

SEDIMENTOS TRANSPORTADOS PELA ENXURRADA EM EVENTOS DE EROSIÃO HÍDRICA EM UM NITOSSOLO HÁPLICO⁽¹⁾

Ildegardis Bertol⁽²⁾, Eva Vidal Vázquez⁽³⁾, Antonio Paz González⁽⁴⁾, Neroli
Pedro Cogo⁽⁵⁾, Rodrigo Vieira Luciano⁽⁶⁾ & Evandro Luis Fabian⁽⁷⁾

RESUMO

A quantidade e a distribuição de tamanho dos sedimentos transportados pela enxurrada são influenciadas pelo manejo, cobertura e cultivo do solo e pela chuva, entre outros fatores, constituindo-se em aspecto importante no planejamento conservacionista do solo. O objetivo deste trabalho foi quantificar os sedimentos transportados pela enxurrada e relacioná-los com a velocidade de enxurrada, durante o cultivo da soja, em um experimento de chuva simulada sobre um Nitossolo Háplico aluminico típico, nos sistemas de manejo do solo conduzido desde 1998: semeadura direta em solo nunca preparado e com resíduos queimados (SQ); e uma aração e duas gradagens (AG). Nesses tratamentos, cultivaram-se aveia, soja, ervilhaca, milho, aveia, feijão, nabo forrageiro, soja, ervilhaca, milho e soja, nesta sequência, durante cinco anos e meio. Estudou-se um tratamento adicional, em que o solo foi mantido sem cultivo, porém preparado com uma aração e duas gradagens na mesma época de semeadura das culturas nos demais tratamentos (SC). No último cultivo da soja, cinco testes de chuva simulada foram aplicados sobre os tratamentos, com intensidade variando de 63 a 67 mm h⁻¹ e duração de uma hora, 24 h após ter sido aplicada uma chuva (molhamento) com intensidade de 65 mm h⁻¹ e duração suficiente para iniciar a enxurrada. Os sedimentos foram quantificados em amostras de enxurrada coletadas 10 min antes do término de cada chuva simulada. O tamanho de sedimentos foi influenciado pelo sistema de

⁽¹⁾ Recebido para publicação em novembro de 2008 e aprovado em outubro de 2009.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos e Recursos Naturais, Universidade do Estado de Santa Catarina – CAV/UEDESC. Av. Luis de Camões 2090, CEP 88520-000 Lages (SC). Bolsista PQ (CNPq). E-mail: a2ib@cav.udesc.br.

⁽³⁾ Professora da Universidade da Coruña, UDC, Espanha. E-mail: evavidal@mail2.udc.es

⁽⁴⁾ Catedrático de Edafologia y Química Agrícola da Universidade da Coruña, UDC, Espanha. E-mail: tucho@udc.es

⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, CEP 91540-000 Porto Alegre (RS). E-mail: 00003704@ufrgs.br

⁽⁶⁾ Doutorando do Departamento de Solos e Recursos Naturais, CAV/UEDESC. CEP: 88520-000, Lages, SC. Bolsista (PROMOP). E-mail: a6rvl@cav.udesc.br

⁽⁷⁾ Aluno do Curso de Agronomia, CAV/UEDESC. Bolsista IC do CNPq. E-mail: a8rp@cav.udesc.br

manejo do solo e pela quantidade de chuva: na condição sem cultivo do solo, houve maior quantidade de sedimentos de maior diâmetro do que na condição em que o solo foi cultivado; na condição de solo cultivado, a quantidade de sedimentos de menor diâmetro foi maior do que no solo sem cultivo; e houve tendência de aumentar a quantidade de sedimentos na enxurrada com o aumento do número de chuva simulada, nas diversas condições de manejo do solo e de tamanhos de sedimento. O modelo exponencial ajustou-se aos dados de quantidade e tamanho dos sedimentos e aos de velocidade da enxurrada e cobertura do solo; a quantidade de sedimentos diminuiu com a redução de tamanho destes, e a velocidade da enxurrada diminuiu com o aumento da cobertura do solo. O modelo potencial ajustou-se aos dados de D_{50} e velocidade da enxurrada, tendo o D_{50} aumentado com o aumento da velocidade.

Termos de indexação: chuva simulada, índice D_{50} , propriedades dos sedimentos, velocidade da enxurrada.

