

EROSÃO EM ENTRESSULCOS EM DIFERENTES PREPAROS E ESTADOS DE CONSOLIDAÇÃO DO SOLO⁽¹⁾

M. J. SCHÄFER⁽²⁾, J. M. REICHERT⁽³⁾,
D. J. REINERT⁽³⁾ & E. A. CASSOL⁽⁴⁾

RESUMO

O preparo torna o solo mais susceptível à desagregação pelo impacto das gotas da chuva e transporte pelo fluxo superficial laminar e salpicamento, mas, com o passar do tempo, o solo reconsolida-se, aumentando novamente sua resistência. Com o objetivo de estudar a erosão em entressulcos, em diferentes métodos de preparo do solo e consolidação, foi realizado, em 1997/98, um experimento em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, que vinha há oito anos sob plantio direto. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com seis repetições. Os tratamentos testados foram: preparo convencional recente (CR), preparo convencional consolidado (CC, consolidação de dois meses), plantio direto com palha (PDC, 94% de cobertura) e plantio direto sem palha (PDS). O experimento foi realizado com chuva simulada, com intensidade constante de 65 mm h⁻¹, durante 90 min. As parcelas usadas tiveram dimensões de 0,50 m por 0,75 m e declividade média de 8,5%. Foi determinado o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (Ki), obtendo-se o valor de 1,77 x 10⁶ kg s m⁻⁴. Quanto à perda de solo, os tratamentos com preparos convencionais (CR e CC) não foram diferentes entre si, nem os com plantio direto (PDS e PDC), mas houve diferença entre esses dois grupos, havendo uma redução de sete vezes com a não-mobilização do solo. O diâmetro médio geométrico dos agregados foi significativamente menor no PDS e PDC que no CR e CC. Portanto, as perdas de solo foram reduzidas e a agregação aumentada, em virtude da longa consolidação (oito anos) e efeitos associados. O PDC reduziu a taxa constante de perda de água em 31% em relação ao PDS devido à cobertura do solo. Assim, a consolidação e a cobertura do solo reduzem, de forma complementar, as perdas de solo e água.

Termos de indexação: plantio direto, perda de solo e água, erodibilidade, tamanho sedimento, selamento superficial.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada ao Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Pesquisa parcialmente financiada com recursos da FAPERGS e do Pronex-CNPq/FINEP. Recebido para publicação em novembro de 1999 e aprovado em janeiro de 2001.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo, MSc. Rua 5 de Março, 83. CEP 97110-000 Santa Maria (RS).

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). Pesquisador do CNPq. E-mail: reichert@ccr.ufsm.br.

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). Pesquisador do CNPq.

SUMMARY: INTERRILL EROSION FOR DIFFERENT TILLAGE AND SOIL CONSOLIDATION

A tilled soil has increased susceptibility to raindrop impact and sediment transport by laminar surface flow and splash, but after tillage the soil reconsolidates, increasing again its resistance. Thus, an experiment was conducted on a Hapludalf with Sandy loam soil surface, under no-tillage for eight years, to evaluate interrill erosion under different tillage methods. The experiment was totally randomized with six replicates. The treatments were recent conventional tillage (RCT), two-month consolidated conventional tillage (CCT), no-tillage with mulch (NTM) with 94% surface coverage, and no-tillage with bare surface (NTB). A constant rainfall of 65 mm h⁻¹ was applied for 90 min. The plots had dimensions of 0.50 m by 0.75 m, with an average slope of 8.5%. The interrill soil erodibility (Ki) was 1.77 x 10⁶ kg s m⁻⁴. Soil loss was similar for conventional tilled soil (RCT and CCT) and for no-tillage soil (NTM and NTB), but tillage increased soil loss seven-fold. The mean weight diameter of aggregates was smaller for conventional than for no-tillage soil. Thus, soil loss was reduced and aggregate stability increased due to long consolidation (eight years) and to other effects of the no-tillage system. Presence of mulch on no-tillage soil reduced water loss rate by 31%. Thus, soil consolidation and surface coverage have complementary effects on reducing soil and water losses.

Index terms: no-tillage, soil and water loss, erodibility, sediment size, surface sealing.

INTRODUÇÃO

O estudo do processo erosivo pode ser dividido, de acordo com a origem do sedimento, em erosão em entressulcos e em sulcos. A erosão em entressulcos é devida ao escoamento superficial uniforme em forma de uma delgada lâmina na superfície do solo sem, no entanto, ocorrer concentração do fluxo (erosão "laminar") (Foster, 1982). A desagregação de partículas do solo, na erosão em entressulcos, deve-se, fundamentalmente, ao impacto direto das gotas de chuva na superfície do solo. As gotas da chuva, quando colidem com a superfície do solo, geram compressão e cisalhamento, com grande capacidade de desagregação pela dissipação de sua energia cinética (Huang et al., 1983; Nearing et al., 1986).

Durante um evento pluvial, o impacto da chuva na superfície do solo causa dispersão de argilas e desintegração de agregados, formando um selo superficial de baixa porosidade e continuidade de poros, restringindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial (Reichert & Norton, 1995). A formação do selo superficial ocorre principalmente em solo descoberto (Reichert et al., 1992; Barcelos et al., 1999) e é diminuída em solo com estrutura mais estável (Reichert et al., 1992; Reichert & Norton, 1994) ou em sistemas conservacionistas que mantêm os resíduos culturais sobre o solo (Alves & Cabeda, 1999; Barcelos et al., 1999).

Além da desagregação, o impacto das gotas de chuva também é responsável pelo transporte por salpicamento em pequenas distâncias e pela suspensão de partículas do solo no fluxo laminar,

decorrente da turbulência provocada no impacto (Kinell, 1988). A presença de resíduos provoca uma diminuição na desagregação do solo e no transporte de sedimentos (Bertol et al., 1997).

