



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbc.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

Cantalice, José Ramon Barros; Cassol, Elemer Antonino; Reichert, José Miguel; Borges, Ana Luiza de
Oliveira

HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SULCOS EM SOLO
FRANCO-ARGILO-ARENOSO

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 29, núm. 4, 2005, pp. 597-607

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214035012>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

SEÇÃO VI - MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA

HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SULCOS EM SOLO FRANCO-ARGILO-ARENOSO⁽¹⁾

José Ramon Barros Cantalice⁽²⁾, Elemar Antonino Cassol⁽³⁾,
José Miguel Reichert⁽⁴⁾ & Ana Luiza de Oliveira Borges⁽⁵⁾

RESUMO

A erosão em sulcos caracteriza-se pelo escoamento superficial concentrado de uma lâmina d'água com tensão de cisalhamento suficiente para desagregar o solo, que deforma o sulco e altera as características hidráulicas do escoamento responsável pela dinâmica de formação dos sulcos. Os objetivos deste trabalho foram: avaliar as condições hidráulicas do escoamento em sulcos de erosão, que podem fornecer subsídios importantes às relações de erosão, e determinar as taxas de desagregação do solo, a erodibilidade do solo e a tensão crítica de cisalhamento, além de quantificar o transporte de sedimentos em sulcos por meio de expressões baseadas em variáveis hidráulicas. Para tanto, sulcos foram pré-formados em um solo de textura franco-argilo-arenosa, num campo com declive médio de $0,067 \text{ m m}^{-1}$, e submetidos à aplicação de chuva simulada com intensidade de 74 mm h^{-1} , durante 80 min, tendo sido aplicados nos sulcos, nos últimos 20 min, fluxos extras de escoamento superficial de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 L min^{-1} . Os resultados mostraram que o regime de escoamento nos sulcos caracterizou-se como sendo de transição subcrítico a turbulento subcrítico. As taxas de desagregação do solo obtidas foram lineares às tensões de cisalhamento desenvolvidas, para uma erodibilidade em sulcos (K_s) de $0,0024 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e uma tensão crítica de cisalhamento (τ_c) de 2,75 Pa. Duas funções baseadas na potência do escoamento foram ajustadas para estimar o transporte de sedimentos nos

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, realizada sob a orientação do segundo autor, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, com recursos do Projeto FINEP-CNPq-PRONEX-Solos (46.61.00/2001-9) e da FAPERGS. Recebido para publicação em agosto de 2003 e aprovado em abril de 2005.

⁽²⁾ Professor Adjunto do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. CEP 52171-900 Recife (PE). E-mail: cantalic@terra.com.br

⁽³⁾ Professor Adjunto do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal, 15100, CEP 91540-000 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: cassolea@orion.ufrgs.br

⁽⁴⁾ Professor Titular do Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: reichert@ccr.ufsm.br

⁽⁵⁾ Professora Adjunta do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. E-mail: alborges@iph.ufrgs.br

sulcos de erosão, as quais explicaram 53 % da variação experimental, refletindo não só a dificuldade de ajuste de modelos de estimativa do transporte sólido às lâminas de escoamento pouco espessas que ocorrem nas áreas de cultivo agrícola, mas também a diversidade física e mineralógica das partículas e dos agregados do solo estudado.

Termos de indexação: erodibilidade em sulcos, processo erosivo, modelagem da erosão, sedimentologia, regimes de escoamento.

SUMMARY: FLOW HYDRAULICS AND SEDIMENT TRANSPORT IN RILLS OF A SANDY CLAY LOAM SOIL

Rill erosion is characterized by concentrated surface water flow, with enough shear stress and detachment capacity to deform the rill and alter flow hydraulics, responsible for rill formation dynamics. The objective of this study was to evaluate flow hydraulic conditions that can provide important information on erosion relationships, soil erodibility and sediment transport in furrows of a recently-tilled Palleudult. Rills were pre-formed in a sandy clay loam soil with an average slope of 0.067 m m⁻¹. Simulated rainfall with an intensity of 74 mm h⁻¹ was applied during 80 min, while rainfall and extra inflows of 0, 10, 20, 30, 40, and 50 L min⁻¹ were jointly applied for the last 20 min of each run in the rill. Results indicated that the rill flow regime varied from transitional subcritical to turbulent subcritical. The rill erosion detachment rates were linear to shear stress. Rill erodibility (Kr) was 0.0024 kg⁻¹ s⁻¹ N and critical shear stress (τ_c) was 2.75 Pa. Two functions to predict sediment transport based on stream power explained 53% of data variability, which indicates the inherent difficulty of predicting solid transport through shallow flows on eroding agricultural lands, and the physical and mineralogical diversity of particles and aggregates of the studied soil.

Index terms: rill erodibility, erosion processes, erosion modeling, sedimentology, flow regimes.

INTRODUÇÃO

A erosão em sulcos constitui a segunda fase evolutiva do processo físico da erosão hídrica do solo, que é marcada pela mudança da forma do escoamento. De difuso, sobre a superfície do solo, na fase inicial da erosão em entressulcos, tal processo concentra-se, na segunda fase, em pequenas depressões da superfície do solo chamadas de sulcos de erosão. Quando isso ocorre, a lâmina de escoamento desenvolve maior tensão de cisalhamento pelo aumento de espessura, elevando, portanto, a capacidade do escoamento em desagregar o solo. Em condições naturais, esses pequenos canais ocorrem de forma espaçada e aleatória, formando uma rede de canais que pode desagregar e transportar grande quantidade de solo.

As incisões no solo, que dão origem aos sulcos, têm início quando a tensão de cisalhamento supera as condições de resistência ao início de movimento, característica da camada superficial do solo. O balanço entre a força erosiva do fluxo e a resistência à erosão das partículas do solo determina a taxa de desagregação (Rauws & Govers, 1988).

A partir de observações em lâminas de escoamento ensaiadas em laboratório, com descargas

líquidas constantes de $4,183 \times 10^{-5}$ a $6,97 \times 10^{-5}$ m² s⁻¹, sobre parcelas com um solo de textura franco-arenosa, Merritt (1984) identificou quatro estádios no desenvolvimento de sulcos incipientes, chamados, pela autora, de microsulcos. O primeiro estágio de escoamento difuso foi classificado de escoamento laminar, com o número de Reynolds (R_e) = 100. No segundo estágio, embora o escoamento já se tenha concentrado em diminutos canais de ocorrência casual e tenha ocorrido aumento da rugosidade, o regime também foi laminar com o número de Reynolds = 180. No terceiro e quarto estádios, o escoamento já se concentrou em canais bem definidos, embora muito pequenos, com números de Reynolds, respectivamente, de 460 e 840, caracterizando o regime de transição. No quarto estágio, os sulcos incipientes apresentaram incisões na forma de V nos taludes, caracterizando o aparecimento dos “headcuts”, processo denominado por Merten (2000) erosão regressiva. O escoamento, em todos os estádios foi supercrítico, ou seja, com o número de Froude (F_r) > 1.

