.

3.2.5.5. Formação de crosta superficial

Nesta parte do trabalho, foram aplicadas chuvas simuladas sobre o solo inicialmente seco ao ar, em condições de superfície com e sem efeito de crosta superficial.

As chuvas simuladas foram aplicadas sobre o solo inicialmente seco ao ar, tanto no primeiro evento de chuva, em superfície sem crosta, quanto no segundo evento, em superfície com crosta. Dessa forma, considera-se que não houve efeito de umidade inicial, apenas de formação de crosta superficial. O procedimento utilizado é semelhante ao descrito por Le Bissonais & Singer (1992). Entre a primeira e a segunda série de chuva simulada a superfície do solo não foi preparada e permaneceu exposta para secar ao ar durante 7 dias. A formação de crosta superficial foi consequência da secagem da superfície do solo durante esse período.

3.2.5.6. Determinação da taxa de desagregação do solo e da velocidade do escoamento em entressulcos

O escoamento superficial foi amostrado em potes plásticos de 920 mL, colocados na extremidade inferior da calha coletora. As amostras foram coletadas durante 60 segundos, com intervalos de 2 minutos entre as coletas.

As amostras de solo e água coletadas em potes plásticos foram pesadas e após, foi adicionado 5 mL de solução concentrada de sulfato duplo de alumínio e potássio ($K Al(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$ - alúmen de potássio a 5%), para a decantação das partículas. Após 24 horas o sobrenadante foi succionado e os potes foram levados para estufa a 50°C, até atingir peso constante, sendo, posteriormente, pesados com e sem o solo seco.

A taxa de desagregação do solo em entressulcos, (D_i) ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), foi considerada como igual à taxa de aporte de sedimentos, ou seja, à perda de solo em entressulcos, e determinada para cada intervalo de amostragem por meio da divisão da massa de solo coletado em cada intervalo de coleta pela área da parcela ($0,36 \text{ m}^2$) e pelo período de cada coleta (60 s).

Após a plotagem dos valores de taxa de desagregação para cada intervalo de coleta, foi ajustada uma equação para expressar o comportamento da taxa de desagregação ao longo do tempo de chuva. Quando a curva apresentou um ponto de máxima, este valor foi utilizado como a taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos. Quando não houve um ponto de máxima ou quando a taxa de desagregação era crescente até o final da chuva, foi utilizada a média dos últimos cinco valores de taxa de desagregação, conforme proposto por Elliot et al. (1989) e adotado pelo modelo WEPP.

Durante a coleta do solo desagregado nas parcelas em entressulcos foi determinada também a velocidade do escoamento superficial. A velocidade do escoamento foi obtida pela medição do tempo gasto para um corante (azul de metileno a 0,25%) percorrer uma distância conhecida na parcela experimental. As medidas foram feitas a cada 5 minutos, a partir de 120 minutos de chuva simulada. A velocidade assim determinada é considerada como a velocidade máxima do escoamento. Para as avaliações da hidráulica do escoamento, utilizou-se a velocidade média do escoamento, a qual, conforme Farenhorst & Bryan (1995), é dada pelo produto da velocidade observada por um fator de ajuste $\alpha = 2/3$.

3.2.6. Análise estatística dos dados

A análise estatística foi realizada utilizando-se os programas estatísticos SAS - Statistical Analytical Systems/versão 9.1 (SAS, 2003) e SPSS - Statistical Package For The Social Sciences/versão 8.0 (SPSS, 1997).

Foi utilizado o delineamento fatorial com nível de significância de 5 %. Os solos foram analisados com 2 níveis (1 - LVaf - Erechim); 2 - LVd - Cruz Alta), dois fatores (1 - inicialmente úmido; 2 - inicialmente seco ao ar) e dois tipos (1 - superfície com crosta; 2 - superfície sem crosta).

Foram utilizadas análises de variância (ANOVA) (Apêndices 1 - 4), comparações múltiplas de médias e análise de medidas repetidas, com ajuste pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Taxas de desagregação e perdas de solo em entressulcos, em condição de solo pré-umedecido e inicialmente seco ao ar

Na Tabela 3.3 (com maiores detalhes no Apêndice 11), observa-se que o tempo de início do escoamento superficial (t_i) foi menor para a condição inicial de solo úmido, tanto no solo LVaf (Erechim) como no solo LVd (Cruz Alta). Isso ocorre porque, devido ao pré-umedecimento, os microporos já estão preenchidos com água e, teoricamente, apenas os macroporos precisam ser preenchidos pela água da chuva. No solo inicialmente seco, entretanto, há a necessidade de preenchimento tanto dos microporos quanto dos macroporos, o que decorre em um maior tempo até que todo o perfil de solo seja saturado e possa iniciar o escoamento superficial. Isso ocorre porque o escoamento tem início quando a intensidade da chuva é superior à taxa de infiltração instantânea e a água excedente satisfaz a detenção e a retenção superficial (Meyer & Monke, 1965).

Considerando a condição inicial de solo úmido, verificou-se que o escoamento superficial tende a ocorrer mais rapidamente no solo LVd do que no solo LVaf. Isto ocorre, possivelmente, porque o solo LVaf tem uma maior taxa de infiltração, fazendo com que o início do escoamento superficial seja retardado.

O rápido início do escoamento superficial no solo LVd pode indicar uma baixa taxa de infiltração, devido, provavelmente, à sua baixa estabilidade de agregados em água (Tabela 3.1), o que pode induzir à erosão pelo incremento do escoamento superficial (Moore & Singer, 1992; Le Bissonais, 1996).

Tabela 3.3. Tempo de início do escoamento superficial (t_i), velocidade média do escoamento (V) e taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos (D_i), em solo sob condições naturais e sem a presença de crosta superficial, sob declividade de 9% e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), durante 180 minutos.

Solos			t_i	V	D_i ($\times 10^4$)
U. M. ¹	Classe ²	Condição Inicial	min	m s^{-1}	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
		úmido	11,3	0,025	1,74c
Erechim	LVaf	seco	14,0	0,026	2,07c
		Média	12,7	0,026	1,91
		úmido	3,8	0,046	3,46b
Cruz Alta	LVd	seco	13,7	0,044	5,60a
		Média	8,8	0,045	4,53

¹ Unidade de Mapeamento (Brasil, 1973); ² Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Os valores de taxa máxima de desagregação em entressulcos (D_i) do solo LVd equivalem a aproximadamente o dobro dos obtidos para o solo LVaf, tanto na condição inicial de solo úmido quanto na condição de solo inicialmente seco ao ar (Tabela 3.3 e Apêndice 11).

A menor taxa de desagregação em entressulcos do solo LVaf deve-se, possivelmente, ao alto teor de argila, carbono orgânico e óxidos de ferro deste solo em relação ao solo LVd, pois esses parâmetros influenciam na estabilidade dos agregados (Tisdall & Oades, 1982; Kemper et al., 1987; Azevedo & Bonumá, 2004). Resultado semelhante foi encontrado por Le Bissonais & Singer (1993), os quais estudaram alguns solos da Califórnia e verificaram que os solos com maior teor de carbono orgânico e de óxidos de Fe e Al apresentaram maior taxa de infiltração e menor erosão em entressulcos.

O solo LVaf atingiu sua máxima taxa de desagregação em aproximadamente 90 minutos de chuva simulada, tanto na condição inicial de solo úmido quanto na condição inicial de solo seco ao ar (Figura 3.1). Após os 90 minutos, a taxa de desagregação teve um comportamento praticamente

constante até o final do evento. Entretanto, o aumento das taxas de desagregação do início do escoamento até 90 minutos não foi muito expressivo. Isso ocorreu, possivelmente, porque em solos com agregados mais estáveis a formação de selo superficial e a erosão hídrica são menores (Le Bissonais & Arrouays, 1997). Para esse solo, não houve diferença significativa nas taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i) em solo inicialmente úmido ou inicialmente seco. Possivelmente, os agregados do solo LVaf são resistentes à quebra pelo impacto da gota da chuva e à ação do escoamento superficial, impactado pela chuva, proporcionando uma taxa de desagregação praticamente constante ao longo do tempo.

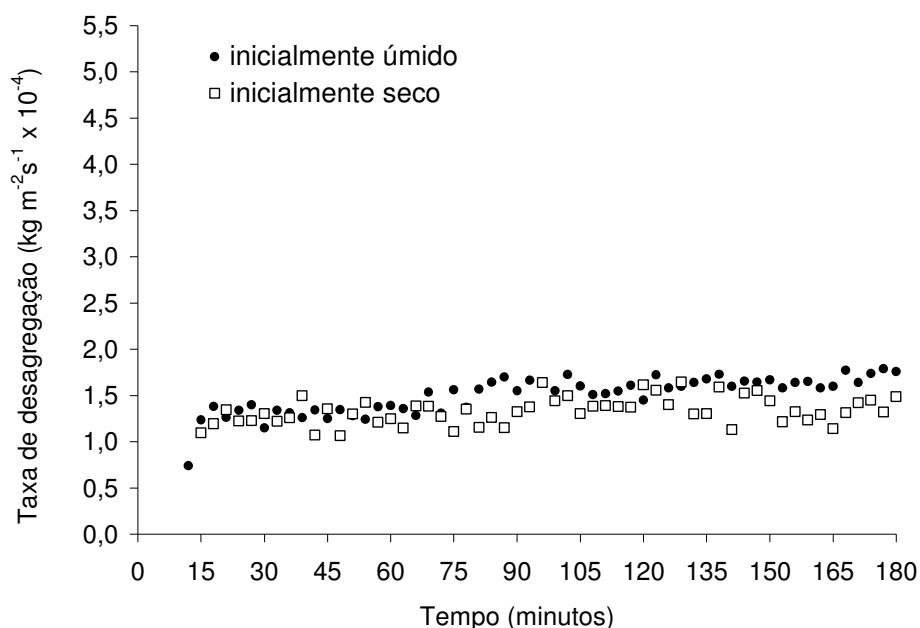


Figura 3.1. Taxas de desagregação em entressulcos do solo LVaf - Latossolo Vermelho aluminoférrico (Erechim), sob condições naturais e sem presença de crosta superficial. Valores obtidos sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).

O solo LVd, na condição inicial de solo úmido, apresentou uma taxa máxima de desagregação em entressulcos em, aproximadamente, 75 minutos, a qual é duas vezes maior do que a do solo LVaf (Figura 3.2).

No solo LVd, na condição inicial de solo úmido, a taxa de desagregação aumentou rapidamente com o tempo e tem seu máximo em aproximadamente 90 minutos de chuva simulada. Na condição de solo inicialmente seco ao ar, entretanto, a taxa máxima de desagregação foi

atingida antes, em aproximadamente 75 minutos (Figura 3.2). Isso ocorre, possivelmente, devido à baixa estabilidade em água dos agregados desse solo, os quais são facilmente desagregados pela expulsão do ar aprisionado durante o rápido umedecimento do solo, favorecendo uma maior formação de selo devido à condição inicialmente seca ao ar. Le Bissonais & Singer (1992) também estudaram o efeito do conteúdo inicial de umidade e verificaram que a erosão em entressulcos pode ser maior em uma superfície inicialmente seca ao ar do que em uma úmida, durante os primeiros estágios de formação de selo. Os autores observaram que o pré-umedecimento reduziu o desenvolvimento de crosta, o escoamento superficial e a erosão hídrica do solo.

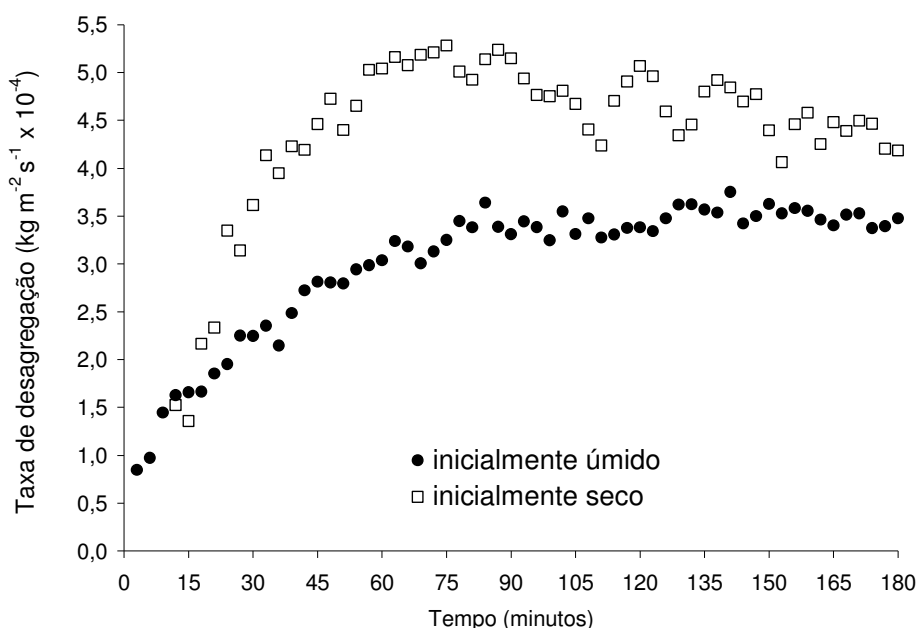


Figura 3.2. Taxa de desagregação em entressulcos do solo LVd - Latossolo Vermelho distrófico (Cruz Alta), sob condições naturais e sem presença de crosta superficial. Valores obtidos sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).

Considerando a condição de solo inicialmente seco ao ar, verifica-se que o solo LVd (Figura 3.2) apresentou uma taxa de desagregação 2,7 vezes maior que a do solo LVaf (Figura 3.1). Isso se deve, possivelmente, ao fato do solo LVd ter uma estabilidade de agregados em água 2,6 vezes menor que a do solo LVaf (Tabela 3.1).

No solo LVd, inicialmente seco ao ar, a taxa de desagregação em entressulcos aumentou rapidamente com o tempo até aproximadamente 75

minutos, quando atinge a taxa máxima e, após, passa diminuir com o tempo (Figura 3.2). Essa redução da taxa de desagregação do solo com o tempo de chuva simulada pode ser devida a uma possível formação de selo superficial, o qual pode, temporariamente, aumentar a resistência da superfície do solo ao cisalhamento pelo escoamento superficial (Bradford et al., 1987; Le Bissonais et al., 1995). Esse comportamento pode, em parte, também ser devido ao fato da borda inferior da parcela permanecer fixa durante o todo o período. Assim, as elevadas taxas de erosão em entressulcos podem ter rebaixado o nível da superfície do solo ao nível da borda inferior da parcela, restringindo o aporte de sedimentos após um determinado tempo. Para evitar que esse fato seja relevante, são consideradas sempre as taxas máximas de desagregação. O comportamento crescente da taxa de desagregação em entressulcos até um ponto de máxima e posteriormente decrescente, também foi observado no campo em Argissolo Vermelho cujo teor de argila era tão baixo quanto o do solo LVd (Braida & Cassol, 1996).

Na condição inicial de solo seco ao ar, o solo LVd apresentou taxas de desagregação duas vezes maior do que as do solo LVaf. No solo LVd, essa condição inicial de solo seco ao ar proporcionou uma taxa de desagregação em entressulcos 73% maior do que a condição inicial de solo úmido. No solo LVaf, entretanto, não houve diferença significativa na taxa de desagregação do solo em entressulcos em relação à condição inicial de umidade.

O rápido umedecimento do solo, que pode ser causado pelo impacto da chuva sobre a superfície do solo inicialmente seca ao ar, pode causar fraturas internas nos agregados, devido à diferença entre expansão e compressão do ar, além do enfraquecimento das forças entre partículas (Kemper & Rosenau, 1986; Reichert & Norton, 1994).

Os solos secos ao ar tendem a apresentar uma menor estabilidade de agregados do que solos pré-umedecidos, devido, principalmente, a diferenças nas forças de quebra dos agregados (Truman et al., 1990).

O pré-umedecimento do solo reduziu as perdas de solo por erosão hídrica em entressulcos no solo LVd. No solo LVaf, entretanto, o pré-umedecimento não alterou as taxas de aporte de sedimentos. Este comportamento distinto pode ser devido ao alto teor de areia do solo LVd, principalmente de areia muito fina, e elevado teor de argila do solo LVaf

(Tabela 3.1). Os solos arenosos apresentam menor agregação (Brady & Weil, 1999) e são mais facilmente desagregados e transportados (Ellison, 1947), sendo, portanto, muito suscetíveis à erosão hídrica, em relação aos solos argilosos (Meyer & Harmon, 1984).

