

## ERODIBILIDADE DO SOLO EM ENTRESSULCOS DETERMINADA EXPERIMENTALMENTE E POR MODELOS MATEMÁTICOS EM UM ARGISSOLO VERMELHO<sup>1</sup>

### *INTERRILL SOIL ERODIBILITY OF A PALEUDULT SOIL EVALUATED AT LABORATORY CONDITIONS AND ESTIMATED BY MATHEMATICAL MODELS*

Ândrea Machado Pereira Franco<sup>2</sup>; Elemar Antonino Cassol<sup>3</sup>; Eloy Antonio Pauletto<sup>4</sup>; Alberto Vasconcellos Inda<sup>5</sup>.

#### RESUMO

A desagregação das partículas de solo na erosão em entressulcos ocorre pelo impacto das gotas de chuva e o transporte pelo fluxo laminar raso, influenciado pela turbulência produzida pelo impacto das gotas de chuva. O objetivo principal deste trabalho foi determinar experimentalmente o fator erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) em condições de laboratório sob chuva simulada e estimá-lo por equações matemáticas obtidas por análises de regressão. O trabalho consistiu da aplicação de quatro repetições de chuva simulada com intensidade de 85 mm h<sup>-1</sup> e duração de 90 minutos, em solo descoberto, disposto em parcelas de 0,35 m<sup>2</sup> e declividade de 0,09 m m<sup>-1</sup>, em um Argissolo Vermelho Eutrófico típico na camada de 0,00 – 0,20 m da área de mineração de carvão de Candiota, RS. Para a estimativa do valor de  $K_i$  aplicando modelos matemáticos foram determinados atributos físicos e químicos do solo. O valor médio de  $K_i$  determinado experimentalmente foi de 1,82 x 10<sup>6</sup> kg s m<sup>-4</sup>, o qual foi superestimado pela equação do modelo WEPP. O modelo que considerou o

teor de argila e o de óxidos de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) apresentou valores mais próximo dos valores obtidos experimentalmente.

**Palavras chaves:** erosão em entressulcos, taxa de desagregação, características hidráulicas do escoamento, modelos de erosão, estimativa da erodibilidade do solo, chuva simulada.

#### ABSTRACT

Detachment of soil particles on interrill soil erosion occurs by the water raindrop impact on the soil surface. The transport of the detached soil particles occurs by overland broad sheet flow enhanced by the flow turbulence caused by raindrop impact. The objective of this study was to determine the interrill soil erodibility factor ( $K_i$ ) under simulated rainfall at laboratory conditions and to estimate the  $K_i$  factor by mathematical equations obtained by regression analysis. Soil samples were taken at field from the 0.2 m topsoil of a natural Paleudult soil from Candiota, Rio Grande do Sul State, Brazil at

<sup>1</sup>Parte integrante da Tese de Doutorado

<sup>2</sup>Eng. Agrícola, Pós-Doutoranda, PPGCS/UFSM, Bolsista CAPES, Avenida Rorâima, 1000, CCR/Prédio 42, Sala 3314, CEP 97105-900, Santa Maria, RS. email: pfranco20@hotmail.com.

<sup>3</sup>Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, Dr., UFRGS. email: cassolea@orion.ufrgs.br.;

<sup>4</sup> Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, Dr., DS/UFPel. email: pauletto@ufpel.tche.br;

<sup>5</sup>Eng. Agrônomo, Prof. Associado, Dr., UFRGS. Email alberto.ind@ufrgs.br

location where a coal mining was taking place. Simulated rainfall of  $85 \text{ mm h}^{-1}$  intensity and 90 minutes duration were applied over bare soil at laboratory interrill plot of  $0.35 \text{ m}^2$  settled on  $0.09 \text{ m m}^{-1}$  slope. The estimate of the factor  $K_i$  applying mathematical models had been determined physical and chemical attributes of the soil. The factor  $K_i$  determined at laboratory condition under simulated rainfall is  $1.82 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ , but the value of  $K_i$  estimated by means of the equation of WEPP model overestimated the experimental value, whereas the model that considers the clay and Fe oxides contents gives a value of  $K_i$  very closed to that obtained at laboratory conditions.

**Key words:** interrill erosion, interrill soil detachment, hydraulic flow characteristics, soil erosion models, simulated rainfall.

## INTRODUÇÃO

O processo de erosão hídrica do solo pode ocorrer em entressulcos ou em sulcos (MEYER et al., 1975). A erosão em entressulcos é essencialmente independente da erosão em sulcos, ocorrendo em áreas relativamente curtas e geralmente orientadas segundo o microrelevo superficial. Nessas áreas, ocorre escoamento superficial uniforme e laminar, que contribui para o fluxo concentrado nos sulcos. Segundo FOSTER et al. (1985) na erosão em entressulcos a desagregação das partículas de solo ocorre pelo impacto das gotas de chuva e o transporte pelo escoamento laminar, incrementado pela turbulência produzida pelo impacto das gotas de chuva, suspendendo e mantendo suspensas as partículas de solo.

A erosão do solo pode ser estimada de forma quantitativa e qualitativa. Segundo CHAVES et al. (1996) as duas formas apresentam vantagens e desvantagens. A análise qualitativa não permite a obtenção de valores numéricos, importante para a estimativa da degradação do solo e da sedimentação. Já a análise quantitativa

permite a estimativa da erosão absoluta, facilitando o planejamento conservacionista. Entretanto modelos quantitativos exigem um maior conhecimento por parte do usuário, além de requerer mais informações do que os modelos qualitativos.