O número de Froude tem sido proposto como uma constante relacionada com a formação de sulcos. Quando o escoamento alcançar um número Froude de 1,2, tem início a formação dos sulcos para solos arenosos (menos coesos), e de 2,8, para solos de

textura mais argilosa (mais coesos) (Slattery & Bryan, 1992).

Sulcos de erosão apresentam variação morfológica no tempo e no espaço. O fundo e as paredes do sulco variam de geometria quando o solo é erodido, alterando as características hidráulicas do escoamento, as quais são responsáveis pela dinâmica de formação dos sulcos (Lei et al., 1998). A necessidade do conhecimento das relações hidráulicas e da morfologia dos sulcos, para determinar a capacidade de desagregação e transporte neste escoamento, levou à utilização da prática de conduzir os sulcos por meio da pré-formação, os quais, dessa forma, são expostos à ação cisalhante do escoamento, como preconizam Laflen & Thomas (1987) e Elliot et al. (1989). Essa prática implica alguma perda de informação, mas reproduz as condições hidráulicas de um sulco bem desenvolvido.

A erodibilidade em sulcos (K_r) de um solo é representada pela susceptibilidade à desagregação pelo escoamento superficial concentrado (Schäfer et al., 2001). No modelo WEPP – Water Erosion Prediction Project, Flanagan & Nearing (1995) consideram que a erodibilidade do solo em sulcos é determinada a partir da relação entre taxas de desagregação em sulcos e tensão cisalhante do fluxo, dada pela seguinte expressão:

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \quad (1)$$

em que D_r = taxa de desagregação em sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), K_r = erodibilidade do solo em sulcos ($\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$ ou s m^{-1}), τ = tensão cisalhante do fluxo (N m^{-2} ou Pa) e τ_c = tensão crítica de cisalhamento do solo (N m^{-2} ou Pa). A erodibilidade em sulcos consiste no coeficiente angular b da reta que relaciona as taxas de desagregação (D_r) com a tensão cisalhante do fluxo. A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) corresponde ao valor do intercepto de τ , quando $D_r = 0$, ou a partir da relação dos coeficientes da reta: $\tau_c = -a/b$ (Laflen & Thomas, 1987). A expressão (1) é admitida para a condição na qual a capacidade de transporte do escoamento seja muito superior à carga de sedimentos. Nesse caso, a taxa de desagregação do escoamento em sulcos é muito semelhante à capacidade de desagregação em sulcos.

Nesse contexto, os objetivos deste trabalho foram: avaliar as condições hidráulicas do escoamento em sulcos e caracterizar o regime de escoamento sob condições de sulcos pré-formados sobre solo recém-preparado, que podem fornecer subsídios importantes às relações de erosão; determinar as taxas de desagregação, a erodibilidade em sulcos e a tensão crítica de cisalhamento do solo em estudo; quantificar o transporte de sedimentos em sulcos de erosão pré-formados em solo recentemente preparado por meio de expressões baseadas em variáveis hidráulicas do escoamento em sulcos.

MATERIAL E MÉTODOS

Instalação e realização do experimento

O experimento foi realizado na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS), localizada no município de Eldorado do Sul com latitude de $30^\circ 05' \text{S}$ e longitude de $51^\circ 39' \text{O}$ a Oeste de Greenwich, no terço médio de uma pendente com declive médio de $0,067 \text{ m m}^{-1}$. A área é constituída de um Argissolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 1999), com um horizonte A moderado textura franco-argilo-arenosa para $0,595 \text{ kg kg}^{-1}$ de areia, $0,2065 \text{ kg kg}^{-1}$ de argila e $0,1980 \text{ kg kg}^{-1}$ de silte, e um horizonte B textural profundo e moderadamente drenado (Castro, 1998).

Em meados de dezembro de 1998, toda a área experimental foi preparada, no sentido do declive, com uma aração, efetuada com arado de três discos, e duas gradagens, com grade de discos. Em seguida, foram instaladas as parcelas experimentais com 7 m de comprimento orientadas no sentido do declive e 0,7 m de largura, delimitadas lateralmente pela colocação de chapas metálicas de Zn com 0,3 m de altura, dos quais 0,15 m foi enterrado. Dezoito sulcos foram pré-formados, divididos em três blocos de seis sulcos cada, constituindo um delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições. Os sulcos foram construídos um implemento provido de cabo e uma extremidade cortante de formato triangular. A seção transversal dos sulcos recém-formados media aproximadamente $0,0125 \text{ m}^2$ ($0,05 \text{ m}$ de altura por $0,50 \text{ m}$ de base triangular invertida).

Os testes experimentais tiveram a duração de 80 min. Durante os 60 min iniciais, foi aplicada uma chuva simulada, com intensidade média de 74 mm h^{-1} , que gerou uma vazão de aproximadamente 5 L min^{-1} , utilizando-se o simulador de chuvas tipo rotativo, semelhante ao desenvolvido por Swanson (1965), descrito e calibrado por Cassol & Guerra (1978). A intensidade média das chuvas simuladas aplicadas foi aferida pela colocação de 20 pluviômetros na área experimental ao lado dos sulcos. Nos últimos 20 min que se seguiram a essa primeira hora, ainda sob chuva simulada, foram aplicados os seguintes tratamentos de fluxo extra: 0, 10, 20, 30, 40 e 50 L min^{-1} em cada sulco. A água do fluxo extra foi conduzida aos sulcos, por gravidade e por meio de mangueira calibrada, proveniente de um reservatório com capacidade de 500 L, mantido sob carga constante. Na extremidade superior dos sulcos, foram enterrados dissipadores de energia na forma de recipientes metálicos retangulares ($0,15 \text{ m}$ de comprimento x $0,10 \text{ m}$ de largura e $0,05 \text{ m}$ de altura), de tal forma que a borda superior do recipiente ficou ao nível da superfície do solo. Nesses recipientes, foram introduzidas as mangueiras condutoras de água, que alimentavam os sulcos pelo transbordamento desses recipientes. As

extremidades inferiores dos sulcos foram providas de calhas condutoras de sedimentos acopladas a canos de PVC, com 100 mm de diâmetro, que conduziram a descarga líquida e todo solo desagregado ao ponto de coleta nas extremidades inferiores.