SUMMARY: *SEDIMENTS TRANSPORTED FROM AN HAPLUDOX THROUGH WATER EROSION EVENTS*

Quantity and size distribution of sediments transported by runoff are influenced by soil management, cover and crop systems, and by rainfall, among other factors, representing an important aspect in soil conservation planning. The objective of this study was to quantify runoff sediments and relate them with runoff velocity, during soybean growth, in a simulated rainfall experiment initiated in 1998 on a typical Hapludox, under the following soil management systems: conventional tillage with one plowing plus two diskings (CT) and no-tillage on a never tilled soil with burned residues (NT). In these treatments, the rotation crop systems consisted of oat, soybean, vetch, corn, oats, bean, fodder radish, soybean, vetch, corn, and soybean. An additional treatment with bare soil with one plowing plus two diskings (BS) was also studied. Five simulated rainfall tests were applied to the treatments in the last soybean crop cycle, with an intensity of 63–67 mm h⁻¹ for one hour, 24 h after a pre-wetting rainfall, with an intensity of 65 mm h⁻¹ and long enough to initiate runoff. The sediments were quantified in runoff samples collected 10 minutes before the end of each simulated rainfall test, and were related with the runoff velocity. The sediment size in the runoff was influenced by soil management systems and the rainfall quantity. In the treatment without soil cover (BS), the quantity of coarse sediments was higher than in the treatments with cultivated soil, whereas in CT and NT treatments the quantity of fine-sized sediments was higher than in the BS treatment. More sediments tended to be transported in the runoff with the application of more rainfall events. The sediment quantity transported by runoff was related with the sediment size, fitting to a positive exponential model, while runoff velocity decreased exponentially with increased soil cover. The D_{50} index was related with other variables, fitting to the potential model and increasing with runoff velocity.

Index terms: simulated rainfall, D_{50} index, sediment properties, runoff velocity.

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica do solo influencia a distribuição de tamanho dos sedimentos transportados pela enxurrada, os quais são dependentes também das condições de superfície do solo e de características de enxurrada. A importância desse assunto está relacionada com o empobrecimento do solo no local de origem da erosão e com a contaminação do ambiente fora do seu local; isso ocorre porque diferentes tamanhos de sedimentos têm distintas capacidades de adsorção de produtos químicos, o que deve

influenciar a seleção de sistemas de manejo e de práticas conservacionistas do solo (Bertol et al., 2007).

O cultivo do solo com mobilização mecânica e a queima de resíduos vegetais aumentam a quantidade de sedimentos desagregados e disponíveis para o transporte pela enxurrada. Esses sistemas de manejo também modificam a distribuição de tamanho dos sedimentos presentes na enxurrada; normalmente, eles aumentam a quantidade de sedimentos grandes em relação aos pequenos. O cultivo sem mobilização do solo e a manutenção de resíduos vegetais na superfície diminuem a quantidade de sedimentos, o

que aumenta a proporção de sedimentos pequenos em relação aos grandes (Cogo et al., 1983; Leite et al., 2004).

Na erosão entressulcos predominam sedimentos de menor tamanho, enquanto na erosão em sulcos a predominância é de sedimentos de maior tamanho (Alberts et al., 1980). Isso é explicado pelo fato de que, na erosão entressulcos, a elevada energia das gotas de chuva produz grande quantidade de sedimentos de pequeno tamanho, enquanto na erosão em sulcos a alta energia do fluxo concentrado transporta grande quantidade de sedimentos de grande tamanho (Gabriels & Moldenhauer, 1978; Foster, 1982; Lu et al., 1989). Essas diferenças decorrem do fato de a mecânica de erosão nos entressulcos ser diferente daquela dos sulcos (Foster, 1982; Lu et al., 1989), cujas formas de erosão são fortemente influenciadas pelo tipo de preparo e manejo do solo. Esse fenômeno é diferenciado em solos desagregados pelo preparo mecânico com arado e grade, nos quais a superfície é mais sujeita ao sulcamento pela enxurrada, em relação a solos consolidados pela ausência de preparo, como na semeadura direta, nos quais a superfície é mais resistente ao sulcamento.