A aplicação de modelos quantitativos em processos de erosão e seu controle é, atualmente, uma eficiente estratégia que vem sendo utilizada no planejamento do uso, manejo e conservação do solo. Vários modelos de predição da erosão hídrica do solo foram desenvolvidos recentemente, cujas relações se baseiam em processos e interações de suas variáveis. Dentre esses modelos, o WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) é um dos mais relevantes, pois considera a erosão em entressulcos e em sulcos separadamente (FLANAGAN & NEARINNG, 1995). Pelo motivo do WEPP ser idealizado sobre princípios físicos básicos, o conhecimento dos processos envolvidos na erosão hídrica e suas interações se torna de suma importância, pois poderá colaborar na estimativa de perdas de solo nas áreas em que se quer estudar as perdas por erosão hídrica.

A erodibilidade do solo é a recíproca de sua resistência e representa a sua suscetibilidade de erodir em diferentes taxas, devido às características dos atributos físicos, químicos e mineralógicos (WISCHMEIER & MANNERING, 1969; FOSTER, 1982). Conforme FLANAGAN & NEARINNG (1995), o modelo WEPP considera o fator  $K_i$  para a erodibilidade em entressulcos e o fator  $K_r$  para representar a erodibilidade do solo em sulcos.

Entre os atributos do solo que afetam a erodibilidade em entressulcos, a distribuição de diâmetro das partículas do solo (granulometria) é um dos principais. Quando mais arenosa é a granulometria do solo, maior é a possibilidade dele sofrer erosão, ou seja, maior a facilidade de desagregação das partículas de solo. Por outro lado, solos mais argilosos favorecem uma maior formação de agregados estáveis em água, reduzindo a

erodibilidade do solo (MEYER & HARMON, 1984).

Outro atributo do solo que afeta o fator erodibilidade do solo em entressulcos é o tipo e o teor de óxidos de ferro. A concentração de óxidos de ferro está relacionada com o material de origem, grau intemperismo e com os processos pedogenéticos de acúmulo ou remoção (KÄMPF & CURI, 2003). Segundo ROMKENS et al. (1977) e Azevedo & Bonumá (2004), os óxidos de ferro são agentes de ligações entre os constituintes do solo, na qual favorecem uma maior estabilidade dos agregados e retardam a formação de solo superficial (REICHERT et al., 1992)

A distribuição granulométrica do solo e os óxidos de ferro são atributos que influenciam na estabilidade dos agregados em água, juntamente a outros atributos como a mineralogia da fração argila, a quantidade e a natureza dos cátions, o conteúdo de matéria orgânica, as ações de microorganismos e das raízes. Assim, solos com maiores teores de argila, óxidos e matéria orgânica apresentam agregados mais estáveis e por consequência menor erodibilidade do solo em entressulcos (NUNES & CASSOL, 2008).

Nos modelos que separam a erosão em sulcos e em entressulcos, a erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) representa a constante de proporcionalidade entre as taxas de desagregação do solo e a intensidade de chuva e a erodibilidade do solo em sulcos ( $K_r$ ) é representada pela suscetibilidade à desagregação pelo escoamento superficial concentrado (SCHAFER et al. 2001).

Os objetivos deste trabalho foram avaliar as características hidráulicas do escoamento, quantificar as taxas de desagregação do solo em entressulcos, determinar experimentalmente em laboratório, sob chuva simulada, o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) para o modelo WEPP de um Argissolo Vermelho, e comparar esse valor com os estimados por métodos analíticos.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Candiota, localizado na região da Campanha do estado do Rio Grande do Sul, com coordenadas geográficas de 31° 55' de latitude sul e 53° 67' de longitude oeste. Conforme a classificação de Köppen, o clima da região é mesotérmico, do tipo subtropical úmido, com precipitação pluvial média anual de 1.350 mm, bem distribuída durante o ano, conforme dados dos registros da estação meteorológica de Bagé (EMBRAPA, 2008).

Em quatro locais de uma área da frente de mineração de carvão da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), foram coletadas amostras com estrutura não preservada da camada de 0,00 a 0,20 m de profundidade de um Argissolo Vermelho Eutrófico típico (EMBRAPA, 2006). Nestas amostras, foram avaliados a distribuição do diâmetro das partículas primárias, o diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água, o índice de estabilidade dos agregados, a variação de pH e o teor de ferro de baixa cristalinidade (Tabela 1).

A erosão hídrica dos solos em entressulcos foi determinada em laboratório, sob chuva simulada, em amostras de solo descoberto oriundas dos quatro pontos amostrados (4 repetições). As amostras de solo foram passadas em peneira com abertura de malha de 10 mm e secas ao ar. Foram utilizadas parcelas de formato quadrado com 0,59 m de lado e 0,10 m de profundidade, com bordadura de 0,20 m, mantidas em declividade de 0,09 m m<sup>-1</sup>. O volume das parcelas foi preenchido com uma camada de 2 cm de pedra ( $\varnothing = 1,0$  cm), sobre a qual foi colocada uma camada de 2 cm de areia ( $\varnothing = 0,25$  mm), sendo essas camadas separadas por uma tela plástica de malha de 1 mm. Sobre esta tela foi colocada uma camada de 6 cm de solo seco ao ar, acondicionada com densidade de 1,38 Mg m<sup>-3</sup>.