As análises de variância dos resultados e o teste de médias (teste de Duncan), bem como as análises de regressão, foram realizadas por meio dos programas estatísticos Genstat e Sigmastat, e os ajustes de curvas por meio do TableCurve.

Caracterização hidráulica do escoamento nos sulcos pré-formados

As dimensões das seções transversais do fluxo nos sulcos foram aferidas por meio de um perfilômetro, objetivando-se a determinação da área, perímetro molhado, raio hidráulico e altura da lâmina de escoamento. O perfilômetro constituiu-se de 40 hastes plásticas espaçadas de 0,02 m e acopladas a uma estrutura retangular de acrílico com 0,8 m de comprimento e 0,4 m de altura. As medições foram realizadas antes, imediatamente após o início do escoamento provocado pela chuva, aos 58 min (2 min antes da aplicação dos fluxos extras), entre os 70 e 78 min (10 e 18 min após a aplicação dos fluxos extras) e após a finalização dos testes. As medidas foram tomadas a 1,0 e 4,0 m da extremidade superior dos sulcos. As formas da seção transversal dos sulcos foram, então, retratadas em cartolinas. A partir da conformação dos sulcos nas cartolinas, obtiveram-se suas respectivas áreas com o auxílio de um planímetro e os perímetros molhados por meio de um curvímetro. Com essas dimensões, foi determinado o raio hidráulico dos sulcos pela seguinte relação:

$$R_h = \frac{A}{P_m} \quad (2)$$

sendo R_h = raio hidráulico da seção transversal (m), A = área da seção transversal (m^2) e P_m = perímetro molhado da seção transversal (m).

A declividade dos sulcos foi tomada pela variação de altura entre dois pontos de distância determinada nos sulcos e expressa em $m \cdot m^{-1}$. A velocidade superficial dos escoamentos gerados ($m \cdot s^{-1}$) foi tomada de 10 em 10 min, a partir da formação da lâmina de escoamento, por meio da cronometragem do tempo gasto para que o corante azul de metileno percorresse a distância dos 5 m centrais dos sulcos. Esses valores de velocidade superficial medidos foram multiplicados por um fator de correção $\alpha = 0,6$, para obter a velocidade média do escoamento, tendo em vista a distribuição do perfil de velocidade nos sulcos. Esse valor tem sido utilizado e recomendado por diversos autores (Abrahams et al., 1986; Slattery & Bryan, 1992; Braida & Cassol, 1996).

As taxas de descarga ($m^3 \cdot s^{-1}$) foram determinadas pela medição do volume de enxurrada coletado em provetas durante um tempo cronometrado, simultaneamente à tomada das velocidades superficiais do escoamento, e divididas pelo perímetro molhado dos sulcos para expressão em ($m^2 \cdot s^{-1}$). Para definir as condições hidráulicas do escoamento nos sulcos pré-formados e de sua interação com a superfície do solo, foram determinadas algumas características hidráulicas, descritas em Simons & Senturk (1992), e apresentadas a seguir.

O número de Reynolds foi determinado pela relação:

$$R_e = \frac{VR_h}{\nu} \quad (3)$$

em que R_e = número de Reynolds (adimensional), V = velocidade média do escoamento ($m \cdot s^{-1}$), R_h = raio hidráulico (m) e ν = viscosidade cinemática da água ($m^2 \cdot s^{-1}$). Como a viscosidade cinemática varia conforme a temperatura, determinou-se a temperatura da água em $^{\circ}C$ em cada ensaio. A viscosidade cinemática da água foi determinada de acordo com a temperatura (T , em $^{\circ}C$), conforme a expressão dada por Julien (1995):

$$\nu = [1,14 - 0,031 (T - 15) + 0,00068 (T - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (4)$$

A temperatura da água nos testes de campo foi de $33^{\circ}C$, por conseguinte, a viscosidade cinemática (ν) foi tomada como uma constante de $8 \times 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$.

O número de Froude (Fr) foi obtido pela expressão:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot R_h}} \quad (5)$$

em que V = velocidade média do escoamento ($m \cdot s^{-1}$), g = aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$) e R_h = raio hidráulico (m).

A velocidade de cisalhamento (U^*) foi determinada pela expressão abaixo, de acordo com Simons & Senturk (1992):

$$U^* = \sqrt{g R_h S} \quad (6)$$

em que g = aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$), R_h = raio hidráulico (m) e S = declive do fundo do sulco ($m \cdot m^{-1}$). Nesse caso, está-se admitindo que a declividade do fundo do sulco é igual à declividade da linha d'água.

O número de Reynolds de partícula (R_{e^*}) foi calculado pela expressão:

$$R_{e^*} = \frac{U^* d}{\nu} \quad (7)$$

em que d = diâmetro representativo do material que constitui o solo, correspondente ao d_{65} , de acordo com Einstein (1950).

A rugosidade dos sulcos foi medida pelo coeficiente de rugosidade de Manning, obtido a partir da expressão:

$$n = \frac{R_h^{2/3} S^{1/2}}{V} \quad (8)$$

em que n = coeficiente de rugosidade de Manning ($s \cdot m^{-1/3}$), R_h = raio hidráulico (m), S = declive do sulco ($m \cdot m^{-1}$) e V = velocidade média do escoamento ($m \cdot s^{-1}$).

Quantificação das taxas de desagregação e determinação da erodibilidade do solo em sulcos

As taxas de desagregação do solo nos sulcos foram obtidas a partir da coleta da enxurrada em potes plásticos, colocados na extremidade inferior da calha coletora para se determinar, no laboratório, a concentração de solo e de água na enxurrada. As medições de volume da enxurrada e a amostragem para concentração de sedimentos foram efetuadas de 3 em 3 min até os 60 min de teste e de 2 em 2 min dos 60 aos 80 min de teste.