Os fatores que afetam a erosão em entressulcos são a erodibilidade do solo, a cobertura do solo, a intensidade da chuva (Foster, 1982; Meyer & Harmon, 1984; Watson & Laflen, 1986; Reichert et al., 1994), a declividade do solo (Young & Onstad, 1978; Meyer & Harmon, 1992), o estado de consolidação do solo (Nearing et al., 1988a; Reichert et al., 1994), a rugosidade superficial do solo (Römken & Wang, 1987; Eltz & Norton, 1997) e a umidade inicial do solo (Ghuidey & Alberts, 1994).

A erodibilidade do solo em entressulcos representa a sua susceptibilidade à desagregação pelo impacto das gotas da chuva, sendo essa susceptibilidade atribuída a características intrínsecas do solo, conferidas pelas suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas (Foster, 1982). Algumas propriedades do solo que, reconhecidamente, afetam a sua erodibilidade são: a textura, o teor de matéria orgânica, a estrutura, o teor de óxidos de ferro e alumínio, as ligações eletroquímicas, o conteúdo inicial de umidade, a mineralogia e o grau de intemperismo (Wischmeier et al., 1971; Römken et al. 1977; Veiga et al., 1993; Reichert & Norton, 1994; Albuquerque et al., 2000).

A consolidação do solo, em solo agrícola não saturado, é definida como um processo de aumento na sua estabilidade estrutural, consequência da tensão efetiva (compressão) induzida pelo potencial matricial durante a redistribuição da água no solo

após a chuva (Nearing et al., 1988b). A redução na porosidade do solo e sua consolidação podem levar à redução na infiltração e ao aumento no escoamento superficial de água, mas a resistência do solo à desagregação é aumentada (Brown & Norton, 1992, 1994).

Em solos sob plantio direto, portanto, espera-se encontrar menor erosão em entressulcos, em virtude da maior consolidação e agregação, com incremento na resistência do solo à desagregação, quando comparado ao solo preparado, independentemente da cobertura do solo. Entretanto, o efeito da consolidação e da cobertura do solo na erosão em entressulcos de solos tropicais é pouco conhecido.

Assim, os objetivos deste experimento foram: (a) determinar a erodibilidade básica do solo em entressulcos (Ki); (b) quantificar as perdas de solo e água em entressulcos em diferentes sistemas de preparo do solo e consolidação; (c) caracterizar o diâmetro mediano (D_{50}) do sedimento erodido em entressulcos em diferentes métodos de preparo e consolidação do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Tratamentos

O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria (RS), durante o verão de 1997/98. Foi estudado um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (Hapludalf) (EMBRAPA, 1999), da unidade de mapeamento São Pedro.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e seis repetições. Os tratamentos foram: preparo convencional recente (CR), preparo convencional consolidado (CC, consolidação de dois meses), plantio direto com palha (PDC, 94% de cobertura) e plantio direto sem palha (PDS, palha removida).

A área experimental era utilizada, anteriormente ao experimento, para produção de grãos e possuía uma história de oito anos consecutivos no sistema plantio direto. Para os tratamentos com preparo convencional (CR e CC), retirou-se toda a palha, composta de resíduos de trigo, de milho e de invasoras, presente na superfície do solo. O solo foi preparado com uma lavração com arado de discos a uma profundidade média de 20 cm e, no dia seguinte, duas gradagens com grade niveladora. Posteriormente, o solo permaneceu sem cobertura e isento de invasoras durante dois meses.

No mesmo dia da aplicação da chuva, no tratamento PDS, a palha foi removida da superfície do solo com o auxílio de um pincel macio para

minimizar a mobilização da superfície do solo, enquanto, no tratamento CR, o solo foi novamente preparado manualmente com o auxílio de uma pá de corte a uma profundidade de 0,20 m e um rastelo para destorroamento e nivelamento. Nos tratamentos PDC, que continha, em média, 94% de cobertura, e CC, não foi realizado nenhum procedimento adicional.

Chuvas e coletas de solo e água

As chuvas ocorreram durante os meses de fevereiro e março de 1998. Para aplicar a chuva, foi usado um simulador estacionário de bicos múltiplos e oscilantes (Norton & Brown, 1992). Por ocasião do início dos trabalhos com chuva, o simulador foi instalado a uma altura de 2,45 m da superfície do solo e a pressão de saída da água nos bicos foi mantida em 41,4 kPa. A chuva de 65 mm h⁻¹ foi aplicada, durante 90 min, para realizar as coletas propostas.

As parcelas de erosão foram delimitadas por chapas metálicas galvanizadas cravadas no solo, que continham, na parte inferior, uma calha coletora, nivelada com a superfície do solo, para a amostragem da enxurrada. As dimensões da parcela de erosão em entressulcos foram de 0,50 m de largura por 0,75 m de comprimento, ficando a maior dimensão no sentido do declive (Elliot et al., 1989). A declividade média das parcelas foi de 8,5%.

Os recipientes utilizados na captação foram potes plásticos com capacidade de um litro. As coletas foram realizadas em intervalos de cinco minutos e cada pote permaneceu o tempo máximo até que um dos potes enchesse. Esse tempo foi cronometrado e anotado para posteriores cálculos. Após os 90 min, um balde com capacidade de três litros foi utilizado na coleta de uma amostra para a determinação de tamanho de sedimentos erodidos.