Para a condição de solo pré-umedecido, o solo da parcela foi saturado por pressão de

10 centímetros de coluna de água (cca), durante a noite, por 18 horas, a fim de obter a mesma tensão de água no solo ao iniciar os testes e para a drenagem da água do solo durante a aplicação da chuva simulada. Durante a aplicação das chuvas simuladas foi aplicada uma tensão de água equivalente a 5,7 cca, mantendo a condição de drenagem nessa mesma tensão.

As chuvas foram aplicadas utilizando um simulador de chuva, construído por SOUZA (1985), de acordo com as especificações apresentadas por MEYER & HARMON (1979), com uma pressão de saída de água no bico de 41 kPa, verificada com o auxílio de um manômetro. As chuvas foram aplicadas durante 90 minutos com intensidade de 85 mm h<sup>-1</sup>.

Durante o tempo de ocorrência das chuvas, amostras do escoamento foram coletadas em potes plásticos com capacidade de 1 L, colocados na calha coletora na extremidade inferior da parcela. Amostras foram coletadas a cada 3 minutos, com amostragens de duração de 1 minuto. Após a coleta os potes foram pesados e adicionado 5 mL de solução de Alúmen de Potássio em concentração de 50 g L<sup>-1</sup>, para sedimentação das partículas. Após 24 horas, o sobrenadante foi succionado e os potes levados para secagem em estufa a 50 °C até peso constante. Essas amostras serviram para determinar a taxa de escoamento total, a descarga líquida total por unidade de largura (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>), a descarga líquida unitária do escoamento (m s<sup>-1</sup>) e as taxas de desagregação de solo (kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) ao longo do tempo de realização do teste.

A descarga líquida total por unidade de largura (q), em m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> foi obtida pela divisão da taxa de escoamento total pela largura da parcela. A descarga líquida unitária do escoamento, em m s<sup>-1</sup>, foi obtida pela divisão da taxa de escoamento total (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) pela área da parcela (m<sup>2</sup>).

As taxas de desagregação em entressulcos do solo ( $D_i$ ) foram determinadas pela expressão:

$$D_i = \frac{M_{ss}}{A D} \quad (1)$$

onde:  $M_{ss}$  é a massa do solo seco contida na amostra (kg);  $A$  é a área da parcela (m<sup>2</sup>);  $D$  é a duração da coleta (s).

Conforme FLANAGAN & NEARINNG (1995), a taxa de desagregação do solo em entressulcos no modelo WEPP, em condições de solo descoberto, é calculada pela seguinte equação:

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

onde:  $D_i$  representa a taxa de desagregação em entressulcos (kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>);  $K_i$  é o fator de erodibilidade em entressulcos (kg s m<sup>-4</sup>);  $I$  representa a intensidade da chuva (m s<sup>-1</sup>);  $S_f$  é o fator de declividade do solo. No modelo WEPP, LIEBENOW et al. (1990) sugerem que o fator declividade do solo seja ajustado pela equação:

$$S_f = 1,05 - 0,85e^{-4\text{sen}\theta} \quad (3)$$

onde:  $\theta$  representa o ângulo do declive (graus).

Com essas informações pode-se determinar o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) utilizado no modelo WEPP (FLANAGAN & NEARING, 1995), pela seguinte expressão:

$$K_i = \frac{D_i}{I^2 S_f} \quad (4)$$

onde:  $K_i$  é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m<sup>-4</sup>);  $D_i$  é a taxa de desagregação do solo em entressulcos (kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>);  $I$  é a intensidade da chuva (m s<sup>-1</sup>);  $S_f$  é o fator de declividade do solo. A taxa de desagregação em entressulcos utilizada na determinação da erodibilidade do solo em entressulcos foi à média das cinco últimas medições efetuadas ao longo dos 90 minutos de chuva. A intensidade da chuva era conhecida (85 mm h<sup>-1</sup>, ou seja, 0,000236 m s<sup>-1</sup>) e o fator  $S_f$  foi ajustado para a declividade de 0,09 m m<sup>-1</sup>.

A velocidade do escoamento superficial foi determinada em intervalos de 5 minutos com a tomada de tempo para que um corante azul de metileno percorresse a distância de 0,4 m entre dois pontos fixos na parcela, sendo expressa em  $m\ s^{-1}$ . De posse destes dados e da temperatura do escoamento líquido, foi determinada a velocidade média do escoamento, altura da lâmina d'água do escoamento, números de Reynolds ( $R_e$ ) e de Froude ( $F_r$ ), viscosidade cinemática da água e a resistência do escoamento superficial representada pelo fator de perda de carga ( $f$ ).

A velocidade média do escoamento foi obtida pela multiplicação da velocidade superficial medida, por um fator de correção ( $\alpha = 2/3$ ), conforme FARENHOST & BRYAN (1995) e KATZ et al. (1995). A altura da lâmina do escoamento (m) foi obtida pela razão entre a descarga líquida total por unidade de largura, em  $m^2\ s^{-1}$  e a velocidade média do escoamento em  $m\ s^{-1}$ , derivada por WOOLHISER & LIGGETT (1967) e SINGH (1983) para fluxo em um plano sob chuva de duração finita.

O número de Reynolds foi determinado conforme descrito pela relação apresentada por SIMONS & SENTURK (1992) e a viscosidade cinética do escoamento ( $m^2\ s^{-1}$ ), que varia de acordo com a temperatura da água, em  $^{\circ}C$ , conforme JULIEN (1995).