A partir da massa de solo seco e da duração das coletas, determinaram-se as taxas de descarga sólida, em $kg \cdot s^{-1}$. Por fim, as taxas de desagregação de solo nos sulcos foram obtidas pela seguinte relação:

$$D_r = \frac{Q_s \cdot C}{L \cdot P_m} \quad (9)$$

em que D_r = taxa de desagregação do solo nos sulcos ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), Q_s = descarga líquida ($L \cdot s^{-1}$), C = concentração de sólidos no escoamento ($kg \cdot L^{-1}$), P_m = perímetro molhado (m) e L = comprimento do sulco (m).

A erodibilidade do solo em sulcos foi determinada pela análise de regressão entre os valores médios da tensão de cisalhamento (τ) e de desagregação do solo (D_r) obtidos para cada vazão aplicada. A tensão cisalhante média do escoamento (τ) foi obtida pela expressão:

$$\tau = \gamma R_h S \quad (10)$$

em que τ = a tensão cisalhante (Pa), γ = peso específico da água ($N \cdot m^{-3}$), R_h = raio hidráulico do sulco (m) e S = declive do sulco ($m \cdot m^{-1}$). Portanto, a erodibilidade em sulcos (K_r) consistiu-se no coeficiente b da reta que relaciona as taxas de desagregação (D_r) com a tensão cisalhante do fluxo (τ). A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) correspondeu ao valor do intercepto de τ , quando $D_r = 0$, ou a partir da relação dos coeficientes da reta: $\tau_c = -a/b$ (Lafren & Thomas, 1987).

A distribuição acumulada de diâmetro das partículas do sedimento erodido nos sulcos foi obtida de acordo com Simons & Senturk (1992) a partir da coleta de quatro amostras, durante os 60 min iniciais, e de duas amostras, nos 20 min finais.

Assim, obtiveram-se os índices d_{50} e d_{65} , que são parâmetros importantes para as relações hidráulicas no transporte de sedimentos.

Avaliação do transporte sólido nos sulcos pré-formados em solo recém-preparado

Para quantificar o transporte sólido ocorrido nos sulcos de erosão, realizaram-se dois ajustes aos dados de descarga sólida obtidos. Inicialmente, as descargas sólidas, obtidas no escoamento em sulcos pré-formados em solo recém-preparado, foram ajustadas pela potência do escoamento, utilizando-se a variável hidráulica conhecida como potência do escoamento (Ω), conforme a expressão (11) (Govers, 1990; Nearing et al., 1997):

$$\Omega = \rho_w g S q \quad (11)$$

sendo Ω = potência do escoamento expressa em $kg \cdot s^{-3}$, ρ_w = densidade da água em $kg \cdot m^{-3}$, g = aceleração da gravidade em $m \cdot s^{-2}$, S = declive em $m \cdot m^{-1}$ e q = descarga líquida em $m^2 \cdot s^{-1}$; mas na forma de uma função logística desenvolvida por Nearing et al. (1997) dada por:

$$\log(q_s) = -34,47 + \frac{36,61e^{0,845+0,412\log(\Omega)}}{1 + e^{0,845+0,412\log(\Omega)}} \quad (12)$$

em que q_s = descarga sólida em $g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1}$, Ω = potência do escoamento expressa em $g \cdot s^{-3}$, e = base do logaritmo natural. A potência do escoamento (Ω) é obtida pela equação (11), em que ρ_w = densidade da água em $kg \cdot m^{-3}$, g = aceleração da gravidade em $cm \cdot s^{-2}$, S = declive em $m \cdot m^{-1}$ e q = descarga líquida em $cm^2 \cdot s^{-1}$. A expressão (12) foi desenvolvida com base em resultados de experimentos de campo e de laboratório com dois solos, sendo um com 8,4 % de areia, 76 % de silte e 15,6 % de argila e o outro solo com 65,5 % de areia, 19,6 % de silte e 14,8 % de argila; portanto, de composição granulométrica bastante distinta do solo do presente estudo. Num segundo momento, as descargas sólidas obtidas foram ajustadas pela potência do escoamento de acordo com a expressão (11) a várias funções matemáticas, para mais adequada expressão do transporte de sedimentos ocorrido nos sulcos de erosão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização hidráulica do escoamento nos sulcos em solo descoberto e recém-preparado

Todas as características hidráulicas dos escoamentos gerados pela aplicação dos diferentes fluxos extras de água nos sulcos, construídos em solo recém-preparado, estão apresentadas no quadro 1. As velocidades médias do fluxo superficial de água obtidas elevaram-se em taxas decrescentes com as

Quadro 1. Características hidráulicas do escoamento em sulcos, obtidas em solo franco-argilo-arenoso, recém-preparado: descarga líquida (Q), velocidade média (Vm), área (A), perímetro molhado (P_m), raio hidráulico (R_h), declive, número de Reynolds (R_e), número de Froude (F_r), coeficiente de rugosidade de Manning (n), Reynolds da partícula (Re*), diâmetro da partícula (d₆₅), velocidade de cisalhamento (U*), concentração média de sedimentos na enxurrada (C) e tensão cisalhante do escoamento (τ). Valores médios de três repetições em quatro momentos durante a aplicação dos fluxos extras ao escoamento superficial proporcionado pela chuva simulada

Variável hidráulica	Fluxo extra aplicado (L min ⁻¹) ⁽¹⁾					
	5 + 0	5 + 10	5 + 20	5 + 30	5 + 40	5 + 50
Q (L s ⁻¹)	0,086	0,217	0,488	0,499	0,618	0,738
V _m (m s ⁻¹)	0,141	0,219	0,244	0,245	0,277	0,315
A (m ²)	0,00129	0,00248	0,00328	0,0047	0,0058	0,00743
P _m (m)	0,1321	0,1715	0,2183	0,2507 ⁽²⁾	0,2790 ⁽²⁾	0,3158
R _h (m)	0,0097	0,0144	0,0150	0,0188 ⁽³⁾	0,0208 ⁽³⁾	0,0235
Declive (m m ⁻¹)	0,066	0,067	0,061	0,067	0,068	0,068
R _e	1.710	3.888	4.538	5.711	7.228	8.901
F _r	0,46	0,57	0,63	0,57	0,62	0,63
n	0,084	0,067	0,061	0,075	0,070	0,070
Re*	27,35	39,83	21,23	47,04	48,85	52,19
d ₅₀ (m)	2,38 x 10 ⁻⁴	2,50 x 10 ⁻⁴	1,28 x 10 ⁻⁴	2,79 x 10 ⁻⁴	2,67 x 10 ⁻⁴	2,70 x 10 ⁻⁴
d ₆₅ (m)	2,70 x 10 ⁻⁴	3,39 x 10 ⁻⁴	1,53 x 10 ⁻⁴	3,39 x 10 ⁻⁴	3,34 x 10 ⁻⁴	3,34 x 10 ⁻⁴
U* (m s ⁻¹)	0,081	0,094	0,111	0,111	0,117	0,125
C (kg L ⁻¹)	0,0685	0,0753	0,0517	0,0872	0,0824	0,0886
τ (Pa)	6,53	8,71	8,92	12,29	13,80	15,59