O manejo do solo por determinado período de tempo altera negativamente algumas de suas características físicas, devido ao uso de mecanização agrícola, as quais podem indicar maior ou menor degradação do solo; com isso, esse manejo pode propiciar aumento da erosão hídrica (Bertol et al., 2008). Assim, após esse período de tempo, o sistema de manejo aplicado ao solo deixa nele um efeito residual que influencia a resistência do solo à desagregação e o transporte pela erosão (Zoldan Junior et al., 2008). O manejo do solo efetuado com arado e grade, por exemplo, pode resultar numa condição de degradação da estrutura, ou seja, desagregação na superfície e compactação abaixo dela (Amado et al., 2007), além de menor cobertura do solo por resíduos. A semeadura direta, por outro lado, pode resultar em melhor condição física na superfície, sem grandes modificações abaixo dela, devido à diminuição de revolvimento mecânico e ao consequente aumento da consolidação do solo, além da manutenção de resíduos vegetais, que aumenta a cobertura e o teor de matéria orgânica (Eltz et al., 1989). Portanto, essas condições resultam em distintas modificações na superfície do solo, especialmente quanto à rugosidade (Bertol et al., 2008) e porosidade superficial. Essas condições influenciam o volume e a velocidade da enxurrada, bem como a quantidade e o tamanho dos sedimentos desagregados e disponíveis ao transporte pela erosão (Cogo et al., 1983; Bertol et al., 1997; Leite et al., 2004), devido ao efeito residual do manejo do solo, como verificado por Zoldan Junior et al. (2008) e Bertol et al. (2008).

Os objetivos deste trabalho foram quantificar os sedimentos transportados pela enxurrada em diferentes sistemas de manejo do solo, com a aplicação de chuvas simuladas durante o cultivo de soja;

relacionar a quantidade de tais sedimentos com o tamanho destes; relacionar a velocidade da enxurrada com a cobertura do solo por resíduos vegetais; e relacionar o D_{50} dos sedimentos com a velocidade da enxurrada.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido no município de São José do Cerrito, SC, situado entre as coordenadas de $28^{\circ} 56'$ latitude sul e $51^{\circ} 09'$ de longitude a oeste de Greenwich. A altitude média do local é de 846 m, e o clima na região é do tipo Cfb (subtropical úmido), segundo a classificação de Köppen. O solo no local do experimento é um Nitossolo Háplico Alumínico típico, com as seguintes características na camada de 0–0,2 m: 680 g kg^{-1} de argila; 210 g kg^{-1} de areia; 110 g kg^{-1} de silte; densidade de partículas de $2,80 \text{ g cm}^{-3}$; e $32,0 \text{ g kg}^{-1}$ de C orgânico.

A unidade experimental constituiu-se de uma parcela com dimensões de 3,5 m de largura por 11,0 m de comprimento paralelo ao declive (Figura 1). A parcela era limitada na extremidade superior e nas laterais por chapas galvanizadas com 0,2 m de altura, cravadas a 0,1 m no solo. Na extremidade inferior encontrava-se uma calha coletora de enxurrada, conectada a um tubo de PVC que conduzia a enxurrada até o local de coleta, 6 m abaixo dela. Utilizaram-se seis parcelas, numa área experimental em que a declividade era de $0,17 \text{ m m}^{-1}$ na média das parcelas, variando de $0,13$ a $0,21 \text{ m m}^{-1}$ entre elas.

A pesquisa foi realizada em campo, sob condições de chuva simulada, com auxílio de aparelho simulador de chuvas de braços rotativos (Swanson, 1975). O simulador cobria simultaneamente duas parcelas experimentais, distanciadas de 3,5 m entre si; com ele eram aplicadas chuvas de intensidade constante.



Figura 1. Parcela experimental de erosão sob chuva simulada.

Os tratamentos de manejo do solo eram: uma aração seguida de duas gradagens (AG); e semeadura direta em solo nunca preparado e com resíduos queimados (SQ). Nesses tratamentos, cultivaram-se aveia-preta (*Avena strigosa*), soja (*Glycine max*), ervilhaca comum (*Vicia sativa*), milho (*Zea mays*), aveia-preta, feijão-preto (*Phaseolus vulgaris*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), soja, ervilhaca comum, milho e soja, entre o inverno de 1998 e o verão de 2003/2004. Um tratamento adicional foi estudado, sem cultivo do solo, com uma aração seguida de duas gradagens (SC).

Sobre os tratamentos, foram aplicados, durante o último cultivo (soja), os seguintes testes de chuva simulada, com duração de uma hora: teste 1, variando de 64 a 66 mm h⁻¹; teste 2, de 65 a 68 mm h⁻¹; teste 3, de 64 a 65 mm h⁻¹; teste 4, de 64 a 67 mm h⁻¹; e teste 5, de 63 a 67 mm h⁻¹. A diferença de intensidade das chuvas não foi significativa e, por isso, não influenciou o transporte de sedimentos pela enxurrada. As chuvas de cada teste foram 24 h após aplicadas uma chuva de umedecimento, com intensidade de 65 mm h⁻¹ e duração suficiente para que a enxurrada se iniciasse. A chuva de umedecimento teve o objetivo de uniformizar, tanto quanto possível, o teor de água no solo nos diversos tratamentos, procurando, assim, diminuir ao máximo a influência dessa variável no transporte de sedimentos por erosão.