O número de Froude ( $Fr$ ) foi determinado conforme descrito por CHOW (1959), como também a resistência ao escoamento superficial, através do fator de perda de carga de Darcy-Weisbach ( $f$ ).

O fator erodibilidade do solo em entressulcos foi também estimado indiretamente por métodos analíticos. Para isto foi necessário determinar a densidade de partículas, a distribuição de diâmetro das partículas primárias e o teor de Fe relativo aos óxidos de Fe de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) e também a determinação do diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados em amostras de solo coletadas na camada de 0,00 – 0,20 m.

A determinação da distribuição do diâmetro das partículas do solo foi realizada pelo método da pipeta descrito por GEE & BAUDER (1986) de acordo com os diâmetros apresentados na Tabela 1, e a determinação dos teores de Fe relativos aos óxidos de Fe de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) pelo método do oxalato de amônio à pH 3 no escuro (SCHWERTMANN, 1964).

O diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados foi determinado utilizando a metodologia descrita por KEMPER & ROSENAU (1986), que utiliza o aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936), conforme descrito por Palmeira et al. (1999). Para esta determinação foi utilizado um conjunto de peneiras com diâmetros de malha de 4,76; 2,00; 1,00; 0,50 0,25 mm, que foram colocadas num agitador vertical semelhante ao de Yoder (1936), com 45 oscilações por minuto e agitação 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. O material inerte foi separado utilizando o dispersante químico hexametáfosfato de sódio com diluição de 10:1 e levados ao agitador de oscilação “vai-vem” por um período de 16 horas.

Para o cálculo da proporção de agregados estáveis em água, foi utilizada a seguinte expressão:

$$Agri = \left[ \frac{Magri - mi}{\sum Magri - mi} \right] \times 100 \quad (5)$$

onde:  $Magri$  é a massa de agregados + material inerte na classe  $i$  em g;  $mi$  é a massa de material inerte (cascalho, areia, raízes, restos de cultura, etc.) na classe  $i$  em g.

Para o cálculo do diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) foi utilizada a seguinte expressão:

$$DMP = \left[ \frac{\sum D Mi \cdot (Magri - mi)}{\sum Magri - mi} \right] \quad (6)$$

onde: DMP é o diâmetro médio ponderado de agregados em mm; DMi é o diâmetro médio da classe i em mm. Magri é a massa de agregados + material inerte na classe i (g) e mi é a massa da material inerte na classe i em g.

O modelo WEPP, conforme proposto por ALBERTS et al. (1995), a erodibilidade do solo em entressulcos para solos que contém 30% ou mais de areia na superfície pode ser estimada utilizando-se a porcentagem de areia muito fina (AMF), de acordo com a seguinte equação:

$$K_{ib} = 2728000 + 19210000 \times AMF \quad (7)$$

onde:  $K_{ib}$  é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $\text{kg s m}^{-4}$ ) e refere-se à erodibilidade básica do solo em entressulcos para uma declividade de  $45^\circ$  e AMF é a fração de areia muito fina na superfície do solo ( $\text{g g}^{-1}$ ). Se a fração AMF for maior que 0,4 ( $\text{g g}^{-1}$ ) deve ser considerado um valor máximo de 0,4 ( $\text{g g}^{-1}$ ) na equação.

A erodibilidade do solo em entressulcos também foi estimada conforme o modelo sugerido por ALBUQUERQUE (1998), que ajustou a seguinte equação:

$$K_{iA} = 7,19 \times 10^5 - (2,2 \times 10^5 \times DMP_{kc}) - (7,2 \times 10^5 \times \Delta pH) + (148 \times M) \quad (8)$$

onde:  $K_{iA}$  é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $\text{kg s m}^{-4}$ );  $DMP_{kc}$  é o diâmetro médio ponderado dos agregados em água (mm);  $\Delta pH$  é a diferença entre o pH em KCl e o pH em água; M é um parâmetro textural de WISCHMEIER et al. (1971) que é determinado pela seguinte equação:

$$M = (Sil + AMF) \cdot (100 - Arg) \quad (9)$$

onde: Sil é o teor silte (%); AMF é o teor de areia muito fina (%); Arg é o teor de argila

(%), sendo todos os teores obtidos com dispersante químico NaOH.

A erodibilidade do solo em entressulcos também foi estimada conforme o modelo sugerido por NUNES & CASSOL (2008). O modelo obtido considera apenas o conteúdo de argila e o teor de Fe extraído com oxalato de amônio ácido ( $Fe_o$ ) e é expresso da seguinte forma:

$$K_{iN} = [1,982 - 8,886 \times 10^{-4} (Arg) - 0,228 (Fe_o)] \times 10^6 \quad (10)$$

onde:  $K_{iN}$  é a erodibilidade do solo em entressulcos ( $\text{kg s m}^{-4}$ ); Arg é o teor de argila obtido por dispersão com NaOH 1N ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e  $Fe_o$  é o teor de ferro extraído com oxalato de amônio (SCHWERTMANN, 1964).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