⁽¹⁾ A chuva simulada média de 74 mm h⁻¹, simultaneamente aplicada ao fluxo extra nos sulcos, acrescia aproximadamente a vazão 5 L min⁻¹. ⁽²⁾ Determinado pela equação (15) (P_m = 0,3362 Q^{0,384}). ⁽³⁾ Determinado pela equação (14) (R_h = 0,026 Q^{0,458}).

descargas líquidas para aplicação das crescentes vazões extras aplicadas, ajustando-se, dessa forma, ao modelo de potência apresentado na figura 1, qual seja:

$$V_m = 0,326 Q^{0,3254} \quad R^2 = 0,933 \quad (13)$$

em que V_m = velocidade média do escoamento (m s⁻¹) e Q = descarga líquida dos sulcos (L s⁻¹). Essa mesma relação entre a velocidade média do escoamento e a descarga líquida foi estabelecida por Giasson & Cassol (1996) que encontraram um expoente de 0,27 e um coeficiente *a* de 0,11 para descarga líquida expressa em L min⁻¹. Esses aumentos das descargas líquidas obtidas resultaram das crescentes tensões de cisalhamento do escoamento obtidas, as quais deformaram a seção transversal dos sulcos, atestada pelo aumento do raio hidráulico, que, por sua vez, possibilitou reduções da rugosidade hidráulica (n) ao escoamento e, conseqüentemente, os incrementos da velocidade média do escoamento. O aumento do raio hidráulico, em decorrência das taxas de descarga líquida, também ajustou-se numa relação de potência abaixo:

$$R_h = 0,026 Q^{0,458} \quad R^2 = 0,982 \quad (14)$$

em que R_h = raio hidráulico da seção transversal do escoamento nos sulcos (m) e Q = descarga líquida (L s⁻¹). A evolução do raio hidráulico dos sulcos

também foi atestada pela sua relação com a área dos sulcos (Figura 2) em um ajuste de potência, o que, em última análise, determina a grandeza das tensões de cisalhamento sobre os sulcos. Braida & Cassol (1996) determinaram um valor de 0,531, para o expoente da relação apresentada na figura 2, e verificaram uma variação na literatura de 0,51 a

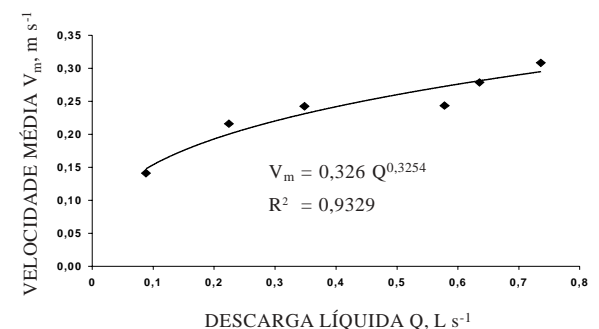


Figura 1. Relação potencial da velocidade média do escoamento com as descargas líquidas médias, obtidas com a aplicação dos fluxos extras ao escoamento superficial gerado pela chuva simulada, em sulcos pré-formados em solo franco-argilo-arenoso recém-preparado.

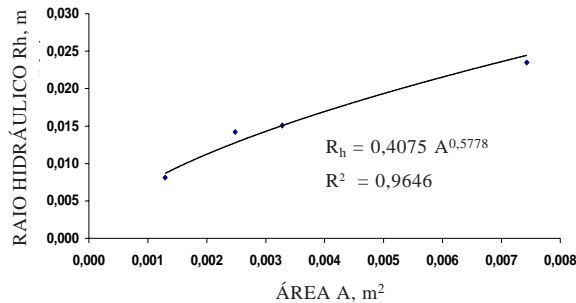


Figura 2. Variação do raio hidráulico de acordo com a área da seção transversal dos sulcos pré-formados no solo franco-argilo-arenoso recém-preparado, ajustada ao modelo de potência para os fluxos extras aplicados ao escoamento superficial gerado pela chuva simulada.

0,57, para esse expoente. Da mesma forma que o raio hidráulico, o P_m = perímetro molhado (m) também evoluiu potencialmente de acordo com o aumento da descarga líquida (Q), o que foi atestado pela equação ajustada:

$$P_m = 0,3362 Q^{0,384} \quad R^2 = 0,968 \quad (15)$$

Para os sulcos sem adição de fluxo extra, apenas com a vazão da água produzida pela chuva simulada (5 L min^{-1}), o regime de escoamento foi de transição subcrítico, com o número de Reynolds de 1.710 e o de Froude < 1 . Para os tratamentos com fluxos extras de 10 a 50 L min^{-1} (todos adicionados aos 5 L min^{-1} proporcionados pela chuva simulada), os regimes de escoamento foram turbulentos subcríticos, com número de Reynolds entre 4.000 e 9.000 e número de Froude < 1 . Schäfer et al. (2001) encontraram regimes de escoamento semelhantes para sulcos pré-formados em diferentes sistemas de preparo de solo e estados de consolidação do solo.

Os valores do Reynolds da partícula (Re^*) entre 20 e 52 apontaram um escoamento em uma superfície com rugosidade de transição para todos os tratamentos, conforme Simons & Senturk (1992). A rugosidade hidráulica dos sulcos, determinada por meio do coeficiente de Manning (n) (Quadro 1), representa conjuntamente a rugosidade das partículas e agregados do solo (n) e a rugosidade de forma (n'') dos sulcos, para os fluxos extras de 10, 20, 30, 40 e 50 L min^{-1} , aplicados nos sulcos em solo recém-preparado. No âmbito da hidráulica fluvial, esses valores, na ordem de 0,067 a 0,084, de acordo com Simons & Senturk (1992), correspondem a escoamento em canais sem vegetação e declivosos, com cascalho no fundo. Essa descrição transcrita para os sulcos recém-preparados corresponde aos declives em torno de $0,07 \text{ m m}^{-1}$, com solo descoberto, e rugosidade conferida pelos grandes agregados, conforme constatado por observação visual da forma e da deformação ocorrida nos sulcos durante os testes.