A densidade do solo foi determinada em amostras não deformadas, coletadas em anéis com 2,5 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro, na camada de 0,5 a 3,0 cm, conforme Kiehl (1979). A estabilidade de agregados em água foi determinada em amostras de solo coletadas na mesma camada daquelas da densidade, utilizando a técnica do tamisamento a úmido, pelo método de Yoder (1936), tendo sido expressa em diâmetro médio ponderado (DMP), conforme Kemper & Chepil (1965). A cobertura do solo por resíduos vegetais foi determinada pelo método do "metro rígido", descrito por Hartwig & Laflen (1978). A velocidade da enxurrada foi medida por meio de um corante à base de azul de metileno a 2 %, como descrito em Bertol et al. (1989).

Coletaram-se sob o fluxo amostras de enxurrada para determinação dos sedimentos por ela transportados, em um único momento, 10 min antes do final de cada chuva simulada, quando a taxa de enxurrada era constante; para isso, utilizou-se um conjunto de peneiras com malhas de 2; 1; 0,5; e 0,25 mm, conforme procedimento descrito em Bertol et al. (1997). Essas peneiras foram colocadas, nessa ordem, sobre um recipiente com capacidade de 2,5 L e o conjunto todo foi posicionado sob o fluxo até completo preenchimento do recipiente, durante aproximadamente 30 s. O conteúdo deste recipiente, em laboratório, foi passado por um novo conjunto de peneiras, com malhas de 0,125, 0,053 e 0,038 mm, colocado sobre outro recipiente. Assim, obtiveram-se os seguintes diâmetros de sedimento: > 2; 1 a 2; 0,5 a 1; 0,25 a 0,5; 0,125 a

0,25; 0,053 a 0,125; 0,038 a 0,053; e < 0,038 mm. Utilizando um procedimento semelhante ao adotado por Gilley et al. (1987), calculou-se o índice D₅₀ dos sedimentos. O D₅₀ representa um diâmetro de sedimentos em que 50 % da massa destes apresenta tamanho maior e 50 %, tamanho menor do que o diâmetro em questão.

A significância estatística dos efeitos dos tratamentos sobre as variáveis estudadas foi testada por meio de análise da variância, segundo o delineamento de parcelas subdivididas. As diferenças entre médias foram comparadas pelo teste t a 5 %. No caso da velocidade da enxurrada, massa de sedimentos na enxurrada e índice D₅₀ dos sedimentos, foi testada a interação entre tratamentos e testes de chuva simulada, por meio de análise da variância de Fischer a 5 %. Diversas relações foram estabelecidas entre variáveis, utilizando modelos exponenciais e potenciais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade do solo e a estabilidade dos agregados em água (DMP) diferiram com os tratamentos, tendo apresentado valores maiores na semeadura direta (SQ) do que nos demais tratamentos (Quadro 1). Na SQ, a densidade foi 9 % maior do que no solo continuamente preparado e sem cultivo (SC), enquanto o DMP foi 53 % maior. Isso indica que a queima dos resíduos vegetais e, em especial, a ausência de preparo do solo no SQ contribuíram para o aumento da densidade na camada superficial, refletindo no aumento do DMP, conforme constatado também por Amado et al. (2007). Assim, a ausência de preparo, especialmente, contribuiu positivamente para consolidar o solo e aumentar o DMP dos agregados, aumentando a sua resistência à erosão. O aumento do DMP, juntamente com o efeito da

Quadro 1. Densidade do solo (Ds) e Diâmetro Médio Ponderado de agregados (DMP) na camada de 0,5–3,0 cm de um Nitossolo Háplico, ao final do ciclo da soja, e cobertura do solo por resíduos culturais por ocasião da aplicação das chuvas (CS) nos diversos tratamentos (média dos testes de chuva e das repetições)

Tratamento	Ds	DMP	CS
	g cm ⁻³	mm	m ² m ⁻²
SC	1,03 B	3,49 C	0,00
AG	1,08 AB	4,03 B	0,05
SQ	1,12 A	5,34 A	0,25

SC: sem cultivo do solo, com uma aração seguida de duas gradagens; AG: uma aração seguida de duas gradagens; SQ: semeadura direta em solo nunca preparado e com resíduos queimados. Letras na coluna comparam os tratamentos (teste t a 5 %). Coeficiente de variação para Ds = 1,8 % e para DMP = 1,7 %.

cobertura do solo, reduziu a quantidade de solo e o tamanho dos sedimentos perdidos por erosão hídrica no tratamento SQ, em relação ao SC.