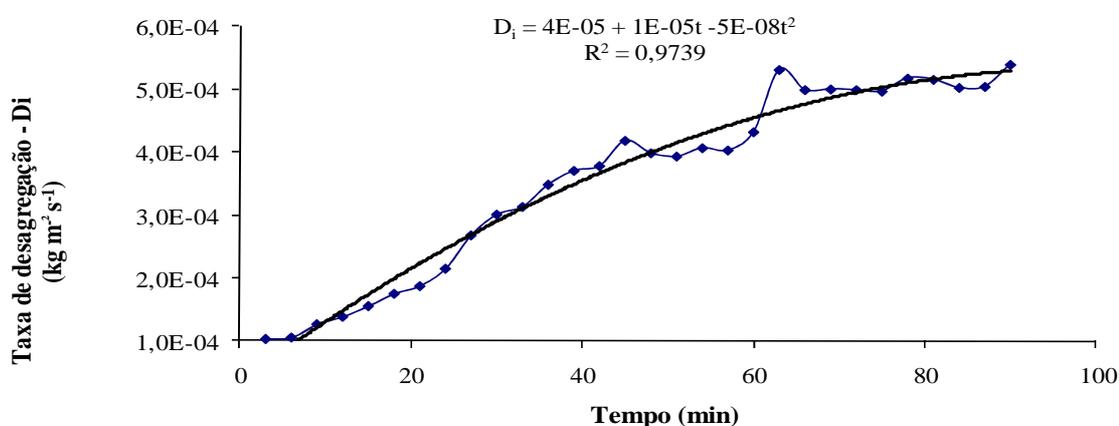
O escoamento superficial foi laminar e de natureza subcrítica, caracterizado pelo número de Reynolds de 14,25 e pelo número de Froude de 0,62 (Tabela 1). Para o escoamento superficial ser considerado laminar, o número de Reynolds deve ser inferior a 500 e, para ser considerado subcrítico, o número de Froude deve ser inferior a 1,0 (GUY et al., 1990). Desta forma pode-se dizer que ocorreu um escoamento característico da erosão em entressulcos.

As menores taxas médias de desagregação de solo em entressulcos ( $D_i$ ) ocorreram no início da chuva, aumentando até em torno de 75 minutos quando tenderam a tornar-se constantes (Figura 1). Por isso, para o cálculo do  $D_i$  médio para a determinação do fator de erodibilidade do solo em entressulcos (Tabela 1) foi utilizada a média dos últimos 15 minutos de chuva simulada (Figura 1).

**Tabela 1** - Taxa média de desagregação ( $D_i$ ), fator erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) e características hidráulicas do escoamento de um Argissolo Vermelho Eutrófico típico determinados em condições de laboratório, com quatro repetições, sob chuva com duração de 90 minutos, intensidade de  $85 \text{ mm h}^{-1}$  ( $I = 0,0000236 \text{ m s}^{-1}$ ) e declividade de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$  ( $S_f = 0,4560$ )

$D_i$ $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$K_i$ $\text{kg s m}^{-4}$	$q_i$ $\text{m s}^{-1}$	$q$ $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	$V_s$ $\text{m s}^{-1}$	$V_m$ $\text{m s}^{-1}$	$h$ $\text{m}$	$\nu$ $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	$R_e$ ----adimensional----	$F_r$	$f$
$4,64 \times 10^{-4}$	$1,82 \times 10^6$	$2,27 \text{ E-}05$	$1,35 \text{ E-}05$	0,068	0,046	0,00031	$9,43 \text{ E-}07$	14,3	0,85	1,21

$q_i$ : descarga unitária do escoamento;  $q$ : descarga líquida total do escoamento por unidade de largura;  $V_s$ : velocidade superficial do escoamento;  $V_m$ : velocidade média do escoamento;  $h$ : altura de lâmina;  $T$ : temperatura;  $\nu$ : viscosidade cinemática do escoamento a temperatura de  $22,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $R_e$ : número de Reynolds;  $F_r$ : número de Froude; e  $f$ : coeficiente de perda de carga do escoamento.



**Figura 1** - Taxa de desagregação de solo em entressulcos em um Argissolo Vermelho submetido à chuva simulada de  $85 \text{ mm h}^{-1}$  em declividade de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$ .

A taxa média de desagregação de solo em entressulcos foi de  $4,64 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Tabela 1) Esse valor para o Argissolo Vermelho estudado foi próximo do valor encontrado por CASSOL et al. (2004) que trabalharam com Argissolo Vermelho Distrófico típico de Eldorado do Sul - RS e por BEZERRA & CANTALICE (2006), que trabalharam com Argissolo Vermelho - Amarelo de Carpina - PE com teores de argila de, respectivamente,  $206,5 \text{ g kg}^{-1}$  e de  $228,0 \text{ g kg}^{-1}$ , próximos do teor de argila do Argissolo estudado.

O valor médio do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) para o Argissolo foi de  $1,82 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$  (Tabela 1). O valor obtido é próximo dos determinados por REICHERT et al. (2001) de  $1,77 \times 10^6$ , por BEZERRA & CANTALICE (2006) de  $1,87 \times 10^6$

e por CASSOL et al. (2004) de  $2,55 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ , que também trabalharam com Argissolos do Rio Grande do Sul. Já Braidá & CASSOL (1996), em um solo com textura mais arenosa obtiveram  $K_i$  de  $5,10 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$  e ROCKENBACH (1992) para um solo com textura franco-arenosa determinou um  $K_i$  de  $3,35 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ .

O fator de erodibilidade do solo em entressulcos é dependente apenas das características intrínsecas do solo, como a textura, características das unidades estruturais. Entretanto, como citado anteriormente, existem variações nos dados de erodibilidade em entressulcos entre autores. Essas variações podem ser função das variações na granulometria dos solos. Contudo, geralmente, a taxa de

desagregação e a erodibilidade do solo nas áreas em entressulcos são menores para os solos de textura mais argilosa, com maior teor

de óxidos de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) e com maior estabilidade de agregados em água.