Taxas de desagregação e caracterização da erodibilidade do solo em sulcos

Com base na avaliação das dimensões da seção transversal dos sulcos (Quadro 2) e das taxas médias de desagregação de solo obtidas com a aplicação das vazões extras, foi determinada a erodibilidade em sulcos (K_r) de $0,0024 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$, bem como a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) de 2,75 Pa, em um ajuste linear (Figura 3).

Em experimento no campo, apenas com aplicação de diferentes vazões, Giasson & Cassol (1996) encontraram para o mesmo Argissolo um valor de

Quadro 2. Tensão cisalhante média e taxas médias de desagregação do solo, obtidas em sulcos de solo franco-argilo-arenoso recém-preparado, para as vazões extras aplicadas ao escoamento superficial gerado pela chuva simulada⁽¹⁾

Fluxo extra ⁽²⁾	Tensão de cisalhamento média do escoamento	Taxa média de desagregação
L min^{-1}	Pa	$\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
5 + 0	6,56 a	0,0067 a
5 + 10	8,71 a	0,0137 b
5 + 20	8,97 b	0,0171 b
5 + 30	12,29 b	0,0248 c
5 + 40	13,80 b	0,0261 c
5 + 50	15,59 b	0,0295 c

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, na mesma coluna, não diferem pelo teste de Duncan a 5 %. ⁽²⁾ Cada fluxo extra aplicado, simultaneamente à chuva simulada média de 74 mm h^{-1} (5 L min^{-1}), incrementou a descarga líquida (Q), nos sulcos pré-formados no solo de textura franco-argilo-arenosa.

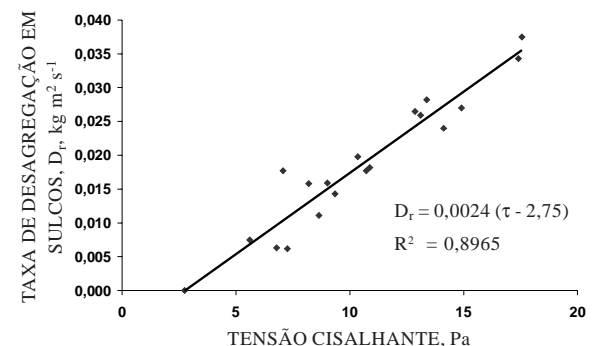


Figura 3. Erodibilidade do solo (coeficiente angular b da reta) em sulcos e tensão crítica de cisalhamento (τ_c), obtidas a partir da regressão das taxas de desagregação do solo (D_r) com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento (τ), observadas com a aplicação dos fluxos extras no escoamento superficial gerado pela chuva simulada, em sulcos pré-formados em solo franco-argilo-arenoso recém-preparado.

1,13 Pa para tensão crítica de cisalhamento, abaixo do valor ora determinado, e uma erodibilidade do solo em sulcos de $0,0077 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$, cerca de três vezes maior ao valor ora determinado. Os mesmos autores, utilizando a equação de estimativa da erodibilidade de maneira indireta, por meio dos atributos do solo empregada no WEPP, encontraram um valor de $0,0056 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ para erodibilidade do solo em sulcos. Essas diferenças de valores da erodibilidade (K_r), entre a presente determinação e as de Giasson & Cassol (1996), podem estar relacionadas com o fato de que esses autores mantiveram o solo descoberto durante 10 meses antes dos testes experimentais e sob sucessivas arações e gradagens, que, certamente, comprometeram a estrutura do solo e, muito possivelmente, diminuíram o conteúdo de matéria orgânica do solo.

Para um Argissolo Vermelho distrófico arênico, Braidá & Cassol (1996) determinaram valores de K_r de $0,0104 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e τ_c de 4,81 Pa. Em um Argissolo similar, Schäfer et al. (2001) determinaram valores de erodibilidade em sulcos (K_r) de $0,012 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e tensão crítica de cisalhamento (τ_c) de 2,65 Pa, que são mais próximos dos valores determinados no presente estudo, embora o teor de argila do solo estudado por aqueles autores tenha sido menor. Como se percebe, os valores de erodibilidade em sulcos e de tensão crítica de cisalhamento para solos do Brasil são unicamente da região Sul e, segundo Schäfer et al. (2001), ainda insuficientes para conclusões sobre a relação destes dois parâmetros de erosão em sulcos com propriedades do solo.

Transporte sólido

O quadro 3 apresenta os valores de transporte sólido observados para as correspondentes descargas líquidas, em comparação com o sedimento estimado pelas equações utilizadas, a equação (12) desenvolvida por Nearing et al. (1997), e a equação (16) presentemente ajustada e abaixo descrita, bem como o erro de estimativa destas duas equações.

Neste trabalho, os dados de descarga sólida (q_s), em kg s^{-1} , determinados para as vazões aplicadas de 5 L min^{-1} originada só da chuva simulada, e de 10, 20, 40 e 50 L min^{-1} (essas adicionadas aos 5 L min^{-1} gerado pela chuva simulada), foram relacionados com a potência do escoamento na forma da equação (11), por meio de análise de regressão, tendo-se obtido a seguinte expressão de forma logística:

$$\log(q_s) = -2,9678 + \frac{1,15227}{1 + \left(\frac{\Omega}{1,0401}\right)^{-2,4294}} \quad R^2 = 0,948 \quad (16)$$

em que a relação obtida entre o logaritmo da descarga sólida e a potência do escoamento, expressa na equação (16), consta da figura 4. Cada ponto na curva da figura 4 representa três repetições para cada vazão aplicada, num total de 360 pontos, ajustados com R^2 de 0,948. De acordo com Bagnold (1988), a potência do escoamento, como variável de transporte, representa a quantidade de energia disponível originada das variações hidráulicas do

Quadro 3. Avaliação do erro de estimativa da descarga sólida (Q_s) das equações de transporte de sólidos, utilizadas nos sulcos, em solo franco-argilo-arenoso recém-preparado, considerando os fluxos extras aplicados, sendo o erro de estimativa $E = \left(\frac{Q_{\text{sobs}} - Q_{\text{scalc}}}{Q_{\text{sobs}}} \right) \times 100$ em %, em que Q_{sobs} = descarga sólida observada; Q_{scalc} = descarga sólida calculada