Determinações no campo e no laboratório

As amostras de enxurrada coletadas no campo foram levadas ao laboratório onde os potes com solo e água foram pesados e os dados processados para obter as massas de solo e de água. As amostras coletadas em baldes no final de cada chuva foram peneiradas em água para determinar o tamanho de sedimentos erodidos. Inicialmente, fez-se o peneiramento mecânico com o auxílio de um oscilador vertical (Braidá & Cassol, 1997). As peneiras (2,000, 1,000 e 0,210 mm) oscilaram dentro de um balde com água, durante cinco minutos, enquanto o material mais fino que 0,21 mm foi, posteriormente, peneirado manualmente com leves movimentos circulares dentro da água em peneiras de 0,105, 0,053 e 0,037 mm. O sedimento que passou pela peneira de 0,037 mm foi, também, coletado e processado. O material retido em cada peneira foi colocado na estufa a 105°C para a determinação da matéria seca.

Os resultados foram expressos em diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados, as partículas unitárias do sedimento erodido foram calculadas (Kemper & Chepil, 1965) e o tamanho mediano dos sedimentos (D_{50}), tamanho para o qual 50% em peso é mais fino, foi encontrado graficamente (Julien, 1988).

A rugosidade superficial randômica (RR) foi medida com um rugosímetro com pinos espaçados em 0,5 cm. As leituras de rugosidade foram feitas antes e depois da chuva e determinadas a 0,10, 0,30 e 0,50 m da borda inferior da parcela, tendo sido a rugosidade randômica calculada segundo Allmaras et al. (1966). Logo após a chuva, em solo próximo à saturação, a resistência do solo ao cisalhamento foi medida com um Torvane (Holtz & Kovacs, 1981), realizando-se 15 repetições aleatórias em cada parcela.

Determinou-se a cobertura do solo depois da chuva pelo método da contagem de pontos quadrados (Spedding & Large, 1957). Para avaliar a massa de cobertura do solo, toda a cobertura foi retirada e levada para secagem e pesagem no laboratório. Nas áreas adjacentes às unidades experimentais, foram coletadas outras amostras de solo, na profundidade de 0-10 cm, para avaliar as características físicas e químicas. Após a chuva, a declividade das parcelas foi também determinada.

O teor de matéria orgânica foi medido pelo Walkey & Black (Alisson, 1965) em amostras coletadas na profundidade de 0-10 cm. Para determinar a textura do solo, usaram-se amostras deformadas coletadas no campo em uma camada de 0-10 cm de profundidade: a areia foi determinada por tamisamento e a argila, pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986). A densidade de partículas foi avaliada pelo método do balão volumétrico, enquanto a densidade do solo foi medida pela utilização de anéis, na profundidade de 0-5 cm (Blake & Hartge, 1986).

A distribuição do tamanho e a estabilidade de agregados em água foram determinadas por meio do método de Kemper & Chepil (1965). A distribuição do tamanho de poros do solo foi feita em amostras indeformadas da camada de 0-5 cm, saturadas e, posteriormente, submetidas a diferentes sucções, e o tamanho dos poros foi calculado pela equação de ascensão capilar.

As perdas de solo (Ps) e de água (Pa) e a concentração de sedimento (C) foram determinadas, usando as amostras da enxurrada coletadas no campo. A taxa de escoamento (R) foi calculada, dividindo-se o volume de água escoado (V) pela área da parcela (A), multiplicado pelo tempo (t) de coleta. A taxa de erosão (qs) foi encontrada pela divisão da perda de solo (Ps) pela área da parcela (A) multiplicada pelo tempo (t) de coleta. Subtraindo a taxa de escoamento da água (R) da lâmina precipitada, encontrou-se a taxa de infiltração (i).

A equação de infiltração de Horton (1940) foi ajustada, usando-se regressão não-linear (SAS Institute, 1988), aos dados observados de infiltração de água no solo: $i = (i_0 - i_c) \exp(-\alpha t) + i_c$, em que i = taxa de infiltração em um tempo t (cm h^{-1}), i_0 = taxa inicial de infiltração (cm h^{-1}), i_c = taxa constante de infiltração (cm h^{-1}), α = coeficiente que descreve a redução na infiltração com o tempo e t = tempo (min).

A erodibilidade do solo em entressulcos foi calculada pela equação $D_i = K_i i^2 S_i$, tendo sido o fator de declividade ($S_i = 1,05 - 0,85 \exp(-4 \sin \theta)$) o desenvolvido por Liebenow et al. (1990), em que: D_i = taxa de desagregação em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), K_i = erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}), i = intensidade da chuva (m s^{-1}), S_i = fator de declividade e θ = ângulo do declive.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, comparação de médias (teste de Duncan a 5%) e regressões não-lineares entre taxas de escoamento e de erosão e o tempo durante a chuva. Para os testes estatísticos, usaram-se rotinas do SAS (SAS Institute, 1988).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Escoamento e infiltração de água

As taxas de escoamento (R) tiveram comportamento hiperbólico em todos os tratamentos (Figura 1), tendendo a um valor constante, semelhantemente ao observado por Braida & Cassol (1999). As maiores taxas de escoamento, constantes e durante a chuva, ocorreram no CR e PDS em relação ao CC e PDC (Quadro 1, Figura 1). O CR apresentou uma superfície com pequena rugosidade randômica (RR) (Quadro 2) e reduzida estabilidade de agregados na superfície do solo, expressa por classe de tamanho e diâmetro mediano (D_{50}) e médio geométrico (DMG) de agregados estáveis em água (Quadro 3), favorecendo a formação de selo superficial e o escoamento de água. As altas taxas de escoamento no PDS (Quadro 1, Figura 1) estão associadas à baixa porosidade total (Pt) e macroporosidade (Mp) (Quadro 2), as quais restringem a infiltração de água.