Conforme Kemper et al. (1987), quanto maior a quantidade de argila maior a área superficial específica e maior a tensão entre as partículas do solo. Observa-se que a distribuição de diâmetro das partículas do solo influencia na estabilidade dos agregados e esta por sua vez, na desagregação do solo em entressulcos. Outro fator importante que pode ter contribuído para a maior erosão em entressulcos no solo LVd é o menor conteúdo óxidos de ferro e menor estabilidade de agregados deste solo quando comparado com o solo LVaf (Tabela 3.2). Os óxidos de Fe são importantes agentes de formação e estabilização dos agregados (Azevedo & Bonumá, 2004). Dessa forma, observa-se que a umidade inicial do solo influencia grandemente na desagregação e transporte das partículas e, dessa forma, na erosão em entressulcos (Truman & Bradford, 1993), sendo que as diferenças de comportamento entre distintas condições iniciais de umidade são dependentes das propriedades do solo (Le Bissonais et al., 1995).

Truman & Bradford (1993) também observaram que o pré-umedecimento teve efeitos distintos na erosão em entressulcos de solos com diferentes texturas. Os autores verificaram que em solo com argila tipo 2:1 e em solo franco arenoso, o pré-umedecimento não teve efeito, mas em solo com argila tipo 1:1 e em solo franco siltoso, o pré-umedecimento reduziu a erosão hídrica do solo. Veiga et al. (1993), entretanto, estudaram alguns solos do Rio Grande do Sul e não verificaram diferença significativa entre os valores de erosão em entressulcos relativos à aplicação de chuva sobre o solo seco ao ar e pré-umedecido com chuva simulada de baixa intensidade.

Os dados obtidos mostram a importância do tempo de aplicação da chuva na avaliação da taxa de desagregação. Em ambos os solos observa-se que as taxas de desagregação em entressulcos tornaram-se constantes apenas depois de transcorridos de 75 a 90 minutos de chuva. Caso a chuva durasse menos de 90 minutos, entretanto, não seria possível avaliar adequadamente este comportamento e/ou identificar o ponto de máxima taxa de desagregação. Dessa forma, é importante que se considere o tempo de

chuva, pois dependendo do tipo de solo a taxa máxima de desagregação pode não ser alcançada para pequena duração de chuva simulada.

As perdas de solo acumuladas em 180 minutos (Figura 3.3) refletem o comportamento dos solos estudados frente às variações de umidade. O solo LVaf, com maior teor de argila, de carbono orgânico e de óxido de ferro e com maior estabilidade de agregados, apresentou menores perdas de solo acumuladas que o solo LVd. Percebe-se que a variação de umidade não foi suficiente para promover diferença significativa ($p < 0,01$) na perda de solo do LVaf. No solo LVd, entretanto, a condição de solo inicialmente seco aumentou em mais de 38% as perdas de solo.

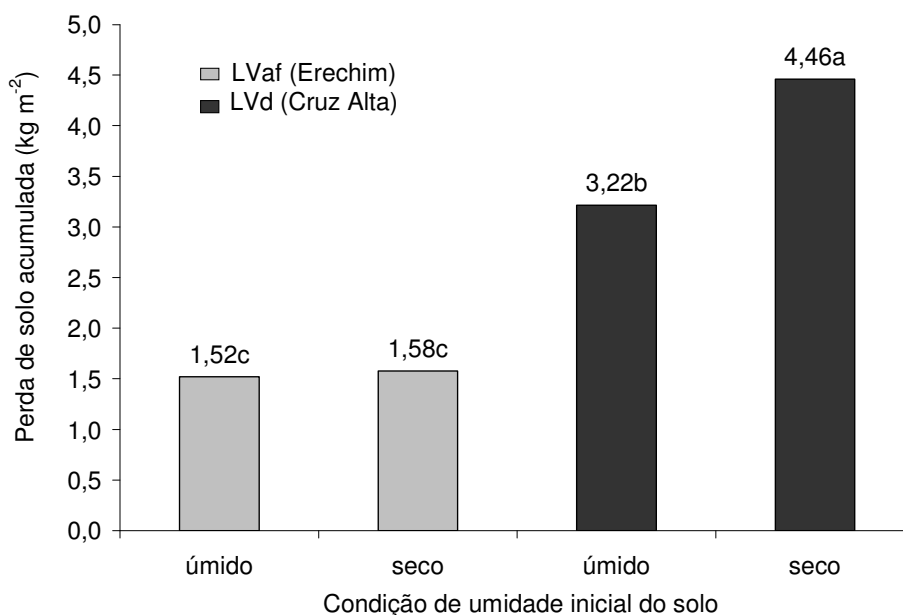


Figura 3.3. Perdas de solo em entressulcos, acumuladas durante 180 minutos, em solo sob condições naturais e distintas condições de umidade inicial, sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h⁻¹). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

De forma geral, pode-se dizer que a textura arenosa do solo LVd, a baixa estabilidade dos seus agregados e baixo teor de óxidos de ferro, em relação ao solo LVaf, resultaram em uma elevada taxa de desagregação e perda de solo em entressulcos.

Em solos mais arenosos e, portanto, com baixa estabilidade de agregados, a condição de solo inicialmente seco ao ar pode causar maiores perdas de solo do que a condição inicial de solo úmido. O solo inicialmente

seco estará sujeito a um maior gradiente de umedecimento do que quando úmido, podendo causar a quebra de agregados, devido à rápida expulsão do ar aprisionado. Além disso, em partículas mais grossas, um pequeno filme de água entre as partículas pode favorecer a coesão entre as mesmas.

3.3.2. Efeito da formação de crosta superficial na desagregação do solo em entressulcos na condição inicialmente seco ao ar

Na Tabela 3.4, observa-se que o tempo de início do escoamento (t_i) foi menor nos solos com presença de crosta superficial. O efeito da crosta em causar um rápido início de escoamento superficial foi mais pronunciado no solo LVd, onde o escoamento superficial iniciou 8 vezes mais rápido no solo com presença de crosta superficial do que no solo sem crosta.

Tabela 3.4. Tempo de início do escoamento superficial (t_i), velocidade média do escoamento (V) e taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos (D_i), em solo sob condições naturais e inicialmente seco ao ar, sob declividade de 9% e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), durante 180 minutos.

Solos			t_i	V	D_i ($\times 10^4$)
U. M. ¹	Classe ²	Superfície	min	m s^{-1}	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
		sem crosta	14,0	0,026	1,65c
Erechim	LVaf	com crosta	7,0	0,027	1,85c
		Média	10,5	0,027	1,75
		sem crosta	13,7	0,044	5,60a
Cruz Alta	LVd	com crosta	1,7	0,046	3,84b
		Média	7,7	0,045	4,72

¹ Unidade de Mapeamento (Brasil, 1973); ² Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico. Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

O efeito da formação de crosta superficial foi mais pronunciado no solo LVd do que no solo LVaf, possivelmente, porque esse solo apresenta um

alto teor de areia, principalmente de areia muito fina, relativamente baixo teor de argila e baixo índice de estabilidade de agregados em água (Tabela 3.1). Essas características favorecem a desagregação do solo, possibilitando a formação de selo e de crosta superficiais. A formação de crosta superficial causou, possivelmente, a quebra dos agregados e a formação de pontos de fraqueza na superfície, fazendo com que os agregados fossem facilmente quebrados em partículas e/ou agregados de menor tamanho, os quais preencheram os poros da superfície do solo, reduzindo a taxa de infiltração e, conseqüentemente, causando um rápido escoamento superficial.

O solo LVaf teve taxa de desagregação em entressulcos menor que o solo LVd, tanto na condição de superfície sem crosta quanto após a formação de crosta superficial. Isto se deve, provavelmente, à maior estabilidade de agregados em água desse solo, em relação ao LVd (Tabela 3.1), o que faz com que os agregados sejam mais resistentes aos efeitos de secagem e umedecimento do solo.

Em relação ao solo LVaf, a formação de crosta superficial não causou aumento significativo na taxa de desagregação em entressulcos, em relação à superfície sem presença de crosta superficial. Nesse caso, pode-se dizer que o fator crosta para o solo LVaf, para a correção do fator de erodibilidade básica do solo em entressulcos, seria igual a 1.

Na Figura 3.4, observa-se que o solo LVaf, tanto sem quanto com crosta superficial teve um comportamento praticamente constante em todo o evento de chuva simulada. A elevada resistência desse solo ao impacto da gota da chuva e ao efeito de secagem e umedecimento do solo deve-se, possivelmente, à elevada estabilidade em água dos seus agregados. Isso indica que esse solo não é suscetível à formação de crosta superficial. Le Bissonais & Arrouays (1997) também verificaram que nos solos com agregados mais estáveis, a formação de selo superficial e a erosão hídrica foram menores.

O solo LVd apresentou uma elevada taxa de desagregação em entressulcos, tanto antes quanto depois da formação de crosta superficial. Na Figura 3.5, observa-se que antes da formação de crosta superficial, o solo LVd tem uma taxa de desagregação que aumenta rapidamente com o tempo, atingindo seu pico em aproximadamente 75 minutos de chuva simulada. Após,

ocorre uma redução na taxa de desagregação do solo, a qual deve-se, provavelmente, à formação de selo superficial, o qual pode, temporariamente, aumentar a resistência da superfície do solo ao cisalhamento pelo escoamento superficial (Bradford et al., 1987; Le Bissonais et al., 1995).

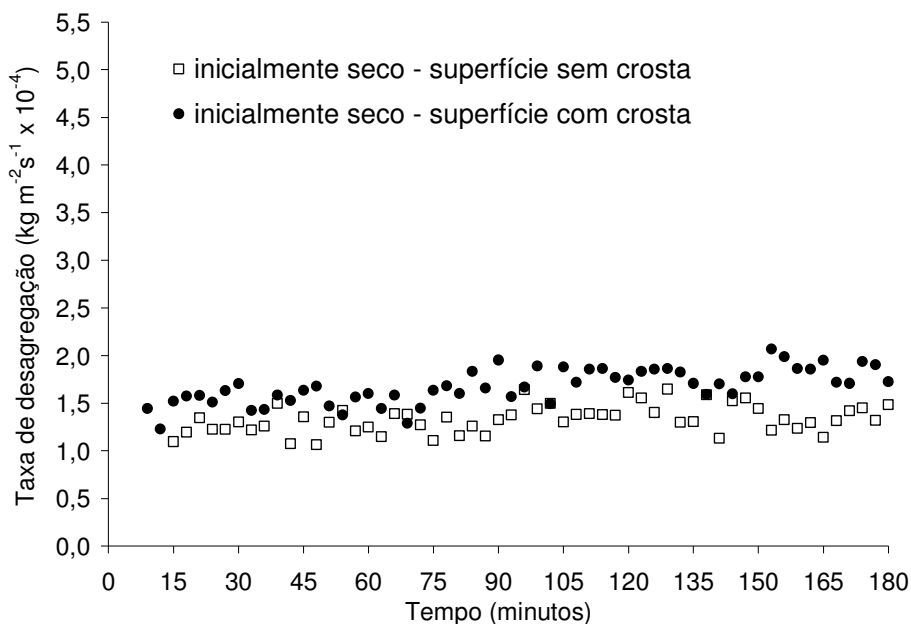


Figura 3.4. Taxas de desagregação em entressulcos do solo Latossolo Vermelho aluminoférrico - LVaf (Erechim), sob condições naturais e inicialmente seco ao ar. Valores obtidos sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).

A hipótese inicial de que a formação de crosta superficial, principalmente em solos com baixa estabilidade de agregados, favorece a perda de solo em entressulcos não foi confirmada. Verificou-se que, no solo LVd, a formação de crosta superficial proporcionou uma maior taxa de desagregação apenas nos primeiros 25 minutos de chuva. Após, a taxa de desagregação do solo em entressulcos foi maior no solo sem formação de crosta superficial. Este comportamento pode ser devido ao fato de que durante a primeira série de chuva ocorreu uma grande perda do sedimento, possivelmente do mais disponível para o transporte, por um longo período. Além disso, esse comportamento pode ser devido a um preenchimento dos poros do solo pelas partículas e/ou agregados menores produzidos durante a primeira série de chuva, causando uma certa resistência da crosta superficial. Dessa forma, durante as últimas horas de chuva sobre a crosta, o material

mais facilmente transportado já pode ter sido perdido durante a primeira hora e durante a primeira série de chuva.

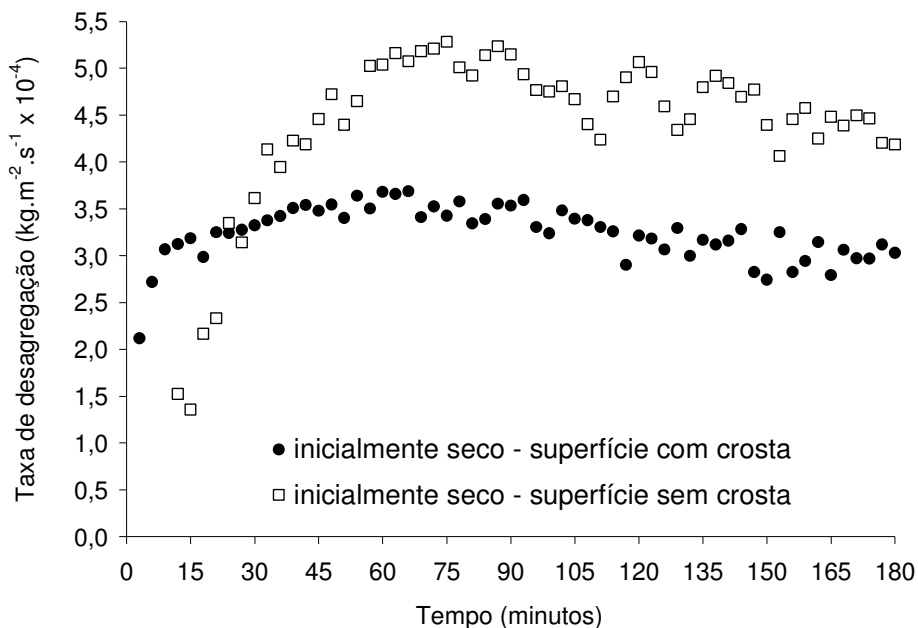


Figura 3.5. Taxas de desagregação em entressulcos do solo Latossolo Vermelho distrófico - LVd (Cruz Alta), sob condições naturais e inicialmente seco ao ar. Valores obtidos sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).

Fox & Bryan (1999) obtiveram resultados semelhantes. Os autores estudaram um solo franco arenoso e verificaram que a erosão decorrente do escoamento impactado pela chuva teve seu pico logo no início da simulação, reduzindo, posteriormente, a uma taxa constante. Apesar de um aumento no escoamento superficial e na capacidade de transporte, a taxa final de perda de solo foi menor do que a taxa no pico inicial. Segundo os autores, este efeito foi devido, provavelmente, à condição de desagregação-limite (Foster, 1982), em que a capacidade de transporte é maior do que a quantidade de solo desagregado produzido. Truman & Bradford (1993) obtiveram resultados semelhantes. Os autores estudaram solos de diferentes texturas e observaram que o selamento superficial causou suficiente escoamento para transportar o solo desagregado, mas, ao mesmo tempo, protegeu a superfície do solo limitando a quantidade de solo desagregado.

Na Figura 3.6, observa-se que a perda acumulada de solo por erosão em entressulcos em 180 minutos de chuva foi maior no solo LVd do que no solo LVaf, tanto com a presença de crosta superficial quanto sem a presença desta. Verifica-se também que no solo LVaf a formação de crosta superficial proporcionou uma perda de solo significativamente maior que antes da formação de crosta.