Descarga líquida	Descarga sólida (Q _s , kg S ⁻¹)			Erro de estimativa (E, %)	
	Observada	Estimada		Nearing et al. (1997) Equação (12) ⁽¹⁾	Equação (16) ⁽²⁾
		Nearing et al. (1997) Equação (12) ⁽¹⁾	Equação (16) ⁽²⁾		
L s ⁻¹	kg s ⁻¹			%	
0,086	0,00721	0,000114	0,001819	98,41	74,77
0,217	0,00996	0,000300	0,004533	96,98	54,51
0,488	0,01110	0,000223	0,004581	97,99	58,73
0,618	0,01603	0,000515	0,009892	96,78	38,30
0,738	0,00914	0,000526	0,010395	94,24	-13,71

⁽¹⁾ Equação (12): $\log(q_s) = -34,47 + \frac{36,61e^{0,845+0,412\log\Omega}}{1 + e^{0,845+0,412\log\Omega}}$. ⁽²⁾ Equação (16): $\log(q_s) = -2,9678 + \frac{1,15227}{1 + \left(\frac{\Omega}{1,0401}\right)^{-2,4294}}$, sendo Ω = potência

do escoamento expressa em kg s^{-3} , ρ_w = densidade da água em kg m^{-3} , g = aceleração da gravidade em m s^{-2} , S = declive em m m^{-1} e q = descarga líquida em $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$, para as equações (12) e (16).

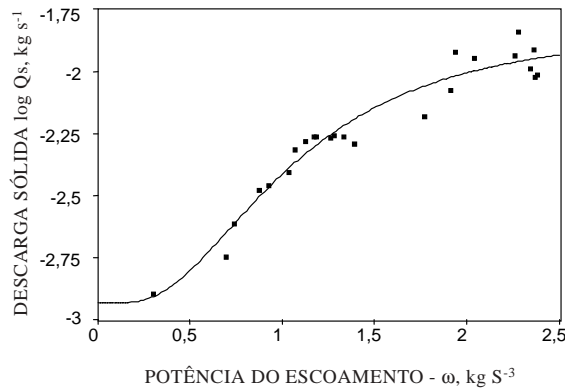


Figura 4. Representação da descarga sólida estimada pela potência do escoamento ($\Omega = \rho_w g S q$, em kg S^{-3}), para os fluxos extras aplicados de 0, 10, 20, 40 e 50 L min^{-1} , adicionados aos 5 L min^{-1} produzidos pela chuva simulada, nos sulcos pré-formados no solo franco-argilo-arenoso recém-preparado.

fluxo em um sistema aluvial, na forma de taxa de trabalho gasto para o transporte de sedimento, capaz de produzir as tensões de cisalhamento que desagregam qualquer contorno sólido, um sulco de erosão, um canal ou um rio, de forma que ela pode ser expressa na forma do produto da tensão de cisalhamento do escoamento pela velocidade média do mesmo e por um coeficiente de eficiência de trabalho. Alguns autores expressam a potência do escoamento (Ω) na forma do produto da tensão de cisalhamento pela velocidade média do escoamento superficial (τV) (Govers, 1990; Nearing et al., 1997). Em relação à incorporação das variáveis hidráulicas em funções de transporte, a equação (16) obtida demonstra sucesso pelo R^2 , à medida que as variações hidráulicas do escoamento nos sulcos de erosão criadas pela adição dos fluxos extras influenciaram sobremaneira as taxas de transporte obtidas, como já discutido anteriormente.

No entanto, considerando a média e os desvios dos erros de estimativa do transporte sólido, para todas as descargas líquidas observadas, a equação de Nearing et al. (1997), aplicada aos dados do presente estudo, apresentou um erro médio de estimativa de 96,88 %. Merten (2000), em um canal de vidro, com declive de $0,03 \text{ m m}^{-1}$, sob vazões entre 1 e $2,5 \text{ L s}^{-1}$, com adição de sedimentos na forma de carvão mineral, com diâmetro de 1,09 mm, encontrou um erro de estimativa de 48,63 % para o transporte estimado pela equação de Nearing et al. (1997). O maior erro de estimativa da presente determinação para essa equação pode estar relacionado com a maior condição de variação experimental de sulcos pré-formados em um solo agrícola em condições de campo, como também com as menores lâminas aplicadas nos sulcos.

A equação (16), ajustada no presente estudo, apresentou um erro médio de estimativa do transporte sólido de 42,52 %, o que deve estar ligado ao ajuste da potência do escoamento pelo logaritmo da descarga sólida ($\log Q_s$), um tipo de ajuste que diminui a variância experimental dos dados. Quando se extraiu o logaritmo da descarga sólida dos valores obtidos com a expressão (16), a variância experimental retornou, dando origem ao erro de estimativa de 42,52 %. Esse fato foi comprovado pela análise de regressão da potência do escoamento diretamente com a descarga sólida, também para uma equação exponencial, produzindo R^2 de 0,57 que, portanto, não explica 42,97 % da variação experimental e praticamente se iguala ao erro de estimativa da equação (16). O ajuste foi o seguinte:

$$q_s = \frac{0,0103 + 0,07974 n}{(1 + n)^2} \quad R^2 = 0,5703 \quad (17)$$

em que q_s = descarga sólida (kg s^{-1}) e $n = e^{-(\Omega - 2,068)/0,05808}$, sendo e = base do logaritmo natural e Ω = potência do escoamento na forma da equação (11).

A equação (17) apresentou uma melhor estimativa de descarga sólida entre as descargas líquidas de 0,618 e $0,738 \text{ L s}^{-1}$ (Figura 5), decorrente da aplicação de fluxos extras de 40 e 50 L min^{-1} , acrescida da chuva simulada. Tal fato denota a dificuldade de ajuste de modelos de estimativa do transporte sólido às lâminas de escoamento menos