Esperava-se que o CC apresentasse taxas de infiltração e de escoamento semelhantes às do CR, em virtude da formação de selo superficial. Além da maior rugosidade superficial do CC (Quadro 2), que aumenta a infiltração e reduz o escoamento (Bertol et al., 1997), resultados na literatura (Hardy et al., 1983; Reichert et al., 1994) indicam que alguns solos com crosta superficial (selo seco) podem apresentar maior infiltração do que solos recém-preparados, embora não esteja claro que condições do solo levem a tal comportamento. Segundo Hardy et al. (1983), o secamento do selo (encrostamento) pode enfraquecer as forças de coesão na crosta superficial, tornando-a

Quadro 1. Taxa constante de escoamento (R_c), perda total de água (P_{ta}) nos 90 min de chuva, taxa constante de infiltração medida (i_c) e infiltração total (I_t) nos 90 min de chuva, considerando diferentes preparos e consolidação do solo

Tratamento	R _c	P _{ta}	i _c	I _t
	cm h ⁻¹	cm	cm h ⁻¹	cm
Convencional recente (CR)	4,66 a	6,02 a	1,13 b	2,65 b
Convencional consolidado (CC)	3,44 b	4,18 b	2,62 a	4,92 a
Plantio direto sem palha (PDS)	4,62 a	6,68 a	1,50 b	2,50 b
Plantio direto com palha (PDC)	3,53 b	3,75 b	2,70 a	5,60 a

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5%.

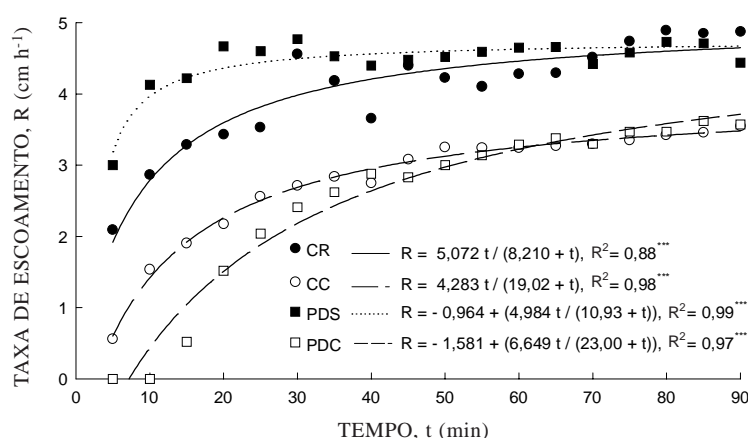


Figura 1. Taxa de escoamento (R) em função do tempo (t) de aplicação da chuva, em diferentes preparos e consolidação do solo (CR = convencional recente, CC = convencional consolidado, PDS = plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha). * = P < 0,0001.**

Quadro 2. Matéria orgânica (MO) do solo, densidade do solo (ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Mp), microporosidade (mp) e rugosidade randômica antes (RRa) e depois (RRd) da chuva, considerando diferentes preparos do solo e consolidação

Atributo	Tratamento ⁽¹⁾			
	CR	CC	PDS	PDC
MO (g kg ⁻¹)	25 b	28 ab	30 a	31 a
ds (Mg m ⁻³)	0,99 c	1,28 b	1,38 a	1,34 ab
Pt (cm ³ cm ⁻³)	0,60 a	0,49 b	0,43 c	0,47 b
Mp (cm ³ cm ⁻³)	0,33 a	0,16 b	0,05 d	0,12 c
mp (cm ³ cm ⁻³)	0,27 c	0,32 b	0,38 a	0,34 b
RRa (cm)	0,23 c	0,93 a	0,48 b	0,77 a
RRd (cm)	0,34 c	0,85 a	0,41 c	0,65 b

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5%.

⁽¹⁾ CR = convencional recente, CC = convencional consolidado, PDS = plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha.

mais susceptível ao destacamento de agregados pela chuva e ao aumento da infiltração em chuvas subsequentes.

O modelo de Horton (1940) ajustou-se adequadamente aos dados de infiltração de água, com um coeficiente de determinação altamente significativo (P < 0,001) (Figura 2). A taxa constante de infiltração (i_c) estimada pelo modelo foi similar àquela medida no campo. O coeficiente a do modelo, que descreve a redução da infiltração no tempo, foi maior no PDS (0,2224) e o menor no PDC (0,0391) (Figura 2), o qual também apresentou maior i_c, mostrando que a cobertura morta é essencial à manutenção da porosidade e da continuidade dos poros até à superfície do solo.

Solo preparado convencionalmente e sem cobertura favorece o selamento superficial (Reichert et al., 1994; Barcelos et al., 1999; Braida & Cassol, 1999), decorrente da desagregação do solo pelo impacto da chuva e da conseqüente obstrução dos poros na superfície do solo por compressão e

Quadro 3. Distribuição de agregados estáveis em água por classe de tamanho, diâmetro médio geométrico (DMG) e mediano (D_{50}) de agregados estáveis em água, considerando diferentes preparos e consolidação do solo

Característica	Tratamento ⁽¹⁾			
	CR	CC	PDS	PDC
Agregados estáveis (%) por classe de tamanho				
8,00 – 4,76 (mm)	17,67 c	36,50 b	68,00 a	75,83 a
4,76 – 2,00 (mm)	13,58 a	15,92 a	14,17 a	13,67 a
2,00 – 1,00 (mm)	9,00 a	7,08 b	2,67 c	0,50 d
1,00 – 0,21 (mm)	25,58 a	19,00 b	5,00 c	1,83 c
< 0,21 (mm)	35,00 a	18,92 b	10,17 c	8,17 c
DMG (mm)	0,72 b	1,52 b	3,42 a	4,00 a
D_{50} (mm)	0,31 c	1,43 b	2,64 a	2,89 a

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5%.