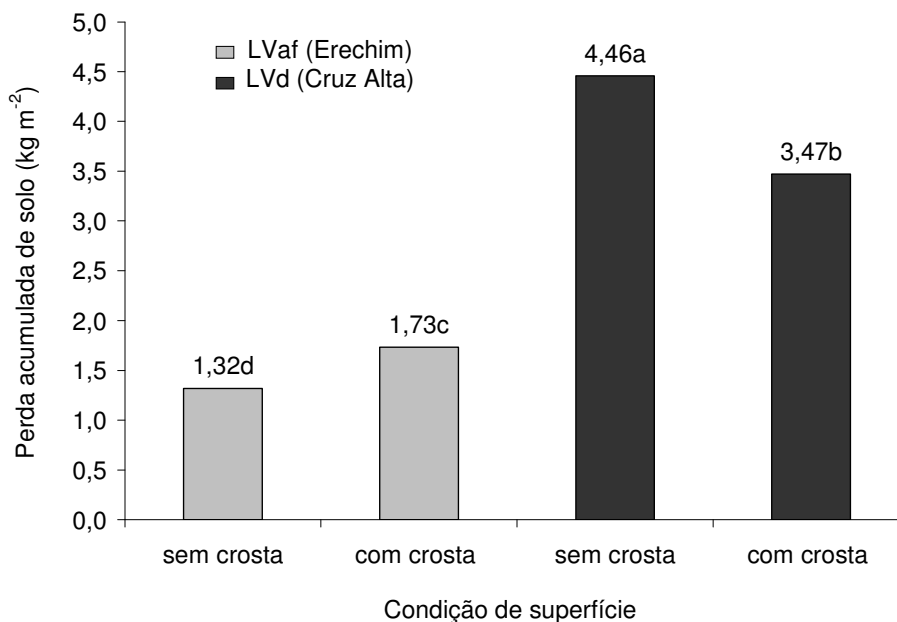


Figura 3.6. Perdas acumuladas de solo em entressulcos, sob condições naturais e inicialmente seco ao ar. Valores obtidos sob 9% de declive e chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1}), durante 180 minutos. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

No solo LVd, a perda de solo acumulada foi significativamente maior no primeiro evento de chuva do que no segundo evento (com crosta superficial). Este comportamento foi semelhante ao descrito anteriormente para a taxa de desagregação em entressulcos. Essas diferenças de comportamento devem-se, provavelmente, às diferentes características e propriedades dos solos estudados.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que, apesar dos dois solos estudados pertencerem à classe dos Latossolos Vermelhos, os mesmos apresentam comportamentos distintos frente às variações de umidade, aos efeitos de secagem e umedecimento e à formação de selo e presença de

crosta superficial. O comportamento da superfície do solo pode ser muito variável para um mesmo solo e para o um mesmo evento de precipitação (Le Bissonais et al., 1989). Isso mostra a necessidade de se considerar o efeito da umidade do solo antes de um evento pluvial em estudos de laboratório, bem como de avaliar o comportamento de cada solo em relação à suscetibilidade de formação de crosta superficial.

A condição inicial de solo seco ao ar não teve influência em solos de elevada estabilidade de agregados em água, mas proporcionou maiores perdas em entressulcos em solos mais arenosos e de baixa estabilidade de agregados. Dessa forma, a condição inicial de solo seco ao ar deve ser considerada em estudos onde haja a necessidade de determinação da taxa máxima de perda de solo nas áreas em entressulcos.

3.4. CONCLUSÕES

- O solo LVd (Cruz Alta), com conteúdo relativamente baixo de argila, de matéria orgânica e de óxidos de ferro e baixa estabilidade de agregados em água, teve maior taxa de desagregação e perda de solo em entressulcos do que o solo LVaf (Erechim), que apresenta elevado teor de argila, matéria orgânica e óxidos de ferro e com alta estabilidade de agregados em água, independente da condição inicial umidade e do efeito de encrostamento superficial;

- No solo LVaf (Erechim), com alto teor de argila e elevada estabilidade de agregados em água, a variação no teor de umidade inicial e a presença de crosta superficial não causaram diferença significativa na taxa de desagregação em entressulcos do solo;

- No solo LVd (Cruz Alta), sem presença de crosta superficial, a condição inicial de solo seco ao ar proporcionou uma maior suscetibilidade à erosão em entressulcos do que a condição de solo inicialmente úmido, devido a uma possível quebra dos agregados menos estáveis pelo rápido umedecimento da superfície do solo;

- O efeito da variação na umidade inicial do solo e da secagem e umedecimento da superfície, na taxa de desagregação e na erosão hídrica do solo nas áreas em entressulcos, foi mais pronunciado no solo de textura mais arenosa e de baixa estabilidade de agregados em água.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGASSI, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.45, p.848-851, 1981.
- ALBERTS, E.E.; NEARING, M.A.; WELTZ, M.A.; RISSE, L.M.; PIERSON, F.B.; ZHANG, J.M.; LAFLEN, J.M.; SIMANTON, J.R. Soil component. In: FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. (Eds.) **Water Erosion Prediction Project** - WEPP. West Lafayette: USDA, 1995. p.1-47, (Report, 10).
- AZEVEDO, A.C.; BONUMÁ, A.S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ci. Rural**, Santa Maria, RS, v.34, n.2, p.609-617, 2004.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Physical and mineralogical methods. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, 1986. p.363-382.
- BRADFORD, J.M.; FERRIS, J.E.; REMLEY, P.A. Interrill soil erosion processes: I Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.51, p.1566-1571, 1987.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 12.ed. New Jersey, USA: Prentice Hall do Brasil, 1999. 881p.
- BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um podzólico vermelho-escuro franco-arenoso. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.20, p.127-134, 1996.
- BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife : Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30).
- CANTALICE, J.R.B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2001. 140f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

- CERNUDA, C.F.; SMITH, R.M.; VICENTE-CHANDLER, J. Influence of initial soil moisture condition on resistance of macroaggregates to slaking and to water-drop impact. **Soil Sci.**, Baltimore, EUA, v.77, p.19-27, 1953.
- ELLIOT, W.J.; LIEBENOW, A.M.; LAFLEN, J.M.; KHOL, K.D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987, 1988**. West Lafayette: USDA-ARS, 1989. (Report. 3).
- ELLISON, W.D. Soil erosion studies. P.I . **Agric. Eng.**, St. Joseph, v.28, p.145-146, 1947.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF, 1999. 412p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ, 1997. 212p.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro, RJ, 1979. 215p.
- FARENHORST, A.; BRYAN, R.B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. **Catena**, Amsterdam, v.25. p.47-62, 1995.
- FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. **Water erosion prediction project: Technical Documentation**. West Lafayette: USDA-ARS-NSERL, 1995. (NSERL Report, 10).
- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process: Hydrologic modeling of small watersheds. In: HANN, C.T. (Ed.) St. Joseph: ASAE, 1982. p.297-380. (Monogr. 5).
- FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: PROCEEDING SEDIMENT-YIELD WORKSHOP, 1972, Oxford. **Proceedings...** Washington: USDA, 1975. p.190-207.
- FOX, D.M.; BRYAN, R.B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. **Catena**, Amsterdam, v.38, p.211-222, 1999.
- HUANG, Chi-hua; BRADFORD, J.M. Analyses of slope and runoff factors based on the WEPP erosion model. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.57, n.5, p.1176-1183, 1993.
- HUANG, Chi-hua; BRADFORD, J.M.; LAFLEN, J.M. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.60, p.734-739, 1996.
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L. (Eds.). **Methods of soil analysis**. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, 1965. p.499-510. (Agronomy Monogr., 9).

- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. 2.ed. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America: 1986. p.425-441.
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C.; DEXTER, A.R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.51, p.860-867, 1987.
- KUHN, N.J.; BRYAN, R.B. Drying, soil surface condition and interrill erosion on two Ontario soils. **Catena**, Amsterdam, v. 57, p. 113-133, 2004.
- LE BISSONNAIS, Y.; ARROUAYS, D. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. **European J. Soil Sci.**, Orléans, France, v.48, p.39-48, 1997.
- LE BISSONNAIS, Y.; SINGER, M.J. Crusting, runoff, and erosion response to soil water content and successive rainfalls. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.56, p.1898-1903, 1992.
- LE BISSONNAIS, Y.; SINGER, M.J. Seal formation, runoff, and interrill erosion from seventeen California soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.57, p.224-229, 1993.
- LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. **European J. Soil Sci.**, Orléans, France, v.47, p.425-437, 1996.
- LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A.; ORLÉANS, J. Laboratory experimental study of soil crusting: Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. **Catena**, Amsterdam, v.16, p.377-392, 1989.
- LE BISSONNAIS, Y.; RENAUX, B.; DELOUCHE, H. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. **Catena**, Amsterdam, v.25, p.33-46, 1995.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE CLAYS & CLAY MINERALS, [1960, Ottawa]. **Proceedings...** Ottawa, 1960. p.317-327.
- MEKARU, T.; UEHARA, G. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, Wisconsin, USA, v.36, p.296-300, 1972.
- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, p.100-103, 1979.

- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.48, p.1152-1157, 1984.
- MEYER, L.D.; MONKE, E.J. Mechanics of erosion bay rainfall and overland flow. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.8, p.572-577, 1965.
- MOORE, D.C.; SINGER, M.J. Crust formation effects on soil erosion processes, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.54, p.1117-1123, 1990.
- REICHERT, J.M.; NORTON, L.D. Aggregate stability and rain-impacted sheet erosion of air-dried and prewetted clayey surface soils under intense rain. **Soil Sci.**, Baltimore, EUA, v.158, p.159-169, 1994.
- REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Campinas, SP, v.16, p.289-298, 1992.
- SAS Institute. **Statistical Analytical Systems: SAS for Windows Procedures Guide: Version 9.1.** Cary, USA, 2002-2003.
- SCHWERTMANN, U. **Differenzierung der eisen oxide des bodens durch extraktion unit saurer ammoniumoxalat-losung.** Z. Pflanzenernaehr: Bodenkd, 1964. p.194-202.
- SHIMADZU. **Total Organic Carbon Analyzer (TOC-V CSH).** Manual do Usuário. Tóquio, 2001. 144p.
- SOUZA, M.D. de. **Infiltração de água em Latossolo roxo distrófico submetido a diferentes manejos.** 1985. 131f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1985.
- STATISTICAL Package For The Social Sciences. SPSS for Windows, copy right, Version 8.0. Cary, USA, 1979-1997.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Stabilization of soil aggregate by the root systems of ryegrass. **Australian J. Soil Res.**, Melbourne, v.17, n.3, p.429-441, 1979.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water stable aggregates in soils. **J. Soil Sci.**, Madison, Wisconsin, USA, v.33, p.141-163, 1982.
- TRUMAN, C.C.; BRADFORD, J.M. Relationships between rainfall intensity and the interrill soil loss-slope steepness ratio as affected by antecedent water content. **Soil Sci.**, Baltimore, EUA, v.156, p.405-413, 1993.
- TRUMAN, C.C.; BRADFORD, J.M.; FERRIS, J.E. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.54, p.1385-1392, 1990.

VEIGA, M. da; CABEDA, M.S.V.; REICHERT, J.M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Campinas, SP, v.17, n.1, p.289-298, 1993.

WATSON, D.A.; LAFLEN, J.M. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.1, p.98-102, 1986.

CAPÍTULO IV

EROSÃO HÍDRICA EM ENTRESSULCOS E DECLIVIDADE DO SOLO

Autor: Maria Cândida Moitinho Nunes

Orientador: Prof. Elemar Antonino Cassol

RESUMO

A relação entre a declividade e a perda de solo nas áreas em entressulcos é freqüentemente caracterizada como uma função única e independente das propriedades do solo. O fator declive adotado atualmente pelo modelo WEPP foi desenvolvido com base em solos de regiões de clima temperado, sujeitos a taxas de intemperismo menores do que as dos Latossolos existentes no Brasil e, particularmente, no Rio Grande do Sul, podendo, por isso, não ser adequado para caracterizar o efeito do declive no processo de erosão hídrica em entressulcos em Latossolo muito argiloso, quando submetido a elevadas declividades. Este estudo foi realizado com o objetivo de ajustar um fator de declive na erosão em entressulcos de um Latossolo altamente argiloso do Rio Grande do Sul, submetido a altas declividades, comparando-o com o fator de declive utilizado pelo modelo WEPP. A erosão hídrica do solo em entressulcos foi determinada em laboratório, sob chuva simulada com intensidade média de 88 mm h^{-1} , durante 120 minutos, em solo pré-umedecido e descoberto, simulando as condições de solo e de superfície proporcionadas pelo preparo convencional. Foram utilizadas parcelas experimentais com área útil de $0,36 \text{ m}^2$, mantidas nas declividades de 0,09; 0,18; 0,36 e $0,45 \text{ m m}^{-1}$. O aumento na declividade do solo resultou em uma maior taxa de aporte de solo em entressulcos. Quanto maior a declividade da superfície do solo menor foi o tempo necessário para que fosse atingida a taxa máxima de perda de solo em entressulcos. O fator declive obtido ($S_{f_0} = 0,279 + 1,020 (\text{sen}\theta)$), para um solo muito argiloso e de alta estabilidade de agregados em água, apresentou comportamento linear em relação à variação na declividade do solo ($r = 0,96^{**}$), considerando a faixa entre 9% e 45% de declividade. O fator de declive utilizado no modelo WEPP, apresenta um comportamento logaritmo no geral, tendendo a um comportamento linear para declividades maiores que $0,09 \text{ m m}^{-1}$.

CHAPTER IV

SLOPE FACTOR AND INTERRILL SOIL EROSION RELATIONSHIP

Author: Maria Cândida Moitinho Nunes
Adviser: Prof. Elemar Antonino Cassol

ABSTRACT

The relationship among interrill soil erosion rates and slope steepness frequently is characterized as being independent of soil type. However, this relationship was not tested on soils highly developed like the oxisols. The slope factor used by the WEPP model was developed with basis on soils from temperate climate and may not be the most adequate to express the effects of slope on interrill soil erosion rates when working with oxisols with high clay content, like the ones that occurs in Brazil, especially at Rio Grande do Sul and when they are exposed to high slope conditions. A study was conducted at laboratory with the objective to fit a slope factor to interrill soil erosion rates of an Oxisol with high clay content at great slopes and compare such a factor with the slope factor being used at WEPP model. Interrill soil erosion rates were determined at laboratory by applying simulated rainfall at 88 mm h^{-1} intensity during 120 minutes on an experimental plot of 0.36 m^2 and at bare soil conditions with pre-wetting soil under water tension of -6 kPa . The experiment was run at four slope conditions: 0.09 m m^{-1} ; 0.18 m m^{-1} ; 0.36 m m^{-1} ; and 0.45 m m^{-1} . As the slope increases also increases the interrill erosion rates. As the slope increases the time to reach the maximum soil detachment rates decreases. A slope factor $S_{f_0} = 0.279 + 1.020 (\text{sen}\theta)$ was obtained for the high clay oxisol which was highly significant ($r = 0.96^{**}$). This factor expressed a linear relationship that is not quite different to the WEPP slope factor when considered higher slope as 0.09 m m^{-1} .

CAPÍTULO IV - EROÇÃO HÍDRICA EM ENTRESSULCOS E DECLIVIDADE DO SOLO

4.1. INTRODUÇÃO

As perdas por erosão hídrica em entressulcos de um determinado solo são altamente dependentes do grau de declividade do terreno. Vários estudos têm demonstrado que o grau de declive afeta a perda de solo nas áreas em entressulcos (Lattanzi et al., 1974; Truman & Bradford, 1993; Kinnell & Cummings, 1993; Zhang et al., 1998; Fox & Bryan, 1999).

O efeito do gradiente de declive na perda de solo tem sido considerado como uma função independente das características e propriedades do solo. O uso de uma única equação para descrever o efeito do gradiente de declive pode não ser satisfatório para representar o processo de erosão hídrica do solo em entressulcos (Bradford & Foster, 1996).

Para um dado solo, sujeito a uma mesma intensidade de chuva, sem efeito de cobertura, de raízes ou de selo e crosta superficiais, a erosão em entressulcos poderá variar com a declividade da superfície do solo (Flanagan et al., 1995) a qual influencia na capacidade de transporte do escoamento superficial.

Nas áreas em entressulcos, a condição “transporte limitado” (Foster, 1982), isto é, capacidade de transporte menor que a quantidade de solo desagregado produzido, tende a dominar para baixos declives e baixas taxas de escoamento superficial. A condição “desagregação limitada”, ou seja, capacidade de transporte maior do que a quantidade de solo desagregado produzido tende a dominar para grandes declives e elevadas taxas de escoamento (Truman & Bradford, 1995).

O fator declividade em entressulcos, atualmente adotado pelo modelo WEPP, resulta da análise dos dados de Lattanzi et al. (1974), Meyer & Harmon (1979), Watson & Laflen (1986) e Elliot et al. (1989) e é obtido pela seguinte expressão (Liebenow et al., 1990):

$$S_f = 1,05 - 0,85 e^{-4 \text{ sen}\theta} \quad (4.1)$$

onde S_f é o fator declividade do solo (adimensional) e θ é o ângulo do declive (graus).

Segundo Liebenow et al. (1990), o fator declive pode variar em função das propriedades do solo. A função empírica desenvolvida pelos autores pode não ser adequada para ajustar os efeitos da variação no grau de declive na erosão em entressulcos em solos desenvolvidos sob elevadas taxas de intemperização, como os Latossolos.