**Tabela 2** - Características físicas e químicas do Argissolo Vermelho Eutrófico típico, na camada de 0,0 – 0,20 m. Média de 3 repetições

Argila	silte	areia	AMF	AF	AM	AG	AMG	DMP <sub>A</sub>	IEA	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	ΔpH	Fe <sub>o</sub>
			mm										
			g kg <sup>-1</sup>				mm						gkg <sup>-1</sup>
< 0,002	0,05 – 0,002	0,05– 2,00	0,053- 0,105	0,105- 0,250	0,25-0,50	0,50- 1,00	1,00- 2,00						
292,3	269,1	438,7	36,0	153,6	141,9	86,9	20,3	3,04	0,96	4,71	3,84	-0,87	1,01

AMF: areia muito fina; AF: areia fina; AM: areia média; AG: areia grossa; AMG: areia muito grossa; DMP<sub>A</sub>: diâmetro médio ponderado em água; IEA: índice de estabilidade dos agregados; Fe<sub>o</sub>: teor de ferro relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade

Os cálculos para estimativas do fator de erodibilidade do solo em entressulcos pelos métodos analíticos foram realizados utilizando atributos físicos e químicos apresentados na Tabela 2.

Na Tabela 3 é apresentado os valores do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) obtidos por diferentes modelos de determinação indireta. O valor ( $K_{ib} = 3,42 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ ) estimado pela equação utilizada no modelo WEPP superestimou em 1,87 vezes o valor ( $K_i = 1,82 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ ) do fator de erodibilidade do solo em entressulcos obtido experimentalmente em laboratório sob chuva simulada, no presente estudo. Isso pode ter ocorrido pelo fato da equação utilizada no WEPP ter sido desenvolvida para as condições de campo e com base em solos característicos do EUA, sem a inclusão na base de dados solos característicos do Brasil. Isto também foi constatado por NUNES & CASSOL (2008), CANTALICE (2001) e ALBUQUERQUE (1998), que trabalharam com diferentes classes de solos. Assim, pode-se inferir 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, como utilizada no modelo WEPP, sem o apoio de outros atributos que também influenciam na erodibilidade em entressulcos.

O valor ( $K_iA = 1,0 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ ) do fator de erodibilidade do solo em entressulcos obtido pelo modelo de ALBUQUERQUE (1998) subestimou os dados obtidos em laboratório em 1,82 vezes. Fato também observado nos trabalhos de CANTALICE (2001), que trabalhou com um Argissolo Vermelho Distrófico típico de Eldorado do Sul - RS com características semelhantes ao utilizado neste trabalho, e por NUNES & CASSOL (2008), que utilizaram três diferentes Latossolos do Rio Grande do Rio Grande do Sul com classe textural muito argilosa.

Os atributos DMPAKC, teores de argila, silte e areia muito fina e  $\Delta pH_{KCl}$  do solo, que fazem parte do modelo de ALBUQUERQUE (1998), estão dentro da faixa de valores dos solos utilizados por ALBUQUERQUE (1998), para elaborar o modelo. Mesmo assim, esse modelo não foi satisfatório para estimar a erodibilidade em entressulcos para este solo. Isto pode ser devido ao  $\Delta pH$  no modelo sugerido pelo autor, pois conforme NUNES (2006), quanto mais próximo de zero o  $\Delta pH$  menor a erodibilidade do solo em entressulcos.

**Tabela 3** - Valores do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) obtido experimentalmente em laboratório e estimados por equações matemáticas obtidas por análise de regressão, para um Argissolo Vermelho Eutrófico típico

Modelo	Equação utilizada	Fator Erodibilidade $K_i$ ( $\text{kg s m}^{-4}$ )
Chuva simulada em laboratório <sup>1</sup>	$K_i = \frac{D_i}{I^2 S_f} \quad (1)$	$K_i = 1,82 \times 10^6$
Modelo WEPP <sup>2</sup>	$K_{ib} = 2728000 + 19210000 \times AMF \quad (2)$	$K_{ib} = 3,41 \times 10^6$
Modelo de Albuquerque (1998) <sup>3</sup>	$K_{iA} = 7,19 \times 10^5 - (2,2 \times 10^5 \times DMPA_{kc}) - (7,2 \times 10^5 \times \Delta pH) + (148 \times M) \quad (3)$	$K_{iA} = 1,0 \times 10^6$
Modelo de Nunes & Cassol (2008) <sup>4</sup>	$K_{iN} = [1,982 - 8,886 \times 10^{-4} (Arg) - 0,228 (Fe_o)] \times 10^6 \quad (4)$	$K_{iN} = 1,73 \times 10^6$

<sup>(1)</sup>  $K_i$ : fator erodibilidade do solo em entressulcos conforme FLANAGAN & NEARING (1995) para  $D_i = 4,64 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,

$I = 0,0000236 \text{ m s}^{-1}$ ; e  $S_f = 0,4560$

<sup>(2)</sup>  $K_{ib}$ : fator erodibilidade do solo em entressulcos conforme proposto pelo modelo WEPP (ALBERTS et al., 1995), para  $AMF = 0,03595 \text{ g g}^{-1} = 35,95 \text{ g kg}^{-1}$ ;

<sup>(3)</sup>  $K_{iA}$ : fator erodibilidade do solo em entressulcos conforme o modelo sugerido por ALBUQUERQUE (1998) para  $DMPA_{kc} = 3,04 \text{ mm}$ ;  $\Delta pH = -0,87$ ;  $M = 2158,84$

<sup>(4)</sup>  $K_{iN}$ : fator erodibilidade do solo em entressulcos conforme NUNES & CASSOL (2008), para  $Arg = 292,25 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $Fe_o = 1,02 \text{ g kg}^{-1}$ .