⁽¹⁾ CR = convencional recente, CC = convencional consolidado, PDS = plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha.

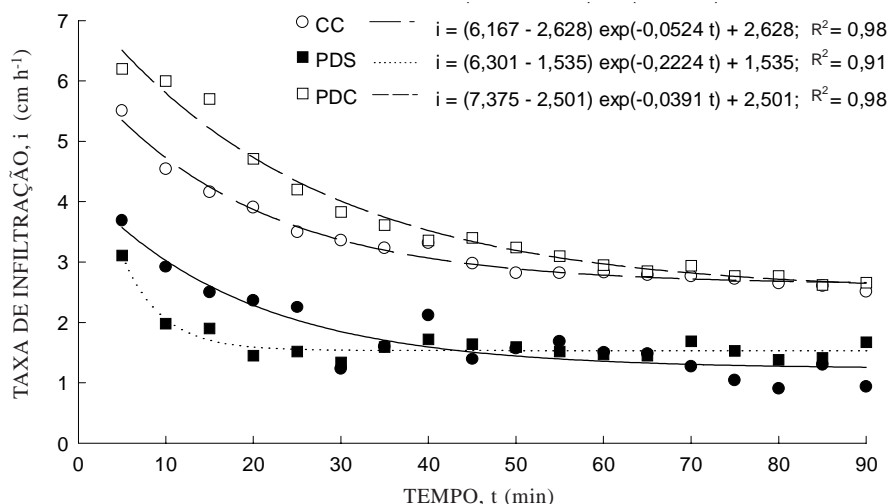


Figura 2. Taxa de infiltração da água (i) no solo em função do tempo (t) de aplicação da chuva, em diferentes preparos e consolidação do solo (CR = convencional recente, CC = convencional consolidado, PDS = plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha). Equação de infiltração: $i = (i_0 - i_c) \exp(-\alpha t) + i_c$. * = $P < 0,0001$.**

migração de argilas, formando uma camada de baixa porosidade e restringindo a infiltração de água no solo (Reichert & Norton, 1995).

A redução na perda total de água (Pta) em função da cobertura do solo (PDS versus PDC, com 94% de cobertura) (Quadro 1) foi, respectivamente, de 56 e 73%, semelhante ao percentual de redução de perda total de água encontrado por Cassol & Lima (1998). Com a aplicação de $0,80 \text{ kg m}^{-2}$ (98 a 99% de cobertura) de palha de milho e trigo na superfície do solo, Braida & Cassol (1999) encontraram redução média de 34% na perda total de água e de 50% na taxa média de perda de água em relação ao solo descoberto.

Erosão do solo e características do sedimento

A taxa de erosão (q_s) teve uma relação sigmóide com o tempo (t) no CR e CC, enquanto, no PDS e PDC, a relação foi linear, porém com pequeno coeficiente angular (Figura 3). A redução na q_s no início da chuva, particularmente no CR, deveu-se provavelmente ao esgotamento de partículas de solo prontamente salpicadas para o coletor de enxurrada e à pequena capacidade de transporte do sedimento pelo escoamento no início da chuva. A aproximadamente 35 min de chuva, a taxa de infiltração estabilizou-se (Figura 2) e a de escoamento atingiu seu valor máximo (Figura 1), permitindo maior desagregação e transporte de

sedimentos (Quadro 4). As taxas de erosão pequenas e praticamente constantes durante toda a chuva no PDS e PDC (Figura 3) podem ser explicadas pela baixa desagregação do solo e transporte pelo escoamento.

As taxas de erosão em função do tempo encontradas por Cassol & Lima (1998) e Braida & Cassol (1999), em solos preparados não consolidados e sem cobertura, mostram um comportamento quadrático, atingindo um valor máximo e com um decréscimo posterior. Neste trabalho, porém, não houve decréscimo. Em sistema plantio direto com cobertura de praticamente 100%, Cassol & Lima (1998) encontraram uma variação na taxa de perda de solo com o tempo semelhante às encontradas

neste trabalho (Figura 3), mostrando a eficácia da cobertura do solo na perda de solo durante todo o evento pluvial.

A maior perda de solo durante todo o período da chuva no PDS, comparado ao PDC, deveu-se à maior desagregação e dispersão do solo e ao conseqüente selamento superficial pelo impacto direto das gotas da chuva sobre o solo desnudo. Portanto, a consolidação do solo reduz as perdas em relação ao solo mobilizado, mas não é suficiente para diminuir as perdas a valores mínimos. Para isso, é necessário que a estrutura do solo seja melhorada com agregados mais estáveis e adequada distribuição de tamanho de poros.

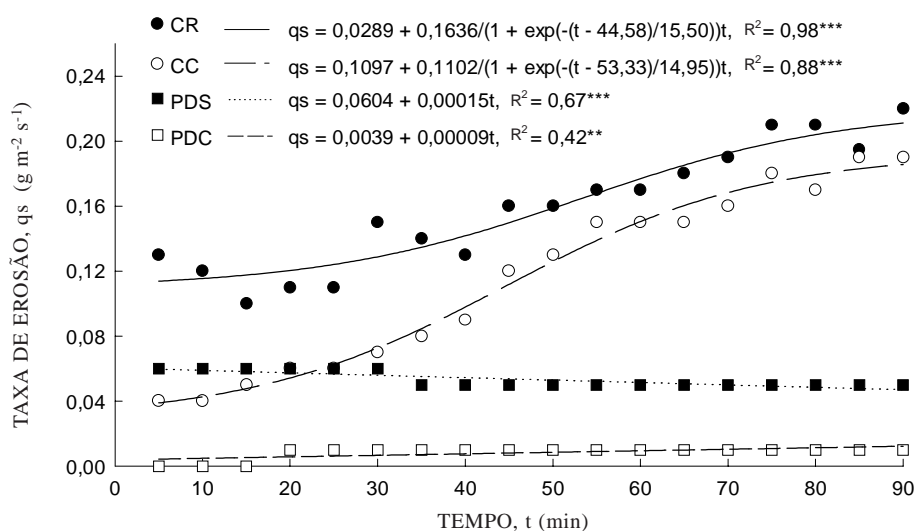


Figura 3. Taxa de erosão (qs) em função do tempo (t) de aplicação da chuva, em diferentes preparos e consolidação do solo (CR = convencional recente, CC = convencional consolidado, PDS= plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha). *** = P < 0,0001; ** = P < 0,001.