Segundo Kinnell & Cummings (1993), o efeito do gradiente de declive na erosão em entressulcos não ocorre como uma relação comum para todos os solos, pois diferentes solos respondem à aplicação da tensão erosiva de maneiras distintas. No trabalho de Truman & Bradford (1993), o fator de ajuste da declividade (S_f) foi função, principalmente, do tipo de solo e do conteúdo antecedente de umidade. Os autores enfatizam que um apropriado fator declive, para um determinado solo, deve resultar em igual fator de erodibilidade em entressulcos para uma variação no grau de declive.

O efeito do gradiente de declive na perda de solo decorre da sua influência na altura de lâmina do escoamento e no transporte de sedimentos pela chuva impactada pelo escoamento superficial. Esse efeito sugere que a taxa de desagregação do solo pode ser adequadamente determinada quando se considera, além da intensidade da chuva, a descarga do escoamento superficial (Kinnell, 1991).

O fator declividade varia conforme o tipo de solo, conteúdo antecedente de umidade e processo de erosão em entressulcos (Truman & Bradford, 1993). A avaliação do uso do fator declive adotado no modelo WEPP e a determinação de um fator que seja adequado para solos característicos do Rio Grande do Sul e do Brasil, como os Latossolos, pode proporcionar um melhor ajuste do efeito da declividade na perda de solo, gerando uma determinação mais adequada para o fator de erodibilidade do solo em entressulcos. Os Latossolos de textura argilosa existentes no Brasil e no Rio

Grande do Sul foram originados sob taxas de intemperismo maiores do que as dos solos para os quais foi desenvolvida a função declividade de Liebenow et al. (1990).

Atualmente, não têm sido realizados estudos para identificar qual o fator declive que melhor representa o processo de erosão em entressulcos para diferentes declives, em solos típicos de clima tropical e subtropical, como os Latossolos. A classe dos Latossolos compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, exceto horizonte hístico. São solos em avançado estágio de intemperização (Embrapa, 1999). Os Latossolos geralmente possuem elevadas quantidades de óxidos (Kämpf & Curi, 2003), com fertilidade química geralmente baixa, porém com propriedades físicas muito favoráveis à produção agrícola (Azevedo & Bonumá, 2004).

Neste trabalho, foi estabelecida a hipótese de que a função adotada no modelo WEPP, para ajustar a erodibilidade básica em entressulcos em diferentes declives, não é adequada para Latossolos sujeitos a elevados graus de declive.

O objetivo deste trabalho foi comparar o uso do fator declive sugerido pelo modelo WEPP, para ajustar a erodibilidade básica em entressulcos, com um fator declive obtido para um Latossolo de textura muito argilosa (LVaf - Erechim) do Rio Grande do Sul.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Local

O trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Erosão, Física e Química do Solo do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre-RS, Brasil, no período de 2003 a 2005.

4.2.2. Características do solo e local de coleta

Para a realização deste estudo foi utilizado um Latossolo do Estado do Rio Grande do Sul, pertencente à unidade de mapeamento Erechim (Brasil, 1973). Este solo é classificado como Latossolo Vermelho aluminoférrico típico textura muito argilosa - LVaf (Embrapa, 1999). A coleta do solo foi realizada no município de Erechim-RS, em área de mata nativa, no Campus da URI (Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões), na estrada para Gaurama-RS, km 5 da RS 211.

4.2.3. Coleta e preparo das amostras de solo

A coleta dos solos foi realizada na camada de 0 a 20 cm, por meio de uma pá-de-corte, após a remoção da vegetação e de 1 a 2 cm da superfície do solo. Feito isso, o solo foi acondicionado em recipientes plásticos (bombonas) e transportado para o Laboratório de Erosão do Solo do Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

No local de coleta dos solos, foram retiradas amostras com estrutura preservada por meio de anéis cilíndricos de volume conhecido, para a

determinação da curva de retenção de água no solo. As demais determinações físicas e as determinações químicas foram realizadas em sub-amostras do material coletado a campo, com estrutura alterada, e transportado para o laboratório.

Para as determinações físicas (densidade das partículas e distribuição de diâmetro das partículas) e químicas (acidez ativa, carbono orgânico e teor de óxidos de ferro pedogênicos), as amostras de solo foram secas ao ar, moídas com rolo de madeira e passadas em peneira com abertura de malha de 2 mm, para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA), conforme Embrapa (1997).

Para a caracterização física dos solos as determinações foram efetuadas em três repetições cada. Para as determinações químicas foram utilizadas duas repetições.

4.2.4. Caracterização do solo

O solo utilizado neste trabalho encontrava-se em uso natural no momento da coleta, sem ter tido qualquer uso antrópico.

O solo foi fisicamente caracterizado pelas determinações de curva de retenção de água no solo (método do funil de placas porosas e das câmaras de pressão de Richards), densidade de partículas (Blake & Hartge, 1986), distribuição de diâmetro das partículas do solo (Método da pipeta - Embrapa, 1997) e estabilidade dos agregados em água (Kemper & Rosenau, 1986).

O solo foi quimicamente caracterizado pela determinação da acidez ativa do solo (Mekaru & Uehara, 1972; Embrapa, 1979), do teor de carbono orgânico por combustão seca (Shimadzu, 2001) e do teor de óxidos de ferro pedogênicos, pela extração com oxalato de amônio ácido no escuro (Fe_o) (Schwertmann, 1964) e pela extração com ditionito-citrato-bicarbonato/DCB (Fe_d) (Mehra & Jackson, 1960).

Algumas das características do solo LVaf (Unidade de Mapeamento Erechim) são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Caracterização física e química do Latossolo Vermelho aluminoférrico típico - LVaf (Erechim), sob condições naturais.

Arg _{H2O}	Argila	Silte	Areia	Dp	Água a -6 kPa	IEA
g kg ⁻¹				Mg m ⁻³	m ³ m ⁻³	
240,6	760,7	209,6	29,7	2,62	0,42	0,97
pH _(H2O)	pH _(KCl)	ΔpH	CO	Fe _o	Fe _d	
			g kg ⁻¹			
4,08	3,68	-0,40	29,90	2,40	95,18	

Arg_{H2O} = argila dispersa em água; Dp = densidade de partículas; IEA = índice de estabilidade de agregados (Kemper & Rosenau, 1986); CO = carbono orgânico; Fe_o = ferro extraído com oxalato amônio ácido e Fe_d = ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato.

4.2.5. Erosão hídrica do solo em entressulcos sob chuva simulada em laboratório

4.2.5.1. Preparo do solo para uso nas parcelas experimentais

As amostras de solo coletadas foram destorroadas manualmente, com o cuidado de separar os agregados nos planos de fraqueza natural, e passadas em peneira com abertura de malha de 10 mm.

Depois de destorroadas, as amostras foram espalhadas em bandejas para secar ao ar e à sombra. Nessas condições, o solo foi colocado na parcela experimental, em laboratório, para aplicação da chuva simulada. Foram realizadas três repetições para cada série de chuva simulada.

4.2.5.2. Parcelas experimentais

A erosão hídrica dos solos em entressulcos foi determinada em laboratório, sob chuva simulada, em solo descoberto, simulando as condições de solo e de superfície proporcionadas pelo preparo convencional.

Foram utilizadas parcelas experimentais de formato quadrado com 0,6 m de lado e 0,1 m de profundidade, totalizando uma área útil de teste de

0,36 m², com bordadura de 0,2 m. A bordadura teve por objetivo compensar as perdas líquidas de solo por salpico do interior da área de teste.

Neste estudo, durante a aplicação da chuva simulada, as parcelas foram mantidas em uma declividade de 0,09 m m⁻¹.

O volume das parcelas foi preenchido por duas camadas de solo, sendo a mais profunda com de 3 cm de espessura de solo, acondicionado com densidade de empacotamento (D_e) de 1,5 Mg m⁻³. Sobre essa camada foi colocado um tecido de algodão cru, sobre o qual foi colocada uma camada de 7 cm de solo seco ao ar, previamente tamisado em peneira com malha de 10 mm de diâmetro, conforme descrito no item 4.2.5.1. Esta camada de solo foi acondicionada na parcela de forma a obter-se uma densidade de empacotamento de 1 Mg m⁻³, com mínima segregação dos agregados e rugosidade superficial homogênea.

A parcela experimental foi constituída de material acrílico e montada sobre uma estrutura metálica, semelhante a utilizada por Cantalice (2001). O fundo da parcela apresentava 6 furos, conectados a mangueiras de 6 mm de diâmetro cada. Estas mangueiras ficavam conectadas também a um reservatório de água, externo à área da parcela. Este sistema serviu para o umedecimento do solo por capilaridade antes da aplicação da chuva, para obter a mesma tensão de água no início da chuva e para a drenagem da água do solo, durante a aplicação da chuva simulada.

4.2.5.3. Condição de umidade antecedente à chuva

Para proporcionar a condição de solo pré-umedecido, o solo da parcela foi saturado por capilaridade durante uma noite, semelhante ao método descrito por Moore & Singer (1990). Após, o solo foi mantido a uma tensão de 60 cm de coluna de água (-6 kPa) por um período de 2 horas. Feito isto, foi aplicada a chuva simulada, mantendo-se a condição de drenagem com potencial mátrico de -6 kPa. Segundo Levy et al. (1994) não existe diferença no efeito do método de umedecimento, se realizado de baixo para cima, por capilaridade, ou por cima, pela simulação de chuva de baixa intensidade, na formação de selo, no escoamento superficial e na erosão hídrica do solo.

4.2.5.4. Aplicação de chuva simulada

As chuvas foram aplicadas em laboratório, por meio do uso de um simulador de chuvas, conforme o princípio descrito por Meyer & Harmon (1979). Foi utilizado um simulador composto de um bico aspersor com 12,7 mm de diâmetro interno (Veejet 80-150 / Spraying Systems Company, Chicago, USA). Este simulador, descrito por Souza (1985), fica a 3,05 m da superfície do solo, com pressão constante de saída de água no bico de 41 kPa (6 lb pol⁻²). A energia cinética do impacto das gotas nessa pressão, independente da intensidade aplicada, é de, aproximadamente, 275 kJ ha⁻¹ mm⁻¹. Conforme Meyer & Harmon (1979), esta energia é equivalente ao impacto de uma chuva natural com intensidade igual a 80 mm h⁻¹, com distribuição de gotas com 2,3 mm de diâmetro e velocidade terminal de 8,8 m s⁻¹.

As intensidades das chuvas aplicadas foram determinadas por meio de um conjunto de 10 pluviômetros, colocados ao lado da área útil das parcelas experimentais.

Para todos os solos e em todos os testes, foram aplicadas chuvas simuladas, com três repetições cada, com intensidade média de 88 mm h⁻¹, durante 120 minutos. A intensidade da chuva simulada aplicada variou de 85,1 a 91,5 mm h⁻¹ (Apêndice 6), com um desvio padrão de 1,65 mm h⁻¹ e média de 88 mm h⁻¹. Salienta-se a importância do tempo de aplicação de chuva, pois um intervalo de tempo pequeno pode não ser suficiente para que o solo atinja a sua taxa máxima de desagregação.

4.2.5.5. Determinação da taxa de desagregação do solo

O escoamento superficial foi amostrado em potes plásticos de 920 mL, colocados na extremidade inferior da calha coletora. As amostras foram coletadas durante 60 segundos, com intervalos de 2 minutos entre as coletas.

As amostras de solo e água coletadas em potes plásticos foram pesadas e após, foi adicionado 5 mL de solução concentrada de sulfato duplo de Alumínio e Potássio (K Al(SO₄)₂.12 H₂O - Alúmen de Potássio a 5%), para a decantação das partículas. Após 24 horas o sobrenadante foi succionado e os potes foram levados para estufa a 50°C, até atingir peso constante, sendo, posteriormente, pesados com e sem o solo seco.

A taxa de desagregação do solo em entressulcos, D_i ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), foi considerada como igual à taxa de aporte de sedimentos, ou seja, à perda de solo em entressulcos, e determinada para cada intervalo de amostragem por meio da divisão da massa de solo coletado em cada intervalo de coleta pela área da parcela ($0,36 \text{ m}^2$) e pelo período de cada coleta (60 s).

Após a plotagem dos valores de taxa de desagregação para cada intervalo de coleta, foi ajustada uma equação para expressar o comportamento da taxa de desagregação ao longo do tempo de chuva. Quando a curva apresentou um ponto de máxima, este valor foi utilizado como a taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos. Quando não houve um ponto de máxima ou quando a taxa de desagregação era crescente até o final da chuva, foi utilizada a média dos últimos cinco valores de taxa de desagregação, conforme proposto por Elliot et al. (1989) e adotado pelo modelo WEPP.

Considerando que o solo utilizado neste trabalho não apresenta efeito de cobertura, de raízes, de selo e de crosta superficiais e que esse solo foi submetido a uma chuva simulada com intensidade constante, a taxa de aporte, ou seja, de perda de solo, irá depender da taxa de desagregação em entressulcos e da declividade a que o solo estiver sujeito. Essa relação pode ser expressa da seguinte forma (Foster et al., 1995):

$$D_i = D_i S_f \quad (4.2)$$

onde D_i é a taxa de aporte de solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); D_i é a taxa de desagregação do solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

O fator declividade em entressulcos, conforme Liebenow et al. (1990) foi determinado pela equação (4.1), em que $S_f = 1,05 - 0,85 e^{-4 \text{ sen}\theta}$. O resultado dessa equação será igual a "1" quando o ângulo de declive for de 45° , ou seja, na condição de declividade padrão (1 m m^{-1}) adotada pelo modelo WEPP.

Considerando que, conforme Alberts et al. (1995):

$$D_i = K_i I q_i \quad (4.3)$$

onde D_i é a taxa de desagregação do solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_i é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}) e q_i é a taxa de excesso de chuva ou descarga unitária do

escoamento superficial (m s^{-1}); tem-se que a equação (4.2) também pode ser apresentada da seguinte forma:

$$D_i = K_i I q_i S_f \quad (4.4)$$

onde D_i é a taxa de aporte de solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e S_f é o fator declividade do solo (adimensional).

4.2.5.6. Determinação do fator declive

As taxas de aporte de sedimentos em entressulcos foram determinadas nas declividades de 0,09; 0,18; 0,36 e 0,45 m m^{-1} .

Para a comparação entre o fator S_f obtido e o sugerido pelo WEPP, este último foi recalculado, com base nos dados originais de Lattanzi et al. (1974), Watson & Laflen (1986), Elliot et al. (1989) e Meyer & Harmon (1979), para representar apenas declividades iguais e maiores que 0,09 m m^{-1} .

O fator declive foi obtido pela relação entre a taxa de aporte de solo em entressulcos e a variação no grau de declive, sob chuva de intensidade constante e escoamento observado, considerando que o solo tem já o fator de erodibilidade em entressulcos determinado e conhecido. Após, a relação obtida foi transformada para satisfazer o pressuposto estabelecido pelo WEPP em que para 45° o fator declive deve ser igual a "1". A equação obtida representa o fator declive (S_f) para um Latossolo Vermelho de textura muito argilosa.

Os valores de S_f para cada declive, pela seguinte expressão:

$$S_f = \frac{D_i}{I q_i K_i} \quad (4.5)$$

onde S_f é o fator declividade do solo (adimensional); D_i é a taxa de aporte de solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}); q_i é a taxa de excesso de chuva ou descarga unitária do escoamento superficial (m s^{-1}) e K_i é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}).

Os valores de D_i , I e q_i foram obtidos experimentalmente. Utilizou-se $K_i = 0,75 \times 10^6$ (kg s m^{-4}), pois, para o solo LVaf (Erechim) usado, o valor desse fator já havia sido obtido no Capítulo II. Considerou-se que sendo reflexo das características intrínsecas do solo, o valor do fator de erodibilidade do solo em entressulcos não apresenta variação.

4.2.6. Análise estatística dos dados

A análise estatística foi realizada utilizando-se os programas estatísticos SAS - Statistical Analytical Systems/versão 9.1 (SAS, 2003) e SPSS - Statistical Package For The Social Sciences/ versão 8.0 (SPSS, 1997).

Foram utilizadas análises de variância (ANOVA) (Apêndices1 - 4), comparações múltiplas de médias e análise de medidas repetidas, com ajuste pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4.1 mostra o comportamento das taxas de aporte de solo em entressulcos do LVaf (Erechim) ao longo de 120 minutos de chuva simulada. Observa-se que a taxa de aporte de solo, até aproximadamente 50 minutos de chuva, foi maior para a declividade de 18% do que para a declividade de 9%. A partir deste período, entretanto, observa-se que ocorreu uma tendência de estabilização nas taxas de perda de solo, tanto para a declividade de 9% quanto para 18%.