NUNES (2006) e ALBUQUERQUE (1998) correlacionaram o parâmetro textural M de WISCHMEIER et al. (1971), com o fator erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ), na qual expressa a influência da distribuição do diâmetro das partículas, obtendo resultados semelhantes ao de ALBUQUERQUE (1998), mostrando que a textura do solo tem uma grande influência no fator  $K_i$ .

O modelo de determinação indireta do fator  $K_i$  que mais se aproximou do valor obtido pela forma direta sob chuva simulada em laboratório ( $1,82 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ ), foi o modelo de NUNES & CASSOL (2008), que estimou o valor do Fator  $K_i$  de  $1,49 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$  (Tabela 3). Este modelo depende do teor de argila e do teor de ferro extraído com oxalato de amônio ácido ( $Fe_o$ ) no escuro. Em relação ao modelo de NUNES & CASSOL (2008), a variação no conteúdo de argila e de óxidos de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) pode explicar até 97,4% da variação na erodibilidade em entressulcos nos solos estudados. Isso pode ser explicado pela presença de um solo mais arenoso dentre os

Latossolos utilizados por NUNES & CASSOL (2008). O Latossolo Vermelho Distrófico da unidade de mapeamento Cruz Alta, segundo a classificação de Brasil (1973), com  $662,5 \text{ g kg}^{-1}$  de areia é mais arenoso que o Argissolo estudado neste trabalho, com  $438,6 \text{ g kg}^{-1}$  e teores de ferro (Tabela 2), que relativamente se aproxima do valor de  $1,57 \text{ g kg}^{-1}$  obtido por NUNES & CASSOL (2008).

Além disso, o solo apresenta-se com uma alta estabilidade de agregados (IEA de 0,96) (Tabela 2), a qual geralmente é atribuída à grande quantidade de óxidos de ferro presente neste solo. NUNES & CASSOL (2008) e VEIGA et al. (1993) afirmam ter obtido uma correlação significativa entre o teor de óxidos de ferro e o fator erodibilidade do solo em entressulcos. Isto deve-se possivelmente aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) serem mais efetivos na estabilidade dos agregados do solo do que os óxidos de ferro cristalinos (ex. goethita e hematita), apesar de normalmente ocorrerem em baixas concentrações.

A redução do fator de erodibilidade do solo em entressulcos com o aumento do teor  $Fe_o$  pode ser devido ao fato desses óxidos apresentarem elevada área superficial específica, atribuída ao seu pequeno tamanho e às irregularidades superficiais, constituindo-se em importantes agentes de ligação entre os constituintes do solo (RÖMKENS et al., 1977) aumentando, dessa forma, a estabilidade dos agregados (AZEVEDO & BONUMÁ, 2004), a qual reduz a erodibilidade do solo em entressulcos.

O fator de erodibilidade do solo em entressulcos foi melhor estimado pela relação que considera o teor de argila e o de óxidos de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ), pois se aproxima mais dos resultados determinados experimentalmente em laboratório sob chuva simulada. Esse modelo é bastante promissor para ser utilizado na estimativa do fator de erodibilidade do solo em entressulcos de uma forma bem menos trabalhosa e dispendiosa. Os atributos necessários são de fácil e rápida obtenção, apenas é necessária a obtenção do teor de argila e do ferro relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade.

## CONCLUSÕES

1. O escoamento superficial determinado foi laminar subcrítico característico do processo de erosão em entressulcos.

2. O valor do fator erodibilidade do solo em entressulcos determinado para o Argissolo Vermelho Eutrófico típico para a camada de 0,0 – 0,2 m é de  $1,82 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ , o qual pode ser utilizado no modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) para predição das perdas de solo por erosão;

3. O uso do teor de areia muito fina (AMF), conforme utilizado no modelo WEPP, não é adequado para estimar a erodibilidade do solo em entressulcos, pois superestima o valor de  $K_i$  obtido experimentalmente;

4. Dos modelos de determinação indireta testados, o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) é melhor estimado

pela equação que considera o teor de argila e de óxidos de ferro de baixa cristalinidade o de óxidos de ferro ( $Fe_o$ ), pois mais se aproxima mais dos resultados determinados em laboratórios.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado, à Companhia Riograndense de Mineração (CRM) pela disponibilização da área de estudo, e à Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) pelo apoio logístico durante as coletas e análises.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. Porto Alegre, 1998. 154f. Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (Tese de Doutorado)

AZEVEDO, A.C. & BONUMÁ, A.S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. *Ci. Rural*, Santa Maria, RS, 34:609-617, 2004.

BEZERRA, S.A. & CANTALICE, J.R.B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo sob cultivo da cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:565-573, 2006.

BRADFORD, J.M., FERRIS, J.E. & REMLEY, P.A. Interrill soil erosion process: I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff and soil

splash detachment. Soil Sci. Soc. Am. J., 51: 1566-1571, 1987.