Quadro 4. Taxa máxima de desagregação (Di), erodibilidade em entressulcos (Ki), resistência do solo ao cisalhamento (τ), taxa constante de erosão de solo (qs_c), perda total de solo (Pts) e concentração constante de sedimento (C_c), considerando diferentes preparos e consolidação do solo

Característica	Tratamento ⁽¹⁾			
	CR	CC	PDS	PDC
Di (kg m ⁻² s ⁻¹)	2,1 x 10 ⁻⁴ a	1,8 x 10 ⁻⁴ a	5,1 x 10 ⁻⁵ b	7,0 x 10 ⁻⁶ b
Ki (kg s m ⁻⁴)	1,77 x 10 ⁶ a	1,44 x 10 ⁶ a	4,33 x 10 ⁵ b	5,09 x 10 ⁴ b
τ (kN m ⁻²)	2,17 c	3,42 b	6,33 a	5,77 a
qs _c (g m ⁻² h)	752,50 a	651,46 a	184,95 b	25,02 b
Pts (g)	286,20 a	220,38 a	91,89 b	12,09 b
C _c (g L ⁻¹)	11,81 a	12,47 a	2,88 b	0,48 b

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5%.

⁽¹⁾ CR = convencional recente, CC = convencional consolidado, PDS = plantio direto sem palha, PDC = plantio direto com palha.

A taxa constante de erosão (q_s) e a perda total de solo (Pts) no PDS e PDC são inferiores às do CR e CC (Quadro 4), em virtude da menor resistência ao cisalhamento do solo (τ) (Quadro 4), estabilidade de agregados (DMG e D_{50}) (Quadro 3) e ausência de cobertura do solo nesses tratamentos. O efeito protetor da cobertura do solo na desagregação e a menor perda de solo também foram observados por West et al. (1991), Barcelos et al. (1999) e Braida & Cassol (1999).

A concentração de sedimento (C) foi maior no CR e CC em relação ao PDS e PDC, o que está em consonância com a taxa máxima de desagregação (Di) de cada tratamento (Quadro 4). Nos tratamentos em que a desagregação foi elevada, graças à baixa resistência à desagregação e baixa resistência do solo ao cisalhamento (tratamentos de menor consolidação e agregação: CR e CC), a concentração de sedimento foi superior à dos tratamentos mais consolidados e agregados ou com a superfície mais protegida (PDS e PDC). Braida & Cassol (1997) também observaram redução da concentração de sedimento no fluxo com a redução da desagregação, tendo em vista a presença de palha na superfície do solo e a significativa redução na concentração de sedimento no fluxo, com o aumento da quantidade de palha aplicada.

A consolidação por um período prolongado, aliada à agregação do solo no tratamento PDS, proporcionou ao solo maior resistência à desagregação, reflexo da maior resistência ao cisalhamento (τ) (Quadro 4). Ou seja, uma maior energia foi necessária para desagregar o solo e, portanto, menor concentração de sedimento (Quadro 4) foi determinada, igualando-se ao PDC, embora aquele tratamento não tenha a proteção da palha na superfície do solo. A consolidação por um período curto de tempo (CC), apesar de apresentar maior resistência do solo ao cisalhamento do que no solo não consolidado (CR), não resultou em redução na taxa de desagregação e na concentração de sedimento, mostrando que outras propriedades do solo são determinantes na redução

da erosão, particularmente a estabilidade de agregados (Quadro 3).

A taxa máxima de desagregação (Di), a taxa constante de erosão (q_s) e a perda total de solo (Pts) (Quadro 4) estiveram inversamente associadas à estabilidade dos agregados em água, expressa pelo DMG e o D_{50} dos agregados estáveis em água (Quadro 3). Agregados mais estáveis resistem à dispersão de partículas e desagregação pelo impacto das gotas de chuva (Reichert et al., 1992; Veiga et al., 1993; Reichert & Norton, 1994; Albuquerque et al., 2000).

Os agregados de maior tamanho ocorreram no PDS e PDC, onde mais de 68% dos agregados ficaram na classe 8 a 4,76 mm, refletindo-se em maiores valores de DMG e D_{50} . O CR apresentou menor tamanho de agregados estáveis em água, com 35% dos agregados sendo menores que 0,21 mm (Quadro 3). Em sistema plantio direto (PDC e PDS), a agregação é normalmente aumentada pelo incremento na matéria orgânica do solo (Roth et al., 1991), no sistema radicular (Silva & Mielniczuk, 1998) e na consolidação do solo (Nearing et al., 1988a,b).

O tamanho do sedimento (partículas primárias e agregados) erodido e transportado pelo fluxo laminar raso foi expresso pelos índices D_{50} , DMG e silte + argila (Quadro 5), os quais foram influenciados pela cobertura e pelo preparo do solo. O DMG e o D_{50} do sedimento erodido no CC e CR foram maiores que no PDC e PDS.