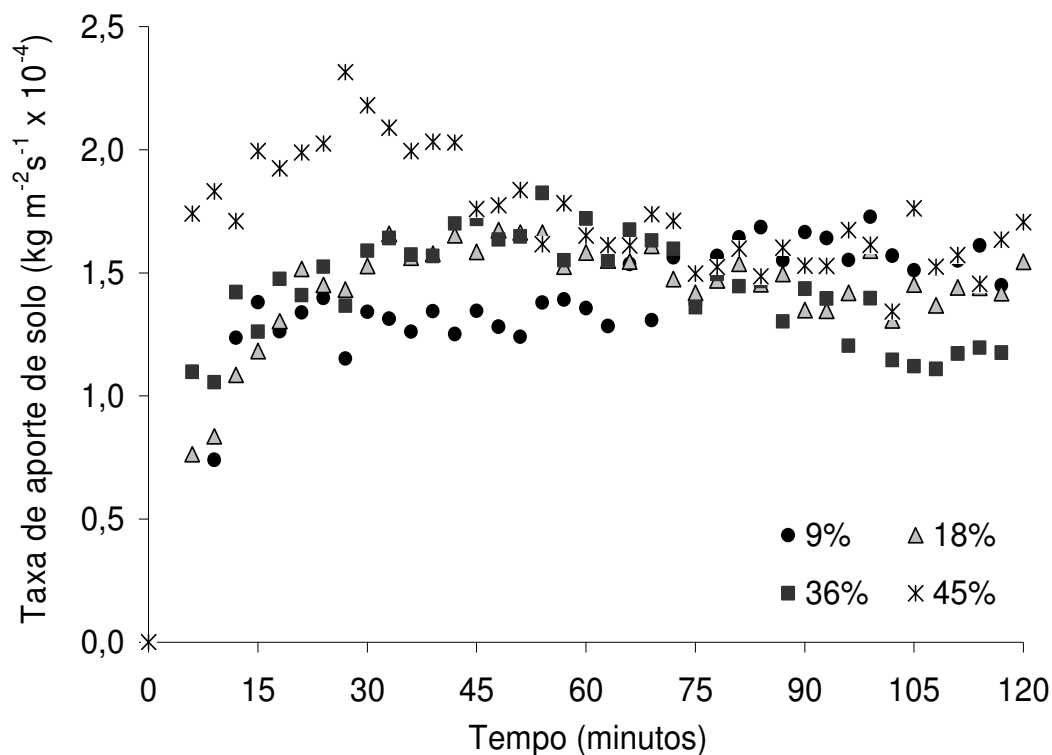


Figura 4.1. Taxas de aporte de solo em entressulcos nas declividades de 9, 18, 36 e 45%, obtidas sob chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).

Para a declividade de 36%, existiu uma taxa de perda de solo crescente até aproximadamente 50 minutos, após, ocorreu uma redução nessa taxa. Para a declividade de 45% o processo foi semelhante, mas o pico de taxa de perda ocorre antes de 30 minutos de chuva simulada. Após, ocorreu uma redução na taxa de perda de solo. Essa redução, que ocorreu tanto para 36% quanto para 45% de declividade, pode ser devida ao fato da borda inferior da parcela permanecer fixa durante o todo o período. Assim, as elevadas taxas de erosão em entressulcos podem ter rebaixado o nível da superfície do solo ao nível da borda inferior da parcela, restringindo o aporte de sedimentos após um determinado tempo. Entretanto, esse comportamento crescente até um ponto de máxima e posteriormente decrescente, também foi observado no campo em Argissolo Vermelho cujo teor de argila era tão baixo quanto o do solo LVd (Braida & Cassol, 1996). Como foram usadas as taxas máximas de aporte de sedimentos, esse “efeito de borda” não é relevante.

Outra possibilidade para a redução na perda de solo nos declives de 36 e 45%, após um determinado tempo de chuva, pode ser devido a uma mudança de regime de “transporte limitado” para “desagregação limitada”. Em pequenos declives o aporte de sedimentos para os sulcos pode ser limitado pela capacidade de transporte. Em declives acentuados, entretanto, a perda de sedimentos é limitada pela desagregação, resultando em um menor incremento no aumento na perda de solo ou possivelmente uma redução na taxa de aporte de solo com o aumento do declive (Meyer et al., 1975; Foster, 1982).

De forma geral, observa-se que quanto maior a declividade da superfície do solo menor o tempo necessário para que seja atingida a taxa máxima de perda de solo em entressulcos (Figura 4.1).

Os dados de taxas de aporte de solo em entressulcos (D_i) e descarga unitária do escoamento superficial (q_i) são mostrados na Tabela 4.2. Os valores obtidos, para cada repetição das variáveis analisadas, encontram-se no Apêndice 12.

Na Tabela 4.2, observa-se que à medida que aumenta a declividade do solo houve um aumento na taxa de aporte de sedimentos, ou seja, na perda de solo em entressulcos. Isto deve ser devido ao fato de que o gradiente de declive influencia na perda de solo em entressulcos (Kinnell & Cummings, 1993). Lattanzi et al. (1974) explicam que esse efeito é atribuído,

principalmente, ao aumento no destacamento de solo pela maior facilidade do movimento descendente das partículas, devido ao efeito da gravidade com o aumento do gradiente de declive. Embora o gradiente de declive influencie na erosão em entressulcos, a perda de solo irá depender de uma interação entre o impacto das gotas e o escoamento superficial (Kinnell & Cummings, 1993).

Tabela 4.2. Fator declive (S_f), taxa de aporte de solo em entressulcos (D_i), taxa de desagregação do solo em entressulcos (D_i), descarga unitária do escoamento superficial (q_i) e fator declive observado (S_{fo}), calculado e ajustado para $S_f = 1$ ($\theta = 45^\circ$).

Declividade		S_f	D_i ($\times 10^4$)		q_i ($\times 10^5$)	S_{fo}	
m m^{-1}	graus		kg $m^{-2} s^{-1}$			calculado	ajustado
0,09	5,14	0,456	1,528	3,351	2,024	0,413	0,370
0,18	10,20	0,632	1,725	2,732	2,226	0,424	0,460
0,36	19,80	0,831	1,895	2,281	2,413	0,429	0,624
0,45	24,23	0,885	2,361	2,667	2,400	0,538	0,698

S_f = fator declive de Liebenow et al. (1990), adotado pelo modelo WEPP; Dados referentes ao solo LVaf (Erechim), cujo K_i é de $0,75 \times 10^6$ kg s m^{-4} , sob chuva simulada com intensidade média de $2,44 \times 10^{-5}$ m s $^{-1}$ (88 mm h $^{-1}$).

Em relação à taxa de desagregação do solo, observa-se que, de uma forma geral, o aumento na declividade do solo resultou em uma menor taxa de desagregação do solo, devido, possivelmente, ao maior ângulo de impacto da gota na superfície do solo.

A Figura 4.2 mostra a relação entre a taxa de aporte de solo nas áreas em entressulcos e a variação na declividade do solo.

Um fator declive adequado deve ajustar o efeito de variação da declividade na erosão em entressulcos, de forma que, para diferentes declives, a erodibilidade em entressulcos seja praticamente constante (Truman e Bradford, 1993).

Para um dado solo, considerando que não há variação na intensidade da chuva, nem efeito de cobertura, raízes, selo e crosta, a taxa de aporte de solo será função da taxa de escoamento superficial e da declividade da superfície do solo (equação 4.4). Para a obtenção da taxa de desagregação, para uma declividade diferente da adotada como padrão pelo WEPP, que é de 45° , deve ser realizado o ajuste da taxa de aporte de solo por meio de um fator

de declive, conforme a equação 4.2, em que $D_i = D_i S_f$. Na declividade de 45°, conforme padronizado pelo modelo WEPP, o fator declive é igual a “1”.

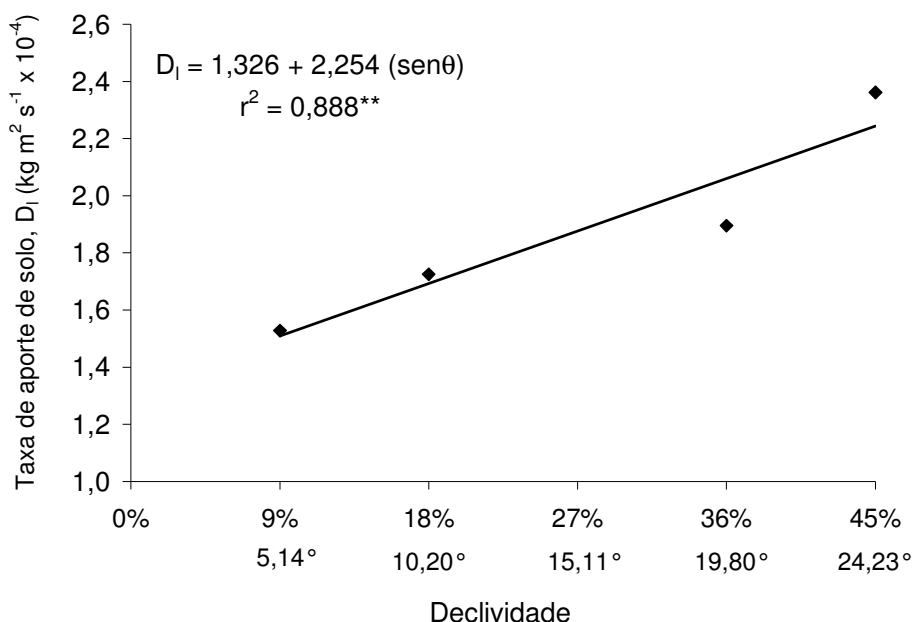


Figura 4.2. Relação entre as taxas de perda de solo em entressulcos e a variação na declividade. Valores obtidos com chuva simulada de intensidade média de $2,44 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ (88 mm h^{-1}).

A partir da correlação obtida entre a taxa de aporte de sedimento e a variação na declividade (Figura 4.2), ajustou-se a seguinte expressão:

$$D_i = [1,326 + 2,254 (\text{sen}\theta)] \times 10^{-4} \quad (4.6)$$

onde D_i é a taxa de aporte de solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e θ é o ângulo de declividade da superfície do solo (graus).

Utilizando-se os dados da Tabela 4.2 e com base na equação (4.5), obteve-se o fator declive (S_f) correspondente para cada declividade do solo. Os valores assim obtidos estão apresentados na Tabela 4.2.

Agrupando os dados utilizados por Liebenow et al. (1990), para declives iguais ou maiores que $0,09 \text{ m m}^{-1}$, com os obtidos neste estudo, para o solo LVaf (LVaf), obteve-se uma baixa correlação entre o grau de declividade e o fator declive (Figura 4.3).

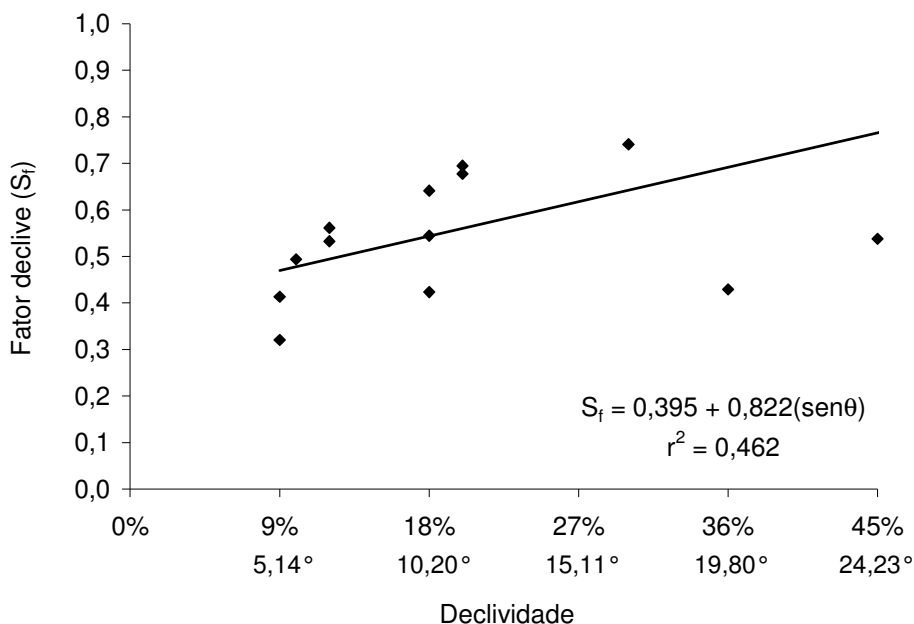


Figura 4.3. Relação entre a variação na declividade e o fator declive para os solos estudados por Liebenow et al. (1990), sob declives iguais e maiores que $0,09 \text{ m m}^{-1}$ e para o solo LVaf (Erechim).

A baixa correlação obtida quando se agrupam os dados de Liebenow et al. (1990), obtidos com base em solos de clima temperado, e os obtidos para o solo do presente estudo pode ser devido aos diferentes tipos de solos envolvidos. Os Latossolos, diferente dos solos de clima temperado, são formados sob elevadas taxas de intemperismo, o que lhes confere altos teores de óxidos e elevada estabilidade de agregados (Azevedo & Bonumá, 2004). Dessa forma, observa-se que a erosão em entressulcos não ocorre como uma relação comum para todos os solos, pois diferentes solos respondem de maneiras distintas ao processo erosivo (Kinnell & Cummings, 1993).

Analisando de forma separada os dados obtidos neste estudo e os de Liebenow et al. (1990) (Figura 4.4), observa-se que o comportamento entre o fator declive e a variação no grau de declividade para o solo LVaf foi diferente do comportamento dos dados de Liebenow et al. (1990), obtidos a partir dos dados de Lattanzi et al. (1974), Watson & Laflen (1986), Elliot et al. (1989) e Meyer & Harmon (1989), considerando apenas os declives maiores ou iguais a 9%. Esse comportamento ocorre, possivelmente, porque os solos utilizados como base para o desenvolvimento do fator declive no WEPP, foram formados a partir taxas de intemperismo diferentes das ocorridas com os Latossolos do Rio Grande do Sul e Brasil.

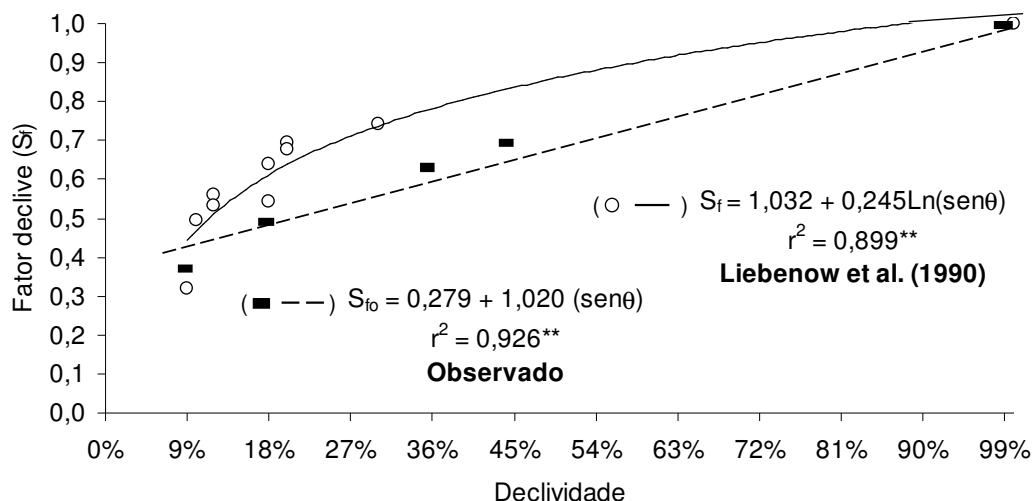


Figura 4.4. Correlação entre a variação na declividade e o fator declive para os solos estudados por Liebenow et al. (1990) (S_f), para declives iguais ou maiores que $0,09 \text{ m m}^{-1}$, e para o solo LVaf - Erechim (S_{fo}).

Observa-se que, de forma geral, que a proporção do aumento no fator S_f reduziu quando o gradiente de declive aumentou. Meyer et al. (1975) e Foster (1982) atribuem essa taxa decrescente com o gradiente como uma mudança da condição de “transporte limitado”, onde a capacidade de transporte é menor que a quantidade de solo desagregado produzido, para uma condição de “desagregação limitada”, onde a capacidade de transporte é maior do que a quantidade de solo desagregado produzido, quando o gradiente de declive aumenta.