BRAIDA, J.A. & CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. R. Bras. Ci. Solo, 20:127-134,1996.

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. Porto Alegre, 2001. 140p. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do sul. (Tese de Doutorado)

CASSOL, E.A.; CANTALICE, J.R.B.; REICHERT, J.M. & MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo Franco – Argilo - Arenoso com resíduos vegetais. Pesq. Agropec. Bras., 39: 685-690, 2004.

CHAVES, H.M.L.; SILVA, P.A. & CARLOS, R.J. Aplicação da USLE e SGI na predição da erosão atual e potencial a nível regional. O caso do Vale do São Francisco. In: Anais do XXV Congresso Brasileiro de Ciência do solo, Viçosa, 1996. p.1961-1963.

CHOW, V.T. Open-channel hydraulics. New York:McGraw-Hill, 1959, 680p.

EMBRAPA, Centro Nacional e Pesquisa em Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa-SPI, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistemas de Produção, 3. Bagé, RS: Embrapa Pecuária Sul, 2008. Versão eletrônica capturada em 09/02/2010, disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/>

[FontesHTML/Leite/BovinoLeiteRegiaoSudoesteRioGrandeSul/aspectosecologicos.htm](http://FontesHTML/Leite/BovinoLeiteRegiaoSudoesteRioGrandeSul/aspectosecologicos.htm)

FARENHOST, A. & BRYAN, R.B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. Catena, 25:47-62, 1995.

FLANAGAN, D. & NEARING, M.A. United States Department of Agriculture–USDA: Water erosion prediction project. West Lafayette, National Soil Erosion Research Laboratory – NSERL, 1995. (Technical Documentation, 10).

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HANN, C. T. (Ed.) Hydrologic modeling of small watersheds. St. Joseph: Transactions of ASAE, 1982. p.297-380 (Monograph, 5).

FOSTER, G.R.; YOUNG, R.A.; RÖMKENS, M.J.M. & ONSTAD, C.A. Process of soil erosion by water. In: Follet, R. F. and Stewart, B. A. Soil erosion and crop productivity. ASA-CSSA-SSSA, 1985, South Segoe Road, Madison, USA.

GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle size analysis. In: KLUTE, A. (ed.). Methods of Soil Analysis, 2.ed. Madison, Wisconsin USA: American Society of Agronomy, Soil Science, 1986. p.383-411.

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 University Press, 1995. 280p.

KAMPF, N. & CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: Tópicos em Ciência do Solo. Ed. UFV, 2003, v.3, p. 1-54.

KATZ, D.M.; WATTS, F.J. & BURROUGHS, E.R. Effects of surface roughness and rainfall impact on overland flow. Journal of Hydraulics of

Am. Soc. Civil Engineering, v.121, p.547-553, 1995.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 425-441.

LIEBENOW, A.M.; ELLIOT, W.J.; LAFLEN, J.M.; KOHL, K.D. et al. Interrill erodibility: collection and analysis of data from cropland soils. *Transactions of ASAE*. 33, p. 1882-1888, 1990.

MEYER, L.D. & HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. *Transactions of ASAE*, 22:100-103, 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.; FOSTER, G.R. & ROMKENS, M.J.M. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: *Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*. Washington, USDA, 1975. p. 177-189.  
NUNES, M.C.M. *Erosão Hídrica em Entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 2006. 160p. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do sul. (Tese de Doutorado)

NUNES, M.C.M. & CASSOL, E.A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2839-2845, 2008.

PALMEIRA, P.R.T., PAULETTO, E.A., TEIXEIRA, C.F.A., GOMES, A. da S., SILVA, J.B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v. 23, p. 189-195, 1999.

R. Bras. Agrocência, Pelotas, v.18 n. 2-4, p175-187, 2012.

REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, Campinas, SP, v.16, p. 289-298, 1992.

REICHERT, J.M.; SCHÄFER, M.J.; ELTZ, F.L.F. & NORTON, L.D. Erosão em sulcos e entressulcos em razão do formato de parcela em Argissolo Vermelho-Amarelo arênico. *Pesq. Agropec. Bras.*, v. 36, n. 7, p. 965-973, 2001

ROCKENBACH, C.A. *Erosão em entressulco sob diferentes coberturas por resíduos de trigo em um solo Podzólico Vermelho-Amarelo sob chuva simulada*. Porto Alegre, 1992. 108p. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do sul. (Dissertação de Mestrado)

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.

SCHAFER, M.J.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A.; ELTZ, F.L.P. & REINERT, D.J. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, v.25, p.419-430, 2001.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisen oxide des bodens durch extraktion unit saurer ammoniumoxalat-losung. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd*, 1964. p.194-202.

SIMONS, D.B. & SENTURK, F. Sediment transport technology: water and sediment dynamics. In: *Water resources publications*. [Colorado], [s.ed.], 1992. 897p.

SINGH, V.P. Analytical solutions of cinematic for erosion on a plane: II Rainfall of finite duration. *Adv. Water Res.*, 6:88-95, 1983.

SOUZA, M.D. *Infiltração de água em Latossolo Roxo distrófico submetido a diferentes*

FRANCO et al. Erodibilidade do solo em entressulcos determinada experimentalmente e por modelos matemáticos...

manejos. Porto Alegre, 1985. 131p. Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do sul. (Dissertação de Mestrado).

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. & MANNERING, J.V. Relation of soil properties to its erodeability. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 33:131-137, 1969.

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.