A redução do tamanho do sedimento pela cobertura do solo também foi observada por Gilley et al. (1986) e Braida & Cassol (1997), provavelmente pela redução na dispersão de partículas pelo impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície de solo desnudo e pela redução da capacidade de transporte do escoamento (Foster, 1982; Braida & Cassol, 1997). Como solos agregados e consolidados têm maior estabilidade estrutural, a dispersão e o destacamento de partículas da massa de solo são diminuídos.

Quadro 5. Silte + argila e diâmetro médio geométrico (DMG) e mediano (D_{50}) de sedimentos erodidos em entressulcos em quatro diferentes preparos e consolidação do solo

Tratamento	Silte + argila	DMG	D_{50}
	g kg ⁻¹	mm	
Convencional Recente (CR)	371 b	0,15 ab	0,10 a
Convencional Consolidado (CC)	241 b	0,22 a	0,10 a
Plantio Direto Sem palha (PDS)	541 a	0,08 b	0,05 b
Plantio Direto Com palha (PDC)	532 a	0,11b	0,06 b

Médias não seguidas pela mesma letra, na coluna, diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5%.

Erodibilidade do solo em entressulcos

A erodibilidade básica em entressulcos (K_i) deste solo, que corresponde ao K_i do tratamento CR, foi de $1,77 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. Os valores de K_i para os demais tratamentos (CC, PDS e PDC) foram calculados para fins de comparação dos sistemas de preparo do solo e consolidação (Quadro 4), pois a erodibilidade é determinada na condição de máxima susceptibilidade à erosão.

O valor K_i é o mais baixo entre os valores determinados no campo para solos de textura superficial franco-arenosa do Rio Grande do Sul. Rockenbach (1992) determinou um K_i de $3,35 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, para um Podzólico Vermelho-Amarelo franco-arenoso; Braida & Cassol (1996) um K_i de $5,10 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, para um Podzólico Vermelho-Escuro franco-arenoso, e Cassol & Lima (1998) determinaram um K_i de $2,94 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, para um Podzólico Vermelho-Amarelo franco-argilo-arenoso. Nos Estados Unidos, Elliot et al. (1989) estudaram trinta e seis solos e determinaram valores de erodibilidade em entressulcos (K_i) de $0,76 \times 10^6$ até $3,88 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$.

O solo estudado neste trabalho mostrou, no horizonte superficial, textura franco-arenosa e as diferenças entre os valores de K_i determinados entre os solos mostraram-se parcialmente relacionadas com os teores de argila e matéria orgânica. O teor de argila foi superior e o de matéria orgânica inferior aos do solo estudado por Braida & Cassol (1996) e superior em matéria orgânica mas inferior em argila ao solo estudado por Cassol & Lima (1998). Em relação ao trabalho de Rockenbach (1992), os valores de argila foram praticamente iguais aos do solo estudado no presente trabalho, mas não se conhece o teor de matéria orgânica daquele solo. Outra possível explicação para o menor K_i do presente estudo pode ser a estabilidade de agregados remanescente dos oito anos de plantio direto.

Usando a equação proposta por Albuquerque & Cassol (1998), desenvolvida a partir de resultados obtidos em laboratório, $K_i = 7,19 \times 10^5 - (2,2 \times 10^5 \text{ DMP}) - (7,2 \times 10^5 \Delta\text{pH}_{\text{KCl}}) + (148 \text{ M})$, em que DMP = diâmetro médio ponderado dos agregados em água, $\Delta\text{pH}_{\text{KCl}}$ = diferença entre o pH em KCl e pH em água e M = fator textural M (valores não incluídos), encontrou-se um K_i de $0,92 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. Portanto, essa equação subestimou o K_i deste solo em 1,9 vez.

CONCLUSÕES

1. O valor básico da erodibilidade em entressulcos do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico estudado foi de $1.770.000 \text{ kg s m}^{-4}$. Esse valor pode ser utilizado em modelos físicos que separam a erosão em sulcos e em entressulcos.

2. As perdas de solo e água por erosão em entressulcos foram afetadas pelo preparo e consolidação de solo, sendo mais intensas nos preparos convencionais (convencional recente e convencional com dois meses de consolidação) do que no plantio direto (tanto com palha quanto sem palha).

3. O diâmetro mediano das partículas, que compunham o sedimento transportado em entressulcos, foi afetado pela consolidação do solo, tendo sido maior nas áreas sob plantio direto (longo tempo de consolidação) que nos sistemas convencionais recentemente preparados e com dois meses de consolidação.

AGRADECIMENTOS

Aos bolsistas de iniciação científica Márcio José Silveira, Celso Gonçalves, Emerson Wohleberg, Márcio Conceição e Daniel Prochnow, pelo auxílio nos trabalhos de campo e de laboratório.

LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, J.A. & CASSOL, E.A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2., Santa Maria, 1998. NRS-SBCS/UFSM. Santa Maria, 1998. p.271-274.
- ALBUQUERQUE, J.A.; CASSOL, E.A. & REINERT, D.J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade de agregados. R. Bras. Ci. Solo, 24:141-151, 2000.
- ALLISON, L.E. Organic carbon. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Chemical and microbiological methods. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.1367-1378.
- ALLMARAS, R.R.; BURWELL, R.E.; LARSON, W.E. & HOLT, R.F. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. Washington, USDA Conservation Research, 1996 (U.S. Gov. Print. Office, Rep. 7)
- ALVES, M.C. & CABEDA, M.S.V. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. R. Bras. Ci. Solo, 23:753-761, 1999.
- BARCELOS, A.A.; CASSOL, E.A. & DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. R. Bras. Ci. Solo, 23:35-43, 1999.
- BERTOL, I.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Comprimento crítico de declive em sistemas de preparos conservacionistas de solo. R. Bras. Ci. Solo, 21:139-148, 1997.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.363-375.