A relação obtida entre a variação na declividade e o fator declive para o solo LVaf, ajustada para a condição de $S_f = 1,0$ quando o ângulo de inclinação do declive é de 45° , apresentou um comportamento linear, sendo representada da seguinte forma (Figura 4.4):

$$S_{fo} = 0,279 + 1,020 (\text{sen}\theta) \quad (4.7)$$

onde S_{fo} é o fator declividade do solo observado (adimensional) e θ é o ângulo de declividade da superfície do solo (graus).

Kinnell & Cummings (1993) também obtiveram correlações lineares entre a variação no fator de declive e a variação na declividade do solo. Os autores utilizaram declividades que variaram de 2 a 20% e observaram que em um solo argiloso (400 g kg^{-1} de argila) o comportamento foi linear, enquanto

que, em um solo franco argiloso (330 g kg^{-1} de argila), o comportamento foi não linear. Estes resultados indicam que uma relação comum para o efeito do grau de declive na erosão em entressulcos não ocorre para todos os solos, pois os solos respondem de formas diferentes a aplicação de estresse erosivo. Fox & Bryan (1999) também avaliaram a relação entre as taxas de perda de solo e a variação na declividade. Os autores utilizaram um solo franco argilo arenoso, em declives que variavam de 2,5 a 40% e também verificaram uma relação linear entre o fator declive e a variação na declividade do solo.

O uso de um fator de ajuste que não seja adequado ao solo em estudo pode incorrer em estimativas errôneas do fator de erodibilidade do solo em entressulcos. Bradford & Foster (1996) utilizaram a equação de Liebenow et al. (1990) para solos com teor de argila entre 70 e 510 g kg^{-1} e verificaram uma diferença significativa no fator de erodibilidade do solo em entressulcos entre as declividades de 9 e 20%, indicando um inadequado fator declive para estes solos.

No caso do solo LVaf, para que se tenha uma melhor idéia do comportamento do fator declive com a variação na declividade, seria necessária também a determinação das taxas de aporte de solo em entressulcos para declives menores que 9%, pois, segundo Kinnell & Cummings (1993), em baixos declives ocorrem diferenças mais significativas na relação entre declive e fator declive, principalmente para solos que têm grande estabilidade de agregados, como é o caso do solo LVaf.

Possivelmente, o efeito do declive na erosão hídrica do solo LVaf será mais pronunciado em declives menores que 9%, alterando a relação entre o fator declive e a variação na declividade.

É necessário que se identifique qual o fator declive que melhor representa o processo de erosão em entressulcos e, principalmente, que os dados determinados em laboratório sejam coerentes com dados originados em campo. Para um adequado ajuste do fator de erodibilidade do solo em entressulcos, é necessário que se use um fator declive compatível com o comportamento do solo frente às mudanças na variação do declive. Sugere-se a avaliação do comportamento deste solo em pequenos declives e de outros solos característicos de clima tropical e subtropical.

4.4. CONCLUSÕES

- Quanto maior a declividade da superfície do solo menor foi tempo necessário para que fosse atingida a taxa máxima de aporte de sedimentos por erosão nas áreas em entressulcos;

- Para um Latossolo muito argiloso e com alta estabilidade de agregados em água, o fator de ajuste do grau de declive, para declividades maiores que 9%, apresentou um comportamento linear;

- A relação entre a variação na declividade da superfície e o fator declive, para a base de solos utilizados do modelo WEPP e considerando apenas as declividades maiores que 9%, apresentou um comportamento logarítmico.

4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J.A; CASSOL, E.A.; REINERT, D.J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.24, p.141-151, 2000.
- AZEVEDO, A.C.; BONUMÁ, A.S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ci. Rural**, Santa Maria, RS, v.34, n.2, p.609-617, 2004.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H., Physical and mineralogical methods. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. p.363-382.
- BRADFORD, J.M.; FOSTER, G.R. Interrill soil and slope steepness. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.60, p.909-915, 1996.
- BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um podzólico vermelho-escuro franco-arenoso. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.20, p.127-134, 1996.
- BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife : Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30).
- CANTALICE, J.R.B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2001. 140f. Tese (Doutorado) –Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.
- ELLIOT, W.J.; LIEBENOW, A.M.; LAFLÉN, J.M.; KHOL, K.D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987, 1988**. West Lafayette: USDA-ARS. 1989. (Report, 3).
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF, 1999. 412p.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro, RJ, 1979. 215p.

- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ, 1997. 212p.
- FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH II, J.C.; NICKS, A.D.; NEARING, M.A.; LAFLEN, J.M. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. (Eds.) **Water erosion prediction project – WEPP: Technical Documentation**. West Lafayette: USDA-ARS-NSERL, 1995. (NSERL Report, 10).
- FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. **Water erosion prediction project: Technical Documentation**. West Lafayette: USDA-ARS-NSERL, 1995. (NSERL Report, 10).
- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HANN, C.T. (Ed.) **Hydrologic modeling of small watersheds**. St. Joseph: ASAE, 1982. p.297-380. (Monogr. 5).
- FOSTER, G.R.; FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. LANE, L.J.; RISSE, L.M.; FINKNER, S.C. Hillslope erosion component. In: FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. (Eds.). **Water erosion prediction project – WEPP: Technical Documentation**. West Lafayette: USDA-ARS-NSERL, 1995. (NSERL Report, 10).
- FOX, D.M.; BRYAN, R.B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. **Catena**, Amsterdam, v.38, p.211-222, 1999.
- KÄMPF, N.; CURTI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: TÓPICOS em Ciência do Solo. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2003. v.3, p.1-54.
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. 2.ed. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America: 1986. p.425-441.
- KINNELL, P.I.A.; CUMMINGS, D. Soil/Slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.36, p.381-387, 1993.
- KINNELL, P.I.A. The effects of flow on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.34, p.161-168, 1991.
- LATTANZI, A.R.; MEYER, L.D.; BAUMGARDNER, M.F. Influences of much rate and slope steepness on interrill erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.38, p.946-950, 1974.
- LEVY, G.J.; LEVIN, J.; SHAINBERG, I. Seal formation and interrill soil erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.58, p.203-209, 1994.

- 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, v.33, p.1882-1888, 1990.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE CLAYS & CLAY MINERALS, [1960, Ottawa]. **Proceedings...** Ottawa, 1960. p.317-327.
- MEKARU, T.; UEHARA, G. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, Wisconsin, USA, v.36, p.296-300, 1972.
- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. How row-sideslope length and steepness affect sideslope erosion. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.32, p.639-644, 1989.
- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, p.100-103, 1979.
- MEYER, L.D. Rain Intensity affects interrill erosion. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n.6, p.1472-1475, 1981.
- MEYER, L.D.; FOSTER, G.R.; NIKOLOV, S. Effect of flow rate and canopy on rill erosions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.18, p.905-911, 1975.
- MOORE, D.C.; SINGER, M.J. Crust formation effects on soil erosion processes, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.54, p.1117-1123, 1990.
- SAS Institute. **Statistical Analytical Systems: SAS for Windows Procedures Guide: Version 9.1.** Cary, USA, 2002-2003.
- SCHWERTMANN, U. **Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit saurer Ammoniumoxalat-Lösung.** Z. Pflanzenernähr. Bodenkd, 1964. p.194-202.
- SHIMADZU. **Total Organic Carbon Analyzer (TOC-V CSH).** Manual do Usuário. Tóquio, 2001. 144p.
- SOUZA, M.D. de. **Infiltração de água em Latossolo roxo distrófico submetido a diferentes manejos.** 1985. 131f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1985.
- STATISTICAL Package For The Social Sciences. SPSS for Windows, copy right, Version 8.0. Cary, USA, 1979-1997.

- TRUMAN, C.C.; BRADFORD, J.M. Laboratory determination of interrill soil erodibility. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.59, p.519-526, 1995.
- TRUMAN, C.C.; BRADFORD, J.M. Relationships between rainfall intensity and the interrill soil loss-slope steepness ratio as affected by antecedent water content. **Soil Sci.**, Baltimore, EUA, v.156, p.405-413, 1993.
- WATSON, D.A.; LAFLEN, J. M. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.1, p.98-102, 1986.
- ZHANG, X.C.; NEARING, M.A.; MILLER, W.P.; NORTON, L.D.; WEST, L.T. Modeling Interrill Sediment Delivery. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, Wisconsin, USA, v.62, p.438-444, 1998.

CONCLUSÕES GERAIS

- As relações baseadas no teor de areia muito fina e no de argila, conforme sugerido pelo modelo WEPP, não foram adequadas para estimar a erodibilidade básica em entressulcos dos Latossolos do Rio Grande do Sul estudados, pois superestimaram em 2,4 a 3,6 vezes os dados obtidos experimentalmente. Este resultado deve-se, possivelmente, ao fato dos Latossolos serem característicos de regiões de clima temperado, formados sob taxas de intemperismo maiores do que os solos para os quais o modelo WEPP foi desenvolvido;

- Os solos mais argilosos e com maior teor de Fe_o apresentaram um menor fator de erodibilidade em entressulcos. O fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) dos solos LVaf (Erechim), LVdf (Santo Ângelo) e LVd (Cruz Alta) foi, respectivamente, $0,76 \times 10^6$; $0,97 \times 10^6$ e $1,48 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$;

- O fator de erodibilidade em entressulcos dos solos estudados teve maior correlação significativa com os parâmetros granulométricos de argila, areia muito fina e parâmetro M, com o teor de óxidos de ferro e com o índice de estabilidade dos agregados em água;

- O conteúdo de argila total e o de óxidos ferro de baixa cristalinidade, extraído com oxalato de amônio ácido (Fe_o), explicaram 97% ($p < 0,01$) da erodibilidade em entressulcos dos solos estudados, podendo, dessa forma, ser utilizados para a estimativa do fator de erodibilidade em entressulcos de Latossolos com características e propriedades semelhantes as dos solos estudados;

- O índice de estabilidade de agregados em água apresentou correlação significativa com praticamente todos os parâmetros do solo avaliados. Isso indica que a estabilidade dos agregados em água pode ser uma forma simplificada de integrar o efeito e a interação de vários parâmetros do solo ao mesmo tempo;

- O índice de estabilidade de agregados em água teve correlação negativa e altamente significativa com o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ($r = -0,90^{**}$), podendo ser utilizado para simplificar a predição do fator de erodibilidade de Latossolos nas áreas em entressulcos. Este resultado corrobora com o efeito da estabilidade dos agregados, comprovado no presente estudo, em representar adequadamente vários dos parâmetros do solo;

- O solo com menor conteúdo de argila e de óxidos de ferro e com baixa estabilidade de agregados em água (LVd - Cruz Alta) teve maior taxa de desagregação e perda de solo em entressulcos do que o solo que apresenta elevado teor de argila e de óxidos de ferro e com alta estabilidade de agregados em água (LVaf - Erechim), independente da condição inicial de umidade e da presença de crosta superficial;

- No solo com elevado teor de argila e alta estabilidade de agregados em água (LVaf – Erechim), a variação no teor de umidade inicial e a presença de crosta superficial não foram suficientes para causar diferença significativa nas taxas de desagregação em entressulcos;

- No solo de menor estabilidade de agregados em água (LVd - Cruz Alta), a condição inicial de solo seco ao ar proporcionou maior taxa de desagregação e perda de solo nas áreas em entressulcos do que a condição de solo inicialmente úmido, devido a uma possível quebra dos agregados menos estáveis pelo rápido umedecimento da superfície do solo;

- Quanto maior a declividade da superfície do solo menor foi o tempo necessário para atingir a taxa máxima de aporte de sedimentos por erosão em entressulcos. Isso ocorreu, possivelmente, porque com o aumento da declividade da superfície do solo, aumentou a velocidade do escoamento superficial e, portanto, a capacidade de transporte do material desagregado, fazendo com que este chegasse mais rapidamente ao ponto de aporte;

- Para um Latossolo muito argiloso, com elevada estabilidade de agregados em água e sob a relação entre a variação na declividade da superfície e o fator declive apresentou um comportamento linear, diferindo, portanto, do comportamento logarítmico do fator declive atualmente adotado no modelo WEPP, para a mesma faixa de declividade.

APÊNDICES

Apêndice 1. Análise de variância (ANOVA) da variável resposta fator de erodibilidade do solo em entressulcos "K_i" (kg s m⁻⁴).

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P > F
Solos	2	1,352	0,676	28,94	< ,0001
Uso (natural/cultivado)	1	0,065	0,065	2,79	0,1207
Solos x Uso	2	0,214	0,107	4,58	0,0333
Erro	12	0,280	0,023		
Total corrigido	17	1,911			

Apêndice 2. Análise de variância (ANOVA) da variável resposta índice de estabilidade de agregados em água (IEA) pelo método de Kemper & Rosenau (1986).

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P > F
Solos	2	636,950	318,476	318,48	< ,0001
Uso (natural/cultivado)	1	14,430	14,431	14,43	0,0025
Solos x Uso	2	91,500	45,749	45,75	< ,0001
Erro	12	12,000			
Total corrigido	17	5302,670			

Apêndice 3. Análise de variância (ANOVA) da variável resposta teor de Argila (NaOH), g kg⁻¹.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P > F
Solos	2	752.155,77	376.077,89	9.142,40	< 0,0001
Uso (natural/cultivado)	1	44.064,91	44.064,91	1.071,21	< 0,0001
Solos x Uso	2	19.073,63	9.536,82	231,84	< 0,0001
Erro	12	493,63	41,14		
Total corrigido	17	815.787,94			

Apêndice 4. Análise de variância (ANOVA) da variável resposta teor de óxidos de ferro pedogênicos, obtido pela extração com oxalato de amônio ácido (Fe_o), conforme Schwertmann (1964).

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P > F
Solos	2	0,0394	0,0197	18,40	0,0002
Uso (natural/cultivado)	1	0,0057	0,0057	5,28	0,0403
Solos x Uso	2	0,0066	0,0033	3,08	0,0830
Erro	12	0,0129	0,0011		
Total corrigido	17	0,0646			

Apêndice 5. Conteúdo volumétrico de água nos solos sob distintas tensões.

Solo			Conteúdo Volumétrico de água no solo ($m^3 m^{-3}$)								
U.M. ¹	Classe ²	Uso	-1kPa	-6 kPa	-10 kPa	-33,3 kPa	-100 kPa	-300 kPa	-500 Kpa	-1500 kPa	
LVaf	Erechim	natural	0,50	0,46	0,45	0,41	0,38	0,36	0,34	0,29	
			0,52	0,41	0,39	0,37	0,34	0,33	0,31	0,30	
			0,54	0,40	0,38	0,35	0,33	0,31	0,29	0,28	
		Média	0,52	0,42	0,41	0,38	0,35	0,33	0,31	0,29	
		cultivado	0,60	0,41	0,38	0,33	0,30	0,28	0,27	0,22	
	0,57		0,46	0,44	0,39	0,36	0,34	0,32	0,29		
	Média	Média	0,55	0,40	0,38	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	
			0,57	0,42	0,40	0,35	0,32	0,30	0,29	0,25	
		Média	0,55	0,42	0,40	0,36	0,34	0,32	0,30	0,27	
			natural	0,51	0,45	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33	0,30
0,49				0,42	0,41	0,39	0,36	0,34	0,32	0,30	
0,51	0,45	0,44		0,42	0,38	0,34	0,33	0,31			
LVdf	Santo Ângelo	Média	0,50	0,44	0,43	0,41	0,37	0,34	0,32	0,30	
			cultivado	0,48	0,40	0,38	0,36	0,33	0,31	0,29	0,27
				0,50	0,42	0,40	0,37	0,34	0,32	0,30	0,29
		Média	0,51	0,42	0,41	0,36	0,33	0,31	0,29	0,28	
			0,49	0,41	0,40	0,36	0,33	0,31	0,29	0,28	
	Média	0,50	0,43	0,41	0,38	0,35	0,33	0,31	0,29		
		natural	0,34	0,21	0,18	0,15	0,11	0,10	0,09	0,03	
			0,29	0,24	0,22	0,16	0,13	0,11	0,10	0,07	
	0,38		0,22	0,19	0,23	0,20	0,18	0,17	0,15		
	LVd	Cruz Alta	Média	0,34	0,22	0,20	0,18	0,15	0,13	0,12	0,08
cultivado				0,45	0,33	0,28	0,24	0,20	0,18	0,17	0,14
				0,45	0,38	0,30	0,23	0,20	0,19	0,17	0,14
Média			0,44	0,34	0,29	0,26	0,20	0,19	0,18	0,15	
			0,45	0,35	0,29	0,24	0,20	0,19	0,17	0,14	
Média		0,39	0,29	0,24	0,21	0,17	0,16	0,15	0,11		

¹ Unidade de Mapeamento (Brasil, 1973); ² Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico.