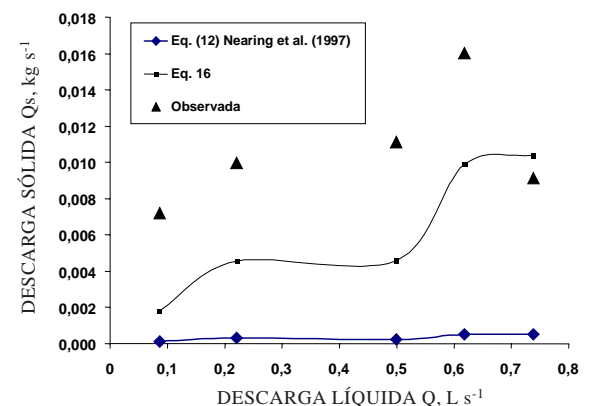


Figura 5. Comportamento da descarga sólida observada e estimada pelas equações (16):

$$\log(q_s) = -2,9678 + \frac{1,15227}{1 + \left(\frac{\Omega}{1,0401}\right)^{-2,4294}} \quad \text{e (12) de Nearing et}$$

$$\text{al. (1997): } \log(q_s) = -34,47 + \frac{36,61 e^{0,845 \cdot 0,412 \log \Omega}}{1 + e^{0,845 \cdot 0,412 \log \Omega}}, \text{ consi-}$$

derando as descargas líquidas observadas obtidas com a aplicação dos fluxos extras, adicionados aos 5 L min^{-1} produzidos pela chuva simulada, nos sulcos pré-formados no solo franco-argilo-arenoso recém-preparado.

espessas, características das áreas agrícolas, bem como às condições de um experimento de campo, em um solo agrícola com a diversidade física e mineralógica das partículas constituintes dos agregados que compõem os solos. No entanto, as estimativas de transporte de sedimentos obtidas com as equações (16 e 17), que ajustaram a variável hidráulica de transporte denominada potência do escoamento, representam um ajuste razoável, para as áreas de transporte de sedimentos e hidráulica fluvial, habituadas com estimativas nessa faixa de variação.

CONCLUSÕES

1. O regime de escoamento nos sulcos de erosão em condições de solo descoberto e recém-preparado caracterizou-se como sendo de transição subcrítico a turbulento subcrítico.

2. Para o Argissolo Vermelho distrófico típico, de textura franco-argilo-arenosa, as taxas de desagregação do solo foram lineares para as tensões de cisalhamento desenvolvidas, e o valor de erodibilidade em sulcos (K_r) foi de $0,0024 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e da tensão crítica de cisalhamento (τ_c) $2,75$ foi decorrente do teor de argila.

3. Duas funções, baseadas na variável hidráulica potência do escoamento, estimaram o transporte de sedimentos nos sulcos de erosão de forma razoável, explicando 57,48 % da variação experimental, o que demonstra a dificuldade de ajuste de modelos de estimativa do transporte sólido às lâminas de escoamento pouco espessas que ocorrem nas áreas de cultivo agrícola, bem como a diversidade física e mineralógica das partículas e agregados do solo estudado.

AGRADECIMENTOS

À FINEP e ao CNPq, pelo suporte financeiro ao Projeto PRONEX-SOLOS da UFRGS, e à FAPERGS. Ao Eng^o-Agr^o, Arcângelo Mondardo, e ao técnico agrícola, Agostinho Tarcísio S. Oliveira, pela imprescindível ajuda na instalação e realização dos experimentos. À Estação Experimental Agronômica da UFRGS, pela cedência da área experimental e disponibilidade da infra-estrutura necessária nos trabalhos de campo.

LITERATURA CITADA

ABRAHAM, A.D.; PARSONS, A.J. & LUK, S.H. Resistance to overland flow on desert hillslopes. *J. Hydrol.*, 88:343-363, 1986.

BAGNOLD, R.A. An Approach to the sediment transport problem from general physics. In: THORNE, C.R.; MACARTHUR, R.C. & BRADLEY, J.B., eds. *The Physics of sediment transport by Wind and Water*. New York, American Society of Civil Engineers, 1988. p.231-291.

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.

CASSOL, E.A. & GUERRA, M. Calibração do primeiro aparelho simulador de chuvas de braços rotativos do Estado do Rio Grande do Sul. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE PESQUISA DE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 2., Passo Fundo, 1978. Anais. Passo Fundo, Embrapa-CNPT e Embrapa-SNLCS, 1978. p.29-39.

CASTRO, L.G. Erosão hídrica relacionada à rugosidade superficial do solo na ausência e na presença de cobertura por resíduos de aveia. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 120p. (Tese de Mestrado)

EINSTEIN, H.A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. Washington, USDA, 1950. 65p. (Technical Bulletin, 1026)

ELLIOT, W.J.; LIEBOW, A.M.; LAFLEN, J.M. & KOHL, K.D. A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88. West Lafayette, The Ohio State University and USDA-ARS, 1989. (NSERL - National Soil Erosion Research Laboratory Report, 3)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 1999. 412p.

FLANAGAN, D.C. & 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)

GIASSON, E. & CASSOL, E.A. Relações de erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um Plintossolo franco-argilo arenoso. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:117-125, 1996.

GOVERS, G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. In: JERUSALEM WORKSHOP, Jerusalem, 1987, Proceedings. Jerusalem: IAHS, 1990. p.45-63. (IAHS publ. 189)

JULIEN, P.Y. Erosion and sedimentation. Milbourne, Cambridge University Press, 1995. 280p.

KING, K.W. & NORTON, L.D. Methods of rill flow velocity dynamics. In: INTERNATIONAL WINTER MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, Nashville, 1992. [Papers]. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1992. 17p. (Paper, 92-2542).

LAFLEN, J.M. & THOMAS, A.W. Cropland experiments for the WEPP project. In: INTERNATIONAL WINTER MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, San Jose, 1987. Papers. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1987. 14p. (Paper n. 87-2544).

- LEI, T.; NEARING, M.A.; HAGHIGHI, K. & BRALTS, V.F. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model. *Water Res. Res.*, 34:3157-3168, 1998.
- MERRITT, E. The identification of four stages during micro-rill development. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 9:493-496, 1984.
- MERTEN, G.E. Dinâmica da erosão em sulcos alterada pelo incremento da descarga sólida. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 116p. (Tese de Doutorado)
- NEARING, M.A.; NORTON, L.D.; BULGAROV, D.A.; LARIANOV, G.A.; WEST, L.T. & DONTSOVA, K.M. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Res. Res.*, 33:865-876, 1997.
- RAUWS, G. & GOVERS, G. Hydraulics and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *J. Soil Sci.*, 39:111-124, 1988.
- SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A.; ELTZ, F.L.F. & REINERT, D.J. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:419-430, 2001.
- SIMONS, D.B. & SENTURK, F. Sediment transport technology: Water and sediment dynamics. Denver, Colorado, Water Resources Publications, 1992. 897p.
- SLATTERY, M.C. & BRYAN, R.B. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: A laboratory experiment. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 17:127-146, 1992.
- SWANSON, N.P. Rotating-boom rainfall simulator. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 8:71-72, 1965.