- BRAIDA, J.A. & CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos em um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:127-134, 1996.
- BRAIDA, J.A. & CASSOL, E.A. Relações da erosão em entressulcos com o tipo e a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:711-721, 1999.
- BRAIDA, J.A. & CASSOL, E.A. Tamanho de partículas do sedimento produzido por erosão em entressulcos sob diferentes coberturas do solo e por erosão em sulcos em um solo Podzólico Vermelho-Escuro. *R. Pesq. Agropec. Gaúcha*, 3:191-198, 1997.
- BROWN, L.C. & NORTON, L.D. Surface residue effects on soil erosion from ridges of different soils and formation. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 37:1515-1524, 1994.
- CASSOL, E.A. & LIMA, V.S. Erosão em entressulcos em um Podzólico Vermelho-Amarelo do Rio Grande do Sul sob diferentes preparos do solo e manejo de resíduos culturais. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 7., Fortaleza, 1998. Fortaleza, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. p.354-355.
- ELLIOT, W.J.; LIEBENOW, A.M.; LAFLÉN, J.M. & KOHL, K.D. A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987/88. The Ohio State University/USDA-Agricultural Research Service, 1989. p.A2-A25. (NSERL Report 3)
- ELTZ, F.L.F. & NORTON, L.D. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage, and canopy cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1746-1755, 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 1999. 412p.
- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HANN, C.T.; JOHNSON, H.P. & BRAKENSIEK, D.L., eds. Hydrologic modeling of small watersheds. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineering, 1982. p.297-380.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.383-399.
- GHUIDEY, F. & ALBERTS, E.E. Interrill erodibility affected by cropping and initial soil water movement. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 37:1809-1815, 1994.
- GILLEY, J.E.; FINKNER, S.C.; SPOMER, R.G. & MIELKE, L.N. Size distribution of sediment as affected by corn residue. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 29:1273-1277, 1986.
- HARDY, N.; SHAINBERG, I.; GAL, M. & KEREN, R. The effect of water quality and storm sequence upon infiltration rate and crust formation. *J. Soil Sci.*, 34:665-676, 1983.
- HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.
- HORTON, R.E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 5:399-417, 1940.
- HUANG, C.; BRADFORD, J.M. & CUSHMAN, J.H. A numerical study of raindrop impact phenomena: The elastic deformation case. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:855-861, 1983.
- JULIEN, P.Y. Erosion and sedimentation. New York, Cambridge University Press, 1998. 280p.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.
- KINELL, P.I.A. The influence of flow discharge on sediment concentrations in raindrops induced flow transport. *Aust. J. Soil Res.*, 26:565-582, 1988.
- LIEBENOW, A.M.; ELLIOT, W.J.; LAFLÉN, J.M. & KOHL, K.O. Interrill erodibility: Collection and analysis of data from cropland soils. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 33:1882-1888, 1990.
- MEYER, L.D. & HARMON, W.C. Interrill runoff and erosion: Effects of row-sideslope, rain energy, and rain intensity. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 35:1199-1203, 1992.
- MEYER, L.D. & HARMON, W.C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:1152-1157, 1984.
- NEARING, M.A.; BRADFORD, J.M. & HOLTZ, R.D. Measurement of force vs. time relations for waterdrop impact. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:1532-1536, 1986.
- NEARING, M.A.; WEST, L.T. & BRADFORD, J.M. Consolidation of an unsaturated illitic clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:929-934, 1988a.
- NEARING, M.A.; WEST, L.T. & BROWN, L.C. A consolidation model for estimating changes in rill erodibility. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 31:696-700, 1988b.
- NORTON, L.D. & BROWN, L.C. Time-effect on water erosion for ridge tillage. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 35:473-478, 1992.
- 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.*, 158:159-169, 1994.
- REICHERT, J.M. & NORTON, L.D. Surface seal micromorphology as affected by fluidized bed combustion bottom-ash. *Soil Technol.*, 7:303-317, 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.*, 58:1199-1205, 1994.
- REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:289-298, 1992.
- ROCKENBACH, C.A. Erosão em entressulcos sob diferentes coberturas por resíduos de trigo em um solo Podzólico Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 108p. (Tese de Mestrado)
- RÖMKENS, M.J.M. & WANG, J.Y. Soil roughness changes from rainfall. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 30:101-107, 1987.

- RÖMKENS, M.J.M; ROTH, C.B. & NELSON, D.W. Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:954-960, 1977.
- ROTH, C.H.; CASTRO FILHO, C. & MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:241-248, 1991.
- SAS INSTITUTE. SAS/STAT users guide. Version 6.03. Cary, SAS Institute. 1988.
- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características de solo afetando a estabilidade de agregados. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:311-317, 1998.
- SPEEDING, C.R.W. & LARGE, R.V. A point quadrat method for the description of pasture in terms of height and density. *J. Pol. Grassl. Soc.*, 12:229-234, 1957.
- VEIGA, M.; CABEDA, M.S.V. & REICHERT, J.M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:121-128, 1993.
- WATSON, D.A. & LAFLEN, J.M. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 29:98-102, 1986.
- WEST, L.T.; MILLER, W.P.; LANGDALE, R.R.; BRUCE, R.R.; LAFLEN, J.M. & THOMAS, A.W. Cropping system effects on interrill soil loss in the Georgia Piedmont. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:460-466, 1991.
- WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B. & CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Cons.*, 26:189-193, 1971.
- YOUNG, R.A. & ONSTAD, C.A. Characterization of rill and interrill eroded soil. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 21:1126-1130, 1978.