Apêndice 6. Intensidade da chuva simulada aplicada e tempo de início do escoamento superficial. Chuva simulada com água com condutividade elétrica média de 0,229 dS m⁻¹.

Solos			Chuva	Condição	Declive m m ⁻¹	Intensidade (mm h ⁻¹)				Início escoamento (min)			
U.M. ¹	Classe ²	Uso				R1	R2	R3	Média	R1	R2	R3	Média
Erechim	LVaf	Natural	A	úmido	0,09	88,97	88,81	89,85	89,21	11,0	9,0	14,0	11,3
			B	úmido	0,09	85,95	90,29	87,83	88,02	13,0	12,0	9,0	11,3
			A	seco	0,09	88,49	85,26	85,88	86,54	13,0	15,0	14,0	14,0
			B	seco	0,09	85,85	84,73	86,29	85,62	6,0	8,0	7,0	7,0
		Cultivado	A	úmido	0,18	85,10	85,79	86,74	85,88	7,0	10,0	5,0	7,3
			A	úmido	0,36	87,50	87,50	87,50	87,50	10,0	6,0	9,0	8,3
			A	úmido	0,45	87,50	87,50	87,50	87,50	3,0	3,0	3,0	3,0
			A	úmido	0,09	85,31	85,47	89,62	86,80	9,0	6,0	6,0	7,0
Santo Ângelo	LVdf	Natural	A	úmido	0,09	85,15	88,08	86,45	86,56	13,0	18,0	16,0	15,7
		Cultivado	A	úmido	0,09	85,31	86,68	86,42	86,14	7,0	5,5	8,0	6,8
Cruz Alta	LVd	Natural	A	úmido	0,09	85,85	86,35	86,62	86,27	3,0	5,5	3,0	3,8
			B	úmido	0,09	87,45	91,87	92,15	90,49	3,0	1,5	3,0	2,5
			A	seco	0,09	87,39	88,12	87,59	87,70	18,0	10,0	13,0	13,7
		Cultivado	B	seco	0,09	89,92	87,49	90,56	89,32	1,0	2,0	2,0	1,7
			A	úmido	0,09	91,52	88,70	85,82	88,68	3,0	2,0	1,5	2,2
			A	úmido	0,09	91,52	88,70	85,82	88,68	3,0	2,0	1,5	2,2

¹ Unidade de Mapeamento (Brasil, 1973); ² Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; A = sem crosta superficial; B = com crosta superficial.

Apêndice 7. Distribuição de diâmetro das partículas do solo, Densidade de partículas (Dp), grau de flocculação (GF) e parâmetro textural (M), correlacionados com o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i).

Solo	Tipo	Arg _{Água}	Argila	Silte	Areia	AMF	AF	AM	AG	AMG	Dp	GF	M	K_i ($\times 10^{-6}$)	
		g kg ⁻¹										%	kg s m ⁻⁴		
LVaf	Natural	234,0	763,2	207,0	29,8	7,9	9,9	5,5	4,1	2,5	2,69	43,6			0,76
		247,2	760,6	210,0	29,4	7,8	9,8	5,8	3,9	2,1	2,53	46,3			0,72
		240,6	758,4	211,9	29,7	7,2	10,2	5,7	4,6	2,0	2,63	42,8			0,78
	Média	240,6	760,7	209,6	29,6	7,6	10,0	5,7	4,2	2,2	2,62	44,2	519,76		0,75
	Cultivado	430,4	684,4	277,8	37,8	5,7	7,8	9,6	6,0	8,8	2,59	65,8			0,73
		408,8	669,2	291,3	39,5	6,4	8,0	9,6	7,0	8,5	2,56	63,1			0,72
434,0		695,8	263,7	40,5	6,6	8,8	9,5	7,8	7,8	2,62	65,4			0,86	
Média	424,4	683,1	277,6	39,3	6,2	8,2	9,6	6,9	8,4	2,59	64,8	899,36		0,77	
LVdf	Natural	242,9	673,2	261,2	65,6	12,2	25,1	13,9	9,8	4,7	2,63	63,9			0,71
		236,0	675,0	259,7	65,3	13,0	22,4	15,9	8,4	5,7	2,60	65,0			0,78
		237,2	692,4	245,0	62,6	12,7	21,1	16,3	8,5	4,0	2,62	65,7			0,83
	Média	238,7	680,2	255,3	64,5	12,6	22,8	15,4	8,9	4,8	2,62	64,9	856,74		0,77
	Cultivado	280,0	578,0	384,1	37,9	12,3	8,1	10,7	3,7	3,2	2,70	51,6			1,13
		282,0	576,4	372,1	51,5	12,3	18,8	11,4	4,5	4,6	2,70	51,1			1,35
297,4		581,0	375,7	43,4	12,3	14,4	9,2	5,2	2,4	2,72	48,8			0,99	
Média	286,4	578,5	377,3	44,3	12,3	13,7	10,4	4,5	3,4	2,71	50,5	1642,16		1,16	
LVd	Natural	81,6	217,8	119,6	662,7	109,3	416,1	123,2	13,5	0,6	2,60	62,5			1,35
		88,4	227,6	106,8	665,7	101,9	409,6	137,7	16,0	0,6	2,72	61,2			1,58
		84,2	237,4	103,3	659,3	102,0	404,5	133,5	14,5	4,8	2,71	64,5			1,30
	Média	84,7	227,6	109,9	662,5	104,4	410,0	131,5	14,7	2,0	2,68	62,7	1655,25		1,41
	Cultivado	125,4	206,6	169,7	623,7	99,5	390,7	119,7	13,9	0,0	2,82	39,3			1,30
		123,0	213,6	132,0	654,4	104,3	408,4	125,0	16,8	0,0	2,80	42,4			1,59
125,2		209,0	153,3	637,7	101,5	398,5	122,2	15,6	0,0	2,69	40,1			1,73	
Média	124,5	209,7	151,7	638,6	101,8	399,2	122,3	15,4	0,0	2,77	40,6	2003,41		1,54	
r	-0,735*	-0,964**	-0,480	0,894**	0,906**	0,894**	0,889**	0,781*	-0,686				0,954**		

LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico (Erechim); LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico (Santo Ângelo); LVd = Latossolo Vermelho distrófico (Cruz Alta); Arg_{H₂O} = argila dispersa em água; AMF = areia muito fina; AF = areia fina; AM = areia média; AG = areia grossa; AMG = areia muito grossa.

Apêndice 8. Algumas características químicas dos solos e suas respectivas correlações com o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i).

Solos			pH (H ₂ O)	pH (KCl)	Δ pH	CO	Fe _o	Fe _d	K_i
U. M. ¹	Classe ²	Uso				g kg ⁻¹			kg s m ⁻⁴
Erechim	LVaf	natural	5,08	4,61	-0,47		2,40	97,15	
			5,10	4,61	-0,49		2,40	93,20	
		Média	5,09	4,61	-0,48	29,90	2,40	95,18	0,75
		cultivado	5,63	4,64	-0,99		2,60	92,17	
			5,66	4,46	-1,20		2,46	97,32	
		Média	5,65	4,55	-1,10	23,12	2,53	94,74	0,77
Santo Ângelo	LVdf	natural	4,98	4,45	-0,53		2,67	93,29	
			5,00	4,46	-0,54		2,67	91,33	
		Média	4,99	4,46	-0,54	22,00	2,67	92,31	0,77
		cultivado	5,55	4,44	-1,11		1,92	90,60	
			5,65	4,56	-1,09		1,92	94,41	
		Média	5,60	4,50	-1,10	19,53	1,92	92,51	1,16
Cruz Alta	LVd	natural	5,07	3,93	-1,14		2,40	16,67	
			5,05	3,91	-1,14		0,75	17,84	
		Média	5,06	3,92	-1,14	14,87	1,57	17,25	1,41
		cultivado	5,52	4,60	-0,92		1,16	20,51	
			5,55	4,61	-0,94		1,16	18,11	
		Média	5,54	4,61	-0,93	16,22	1,16	19,31	1,54
		r			-0,566	-0,860**	-0,980**	-0,900**	

¹ Unidade de Mapeamento (Brasil, 1973); ² Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; CO = carbono orgânico; Fe_o = ferro obtido pela extração com oxalato de amônio ácido; Fe_d = ferro obtido pela extração com ditionito-citrato-bicarbonato/DCB.

Apêndice 9. Diâmetro médio ponderado (DMP_{KC}), por Kemper & Chepil (1965), diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG), por Kemper & Chepil (1965), modificado por Tisdall & Oades (1979) e Índice de estabilidade de agregados (IEA) pelo método de Kemper & Rosenau (1986), correlacionados com o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i).

Solos			Rep	DMP_{KC}	DMP	DMG	IEA	K_i		
U.M. ¹	Classe ²	Uso		mm				kg s m ⁻⁴		
Erechim	LVaf	Natural	1	6,93	4,37	2,71	0,98	0,76		
			2	6,98	3,92	2,33	0,97	0,72		
			3	6,98	4,02	2,36	0,98	0,78		
				Média		6,96	4,10	2,47	0,98	0,75
		Cultivado	1	6,59	4,42	2,99	0,86	0,73		
			2	6,66	5,28	3,93	0,85	0,72		
			3	6,60	4,48	3,00	0,85	0,86		
				Média		6,62	4,73	3,31	0,85	0,77
		Santo Ângelo	LVdf	Natural	1	6,99	5,28	4,04	0,97	0,71
2	6,96				4,88	3,67	0,98	0,78		
3	7,01				4,81	3,20	0,98	0,83		
				Média		6,99	4,99	3,64	0,98	0,77
Cultivado	1			6,14	4,28	2,80	0,91	1,13		
	2			6,12	4,60	3,06	0,92	1,35		
	3			6,11	4,21	2,85	0,91	0,99		
				Média		6,12	4,36	2,90	0,91	1,16
Cruz Alta	LVd			Natural	1	4,91	3,89	2,11	0,39	1,35
		2	4,92		3,51	1,82	0,39	1,58		
		3	4,94		3,18	1,69	0,36	1,30		
				Média		4,92	3,53	1,87	0,38	1,41
		Cultivado	1	4,60	3,85	2,08	0,41	1,30		
			2	4,56	3,73	1,88	0,24	1,59		
			3	4,53	3,00	1,20	0,35	1,73		
				Média		4,56	3,53	1,72	0,33	1,54
		r					-0,830**	-0,815**	-0,902**	

¹ Unidade de Mapeamento (Brasil, 1973); ² Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico.

Apêndice 10. Percentagem de agregados retidos em cada classe de diâmetro de peneira, após peneiramento úmido, com agregados < 9,51mm, por Kemper & Chepil (1965), modificado por Tisdall & Oades (1979).

Solos			Rep	Classes (mm)							
U.M. ¹	Classe ²	Uso		9,51-4,76	4,76-2,00	2,00-1,00	1,00-0,50	0,50-0,25	0,25-0,105	0,105-0,053	< 0,053
Erechim	LVaf	Natural	1	49,61	16,64	10,51	11,24	5,77	4,61	0,23	1,39
			2	41,58	18,43	12,99	13,29	7,74	4,14	0,19	1,64
			3	43,15	18,22	12,96	13,65	4,78	3,90	1,17	2,18
			Média	44,78	17,76	12,15	12,73	6,10	4,22	0,53	1,74
	LVaf	Cultivado	1	47,30	22,88	11,51	10,27	4,04	2,63	0,56	0,81
			2	64,18	15,31	7,62	7,14	2,67	2,21	0,46	0,41
3			50,79	16,57	12,30	12,28	4,75	2,36	0,48	0,46	
		Média	54,09	18,25	10,48	9,90	3,82	2,40	0,50	0,56	
Santo Ângelo	LVdf	Natural	1	61,55	21,85	7,46	3,74	2,11	1,85	0,37	1,06
			2	53,46	24,71	11,64	5,19	2,33	1,40	0,30	0,97
			3	56,33	16,84	9,52	6,64	5,11	3,44	0,81	1,31
			Média	57,11	21,13	9,54	5,19	3,18	2,23	0,49	1,11
	LVdf	Cultivado	1	45,81	21,03	13,59	9,60	5,22	3,19	0,72	0,85
			2	52,47	17,81	10,53	10,00	5,06	2,69	0,57	0,87
3			43,56	23,15	14,75	11,18	4,03	1,97	0,61	0,77	
		Média	47,28	20,66	12,95	10,26	4,77	2,61	0,63	0,83	
Cruz Alta	LVd	Natural	1	40,22	23,71	7,36	8,85	6,40	9,86	2,40	1,20
			2	35,85	18,82	11,40	11,59	10,01	9,20	1,97	1,16
			3	28,45	22,89	15,86	10,67	9,99	8,83	2,12	1,18
			Média	34,84	21,81	11,54	10,37	8,80	9,30	2,16	1,18
	LVd	Cultivado	1	41,24	19,43	7,33	12,31	9,69	7,08	1,16	1,76
			2	40,40	18,40	4,98	11,47	12,92	8,44	1,85	1,54
3			32,08	13,38	7,44	8,10	12,68	23,24	2,03	1,06	
		Média	37,91	17,07	6,58	10,63	11,76	12,92	1,68	1,45	

¹ Unidade de Mapeamento (Brasil, 1973); ² Embrapa (1999); LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico.

Apêndice 11. Tempo de início de escoamento (t_i), intensidade da chuva, taxa máxima de aporte de solo em entressulcos (D_i), descarga unitária do escoamento superficial (q_i), fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), perda de solo (PS) e perda de água (PA), sob a declividade de $0,09 \text{ m m}^{-1}$, durante 180 minutos de chuva simulada.

Solo	Uso	Condição	Chuva	R	t_i	Intensidade		D_i ($\times 10^4$)	q_i ($\times 10^4$)	PS	PA
					min	mm h^{-1}	$\text{m s}^{-1} \times 10^4$	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	m s^{-1}	kg m^{-2}	L
LVaf	natural	úmido	A	1	11,0	88,97	0,247	1,74	0,21	1,35	70,16
				2	9,0	88,81	0,247	1,80	0,22	1,62	69,46
				3	14,0	89,85	0,250	1,68	0,19	1,59	58,80
				MÉDIA	11,3	89,21	0,248	1,74	0,21	1,52	66,11
				1	13,0	85,95	0,239	1,95	0,21	1,68	81,48
				2	12,0	90,29	0,251	2,33	0,21	2,67	73,56
		3	9,0	87,83	0,244	1,96	0,21	1,73	86,24		
		MÉDIA	11,3	88,02	0,245	2,08	0,21	2,03	80,43		
		seco	A	1	13,0	88,49	0,246	1,67	0,22	1,48	86,82
				2	15,0	83,26	0,231	1,62	0,18	1,15	87,09
				3	14,0	85,88	0,239	1,65	0,20	1,15	87,09
				MÉDIA	14,0	85,88	0,239	1,65	0,20	1,32	86,96
	1			6,0	85,85	0,238	2,18	0,23	1,97	87,60	
	2			8,0	84,73	0,235	1,52	0,20	1,50	76,39	
	3	7,0	85,29	0,237	1,52	0,21	1,50	81,66			
	MÉDIA	7,0	85,29	0,237	1,85	0,21	1,73	81,66			
	cultivado	úmido	A	1	9,0	85,31	0,237	1,80	0,22	1,73	80,35
				2	6,0	85,47	0,237	1,71	0,22	1,48	80,05
				3	6,0	89,62	0,249	2,13	0,22	2,83	81,65
				MÉDIA	7,0	86,80	0,241	1,88	0,22	2,01	80,68
				1	13,0	85,15	0,237	1,63	0,21	1,27	69,84
				2	18,0	88,08	0,245	1,88	0,22	1,30	64,75
	3	16,0	86,45	0,240	1,78	0,19	1,35	60,06			
	MÉDIA	15,7	86,56	0,240	1,76	0,21	1,31	64,88			
cultivado	úmido	A	1	7,0	85,31	0,237	2,72	0,22	2,23	78,03	
			2	5,5	86,68	0,241	2,53	0,17	1,90	76,46	
			3	8,0	86,42	0,240	2,32	0,21	1,90	76,46	
			MÉDIA	6,8	86,14	0,239	2,52	0,20	2,01	76,98	
			1	3,0	85,85	0,238	3,31	0,22	3,00	81,07	
			2	5,5	86,35	0,240	3,81	0,22	3,75	82,13	
3	3,0	85,62	0,238	3,25	0,22	2,90	81,54				
MÉDIA	3,8	85,94	0,239	3,46	0,22	3,22	81,58				
LVdf	natural	úmido	B	1	3,0	87,45	0,243	3,22	0,22	3,37	85,05
				2	1,5	91,87	0,255	2,80	0,25	2,94	88,76
				3	3,0	92,15	0,256	3,13	0,25	3,37	90,53
				MÉDIA	2,5	90,49	0,251	3,05	0,24	3,23	88,11
				1	18,0	87,39	0,243	6,00	0,24	5,02	77,49
				2	10,0	88,12	0,245	5,31	0,24	4,22	82,20
	3	13,0	87,59	0,243	5,48	0,24	4,14	79,63			
	MÉDIA	13,7	87,70	0,244	5,60	0,24	4,46	79,77			
	seco	A	1	1,0	89,92	0,250	4,12	0,23	3,82	85,24	
			2	2,0	87,49	0,243	3,26	0,23	2,78	80,62	
			3	2,0	89,77	0,249	4,14	0,24	3,82	85,92	
			MÉDIA	1,7	89,06	0,247	3,84	0,23	3,47	83,93	
1			3,0	91,52	0,254	3,55	0,25	2,72	86,09		
2			2,0	88,70	0,246	3,94	0,22	2,38	51,18		
3	1,5	85,82	0,238	4,01	0,21	4,11	72,80				
MÉDIA	2,2	88,68	0,246	3,83	0,23	3,07	70,02				

LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico (LVaf); LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf); LVd = Latossolo Vermelho distrófico (LVd); A = sem crosta superficial; B = com crosta superficial.

Apêndice 12. Tempo de início de escoamento (t_i), Intensidade da chuva, Taxa máxima de aporte de solo em entressulcos (D_i), descarga unitária do escoamento superficial (q_i), erodibilidade em entressulcos (K_i), perda de solo (PS) e perda de água (PA), sob diferentes declividades, durante 120 minutos de chuva simulada.

Declividade	Rep	t_i	Intensidade		$D_i (x 10^4)$	$q_i (x 10^5)$	PS	PA
$m m^{-1}$		min	$mm h^{-1}$	$m s^{-1} x 10^4$	$kg m^{-2} s^{-1}$	$m s^{-1}$	$kg m^{-2}$	L
0,09	1	11,0	88,97	0,25	1,48	2,07	0,78	40,45
	2	9,0	88,81	0,25	1,50	2,16	0,99	41,26
	3	14,0	89,85	0,25	1,61	1,84	1,00	35,35
	MÉDIA	11,3	89,21	0,25	1,53	2,02	0,92	39,02
0,18	1	7,0	85,10	0,24	1,74	2,18	1,04	51,17
	2	10,0	85,79	0,24	1,80	2,26	1,02	52,47
	3	5,0	86,74	0,24	1,64	2,25	0,90	55,50
	MÉDIA	7,3	85,88	0,24	1,73	2,23	0,99	53,05
0,36	1	10,0	87,50	0,24	1,81	2,45	0,87	54,68
	2	6,0	87,50	0,24	1,98	2,43	1,04	57,17
	3	9,0	87,50	0,24	1,90	2,40	0,96	54,96
	MÉDIA	8,3	87,50	0,24	1,90	2,43	0,96	55,60
0,45	1	3,0	87,50	0,24	2,45	2,40	1,19	56,29
	2	3,0	87,50	0,24	2,57	2,40	1,29	55,45
	3	3,0	87,50	0,24	2,06	2,39	1,10	53,64
	MÉDIA	3,0	87,50	0,24	2,36	2,40	1,19	55,13

Apêndice 13. Algumas características hidráulicas do escoamento superficial da água nos Latossolos estudados, sob declividade de 0,09 m m⁻¹, durante 180 minutos de chuva simulada.

Solo	Condição	Chuva	R	qt	v	V	h	T	γ	ν	τ	Re	Fr	f	K	u _*
				m ² s ⁻¹ (x10 ⁴)	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m (x10 ⁴)	°C	N m ⁻³	m ² s ⁻¹						m s ⁻¹
LVafn	úmido	A	1	0,140	0,038	0,025	5,580	17,5	9802,5	1,067E-06	0,492	13,08	0,34	6,31	82,46	0,022
			2	0,133	0,037	0,025	5,318	19,0	9790,8	1,027E-06	0,469	12,91	0,35	6,04	78,02	0,022
			3	0,110	0,038	0,025	4,389	23,0	9783,0	9,355E-07	0,386	11,79	0,38	4,91	57,86	0,020
		MÉDIA		0,127	0,038	0,025	5,096	19,8	9792,1	1,010E-06	0,449	12,59	0,36	5,75	72,39	0,021
	úmido	B	1	0,141	0,033	0,022	6,348	18,0	9803,4	1,053E-06	0,560	13,34	0,28	9,15	122,11	0,024
			2	0,137	0,040	0,027	5,125	25,0	9779,0	8,980E-07	0,451	15,26	0,38	5,06	77,27	0,021
			3	0,146	0,040	0,027	5,459	25,0	9779,0	8,980E-07	0,464	14,89	0,36	5,68	84,61	0,022
		MÉDIA		0,141	0,038	0,025	5,644	22,7	9787,1	9,497E-07	0,497	14,96	0,34	6,27	93,76	0,022
	seco	A	1	0,150	0,038	0,025	5,949	24,0	9781,5	9,161E-07	0,524	16,41	0,33	6,58	107,98	0,023
			2	0,120	0,039	0,026	4,628	25,0	9779,0	8,980E-07	0,407	13,33	0,38	4,89	65,12	0,020
			3	0,135	0,038	0,026	5,273	24,5	9780,0	9,069E-07	0,464	14,89	0,36	5,68	84,61	0,022
		MÉDIA		0,135	0,038	0,026	5,283	24,5	9780,2	9,070E-07	0,465	14,87	0,36	5,72	85,03	0,022
seco	B	1	0,151	0,043	0,029	5,266	26,0	9776,6	8,813E-07	0,463	17,17	0,40	4,50	77,34	0,022	
		2	0,137	0,038	0,025	5,378	27,5	9773,0	8,588E-07	0,473	15,91	0,35	5,89	93,66	0,022	
		3	0,144	0,041	0,027	5,317	27,0	9774,2	8,659E-07	0,468	16,62	0,37	5,13	85,18	0,022	
	MÉDIA		0,144	0,041	0,027	5,320	26,8	9774,6	8,687E-07	0,468	16,56	0,37	5,17	85,68	0,022	
LVafc	úmido	A	1	0,133	0,038	0,025	5,280	22,0	9785,0	9,563E-07	0,465	13,88	0,35	5,90	81,92	0,022
			2	0,130	0,039	0,026	5,045	21,0	9787,0	9,785E-07	0,444	13,23	0,36	5,41	71,59	0,021
			3	0,134	0,039	0,026	5,122	23,0	9783,0	9,355E-07	0,451	14,34	0,37	5,27	75,60	0,021
	MÉDIA		0,132	0,039	0,026	5,149	22,0	9785,0	9,568E-07	0,453	13,82	0,36	5,53	76,39	0,021	
LVdfn	úmido	A	1	0,121	0,031	0,021	5,883	16,5	9795,3	1,095E-06	0,519	11,05	0,27	9,82	108,56	0,023
			2	0,121	0,024	0,016	7,556	16,0	9796,2	1,110E-06	0,666	10,94	0,19	20,67	226,18	0,026
			3	0,110	0,038	0,025	4,368	17,0	9794,4	1,081E-06	0,385	10,13	0,38	4,91	49,75	0,020
	MÉDIA		0,117	0,031	0,021	5,936	16,5	9795,3	1,095E-06	0,523	10,71	0,28	11,80	126,38	0,023	
LVdfc	úmido	A	1	0,130	0,044	0,029	4,425	21,5	9786,0	9,672E-07	0,390	13,42	0,45	3,63	48,75	0,020
			2	0,101	0,039	0,026	3,901	24,0	9781,5	9,161E-07	0,343	11,01	0,42	4,12	45,36	0,019
			3	0,127	0,042	0,028	4,525	21,0	9787,0	9,785E-07	0,399	12,95	0,42	4,08	52,79	0,020
	MÉDIA		0,119	0,042	0,028	4,284	22,2	9784,8	9,539E-07	0,377	12,46	0,43	3,94	49,12	0,019	
LVdn	úmido	A	1	0,132	0,068	0,045	2,927	25,5	9777,8	8,895E-07	0,258	14,81	0,84	1,02	15,11	0,016
			2	0,132	0,072	0,048	2,770	27,5	9773,0	8,588E-07	0,244	15,42	0,92	0,86	13,20	0,016
			3	0,135	0,068	0,045	3,002	25,0	9779,0	8,980E-07	0,264	15,04	0,83	1,05	15,75	0,016
		MÉDIA		0,133	0,069	0,046	2,900	26,0	9776,6	8,821E-07	0,255	15,09	0,86	0,97	14,71	0,016
	úmido	B	1	0,136	0,071	0,048	2,865	27,5	9773,0	8,588E-07	0,252	15,86	0,90	0,90	14,21	0,016
			2	0,147	0,071	0,048	3,101	24,0	9780,0	9,069E-07	0,273	16,25	0,86	0,97	15,76	0,017
3			0,149	0,071	0,048	3,135	25,0	9779,0	8,980E-07	0,276	16,59	0,86	0,98	16,26	0,017	
	MÉDIA		0,144	0,071	0,048	3,034	25,7	9777,3	8,879E-07	0,267	16,24	0,87	0,95	15,40	0,016	
seco	A	1	0,143	0,065	0,043	3,288	26,0	9776,6	8,813E-07	0,289	16,17	0,76	1,24	20,00	0,017	
		2	0,145	0,068	0,045	3,213	22,0	9785,0	9,563E-07	0,283	15,12	0,80	1,12	16,95	0,017	
		3	0,143	0,068	0,045	3,178	21,5	9787,0	9,672E-07	0,280	14,78	0,81	1,11	16,39	0,017	
	MÉDIA		0,143	0,067	0,044	3,227	23,2	9782,9	9,349E-07	0,284	15,36	0,79	1,16	17,74	0,017	
LVdc	úmido	A	1	0,135	0,068	0,045	3,000	22,0	9785,0	9,563E-07	0,264	14,12	0,83	1,05	14,77	0,016
			2	0,135	0,071	0,048	2,838	20,0	9789,0	1,002E-06	0,250	13,46	0,90	0,89	11,94	0,016
			3	0,140	0,069	0,046	3,026	21,0	9787,0	9,785E-07	0,267	14,31	0,85	1,00	14,29	0,016
		MÉDIA		0,137	0,069	0,046	2,955	21,0	9787,0	9,789E-07	0,260	13,96	0,86	0,98	13,65	0,016
	seco	B	1	0,147	0,068	0,045	3,264	26,5	9775,4	8,734E-07	0,287	16,82	0,80	1,14	19,15	0,017
			2	0,134	0,062	0,041	3,255	26,0	9776,6	8,813E-07	0,286	15,19	0,73	1,36	20,65	0,017
3			0,125	0,065	0,043	2,912	22,0	9785,0	9,563E-07	0,256	13,11	0,81	1,11	14,54	0,016	
	MÉDIA		0,135	0,065	0,043	3,144	24,8	9779,0	9,037E-07	0,277	15,04	0,78	1,20	18,08	0,017	

LVaf = Latossolo Vermelho aluminoférrico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; n = nativo; c = cultivado; qt = descarga total do escoamento; v = velocidade do escoamento; V = velocidade média do escoamento ($v \cdot 2/3$); h = altura da lâmina de água; T = temperatura da água; ν = viscosidade cinemática da água; τ = tensão de cisalhamento; Re = número de Reynolds; Fr = número de Froude; f = fator perda de carga; K = parâmetro hidráulico; u_{*} = velocidade média de cisalhamento.

Apêndice 14. Algumas características hidráulicas do escoamento superficial da água nos Latossolos estudados, sob diferentes declividades, durante 120 minutos de chuva simulada.

Declive	R	qt	v	V	h	T	ν	Re	Fr	f	K	u _*
m m ⁻¹		m ² s ⁻¹ (x10 ⁴)	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m (x10 ⁴)	°C	m ² s ⁻¹					m s ⁻¹
0,09	1	0,150	0,038	0,025	5,980	17,5	1,067E-06	14,01	0,33	6,76	94,71	0,023
	2	0,131	0,037	0,025	5,246	19,0	1,027E-06	12,74	0,35	5,96	75,92	0,022
	3	0,111	0,038	0,025	4,401	23,0	9,355E-07	11,82	0,38	4,92	58,17	0,020
	MÉDIA	0,130	0,038	0,025	5,209	19,8	1,010E-06	12,86	0,35	5,88	76,27	0,021
0,18	1	0,125	0,039	0,026	4,820	23,5	9,256E-07	13,50	0,38	5,06	68,36	0,029
	2	0,135	0,041	0,027	4,927	24,0	9,161E-07	14,74	0,39	4,64	68,31	0,029
	3	0,131	0,042	0,028	4,701	23,0	9,355E-07	14,00	0,41	4,28	59,87	0,029
	MÉDIA	0,130	0,041	0,027	4,816	23,5	9,257E-07	14,08	0,39	4,66	65,51	0,029
0,36	1	0,130	0,042	0,028	4,632	23,5	9,256E-07	14,04	0,42	4,15	58,33	0,040
	2	0,130	0,044	0,029	4,483	22,5	9,458E-07	13,75	0,44	3,76	51,75	0,040
	3	0,129	0,043	0,029	4,521	22,0	9,563E-07	13,49	0,43	3,92	52,91	0,040
	MÉDIA	0,130	0,043	0,029	4,545	22,7	9,426E-07	13,76	0,43	3,95	54,33	0,040
0,45	1	0,143	0,056	0,037	3,839	22,0	9,563E-07	14,93	0,61	1,96	29,26	0,041
	2	0,143	0,059	0,039	3,662	21,0	9,785E-07	14,59	0,65	1,70	24,81	0,040
	3	0,141	0,050	0,034	4,199	21,0	9,785E-07	14,39	0,52	2,64	37,95	0,043
	MÉDIA	0,142	0,055	0,037	3,900	21,3	9,711E-07	14,64	0,59	2,10	30,67	0,041

qt = descarga total do escoamento; v = velocidade do escoamento; V = velocidade média do escoamento ($v^*2/3$); h = altura da lâmina de água; T = temperatura do escoamento; ν = viscosidade cinemática da água; Re = número de Reynolds; Fr = número de Froude; f = fator perda de carga; K = parâmetro hidráulico; u_{*} = velocidade média de cisalhamento.

Apêndice 15. Algumas características e propriedades do Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd).

Rep	DMP _{KC}	Δ pH	IEA	Argila	Silte	Areia	AMF
	mm			g kg ⁻¹			
R1	4,09	-1,25	34,99	268,8	221,9	509,3	82,5
R2	4,52	-1,17	38,54	268,4	223,5	508,1	69,8
R3	3,66		32,45			498,9	72,0

DMP_{KC} = Diâmetro médio ponderado, Kemper & Chépil (1965); IEA = índice de estabilidade de agregados (Kemper & Rosenau, 1986); AMF = areia muito fina.

Apêndice 16. Resultados do Laudo de análises químicas dos solos, realizado no Laboratório de Análises do Departamento de Solos da FA-UFRGS.

Determinação	Erechim (LVaf)		Santo Ângelo (LVdf)		Cruz Alta (LVd)	
	natural	cultivado	natural	cultivado	natural	cultivado
% Sat CTC (em Al)	6	0	15,5	0	39,7	1,5
Relação Ca/Mg	1,3	1,5	2,5	2,2	1	2,1
Relção Ca/K	3,8	8	4	19	2,3	3,5
Relação Mg/K	2,8	6	1,6	9	2,3	1,7
S (mg dm ⁻³)	6	12	101	10	10	6
Zn (mg dm ⁻³)	1,5	2,8	4,0	3,4	2,5	4,1
Cu (mg dm ⁻³)	7,6	5,5	5,2	9,1	2,3	2,1
B (mg dm ⁻³)	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5
Mn (mg dm ⁻³)	58	29	375	22	48	44
Na (mg dm ⁻³)	6	2	2	3	5	4