Os tratamentos com cultivo do solo (AG e SQ) apresentaram menores valores de velocidade de enxurrada a partir do teste 2, em comparação ao tratamento SC, com baixo coeficiente de variação (Quadro 2), e com interação significativa a 5 %, entre os tratamentos e os testes de chuva simulada. Essa variável foi 89 % maior no SC do que no SQ, na média dos testes 2 a 5 de chuva, devido à influência da rugosidade superficial do solo, conforme dados obtidos por Zoldan Junior et al. (2008) no mesmo experimento e por Bertol et al. (2008), bem como à cobertura superficial do solo. No SC, a velocidade de enxurrada aumentou em 2,8 vezes do teste 1 ao teste 5 de chuva, passando de 0,13 a 0,36 m s⁻¹. Isso revela o forte efeito da chuva no alisamento do solo entre os sulcos e da enxurrada na formação de sulcos de erosão na superfície, neste tratamento, conforme constatado por Zoldan Junior et al. (2008) e por Cogo et al. (1983). Nos demais tratamentos, a velocidade da enxurrada não apresentou a tendência de aumento com o aumento do número de chuvas, em razão do efeito de crescimento da cultura de soja nessa época; isso também ocorreu no tratamento SQ, também devido ao efeito da cobertura do solo por resíduos. A velocidade de enxurrada é um fator determinante do tamanho de sedimentos transportados, devido à sua influência na energia de transporte do escoamento superficial. Assim, essa variável influenciou o tamanho dos sedimentos transportados pela enxurrada.

A quantidade de sedimentos transportados pela enxurrada variou com os tratamentos e com os testes de chuva simulada, de maneira distinta em cada faixa de diâmetro das partículas (Figura 2), conforme constatado também por Bertol et al. (1997). Houve interação significativa a 5 % entre os tratamentos e

os testes de chuva simulada. Quanto aos sedimentos com diâmetro de partícula > 2 mm, o tratamento SC apresentou maiores quantidades de sedimentos transportados do que os demais; para os sedimentos situados na faixa de tamanho entre 0,25 e 0,5 mm, o tratamento SQ apresentou maior quantidade do que o AG e SC, na média dos testes de chuva (Figura 2 e Quadro 3). Até o teste 3, a maior parte dos sedimentos que estavam prontamente disponíveis para o transporte havia sido transportada pela enxurrada das chuvas anteriores. Além disso, as plantas de soja exerciam, até esse momento, pequena proteção ao solo nos tratamentos com esse cultivo (AG e SQ).

A queima dos resíduos culturais no SQ foi mais prejudicial ao solo do que a incorporação dos resíduos no AG, do ponto de vista dos sedimentos na enxurrada. A quantidade dos sedimentos com diâmetro > 1 mm (entre 1 e 2 mm e > 2 mm) foi 39 % maior no SQ do que no AG; para os sedimentos de tamanho < 0,5 mm (entre < 0,038 mm e 0,25 a 0,5 mm), a referida diferença foi de 55 %, na média dos testes de chuva (Quadro 3), com interação significativa a 5 %, entre os tratamentos e os testes de chuva simulada. Esse resultado revela que tal efeito foi mais pronunciado para os sedimentos menores do que para os maiores. Isso é preocupante do ponto de vista de conservação do solo, pois os sedimentos de menor diâmetro são mais ativos quimicamente do que os de maior, conforme verificado também por Bertol et al. (2008), e, por isso, podem contaminar mais o ambiente. Comparando a condição sem cultivo do solo (SC) com a condição cultivada (AG), ambas submetidas ao preparo mecânico, no SC a quantidade de sedimentos com

Quadro 2. Velocidade da enxurrada determinada no momento de taxa constante nos testes de chuva, nos diversos tratamentos, durante o ciclo da soja em um Nitossolo Háplico (média das repetições)

Tratamento	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
SC	0,13Ae	0,20Ad	0,30Ac	0,33Ab	0,36Aa
AG	0,13Ab	0,15Ba	0,10Cc	0,13Bb	0,15Ba
SQ	0,13Ac	0,15Bb	0,19Ba	0,13Bc	0,16Bb

SC: solo sem cultivo, com uma aração seguida de duas gradagens; AG: uma aração seguida de duas gradagens; SQ: semeadura direta em solo nunca preparado e com resíduos queimados. Letras maiúsculas, na coluna, comparam os tratamentos e letras minúsculas, na linha, comparam os testes (teste t a 5 %). Coeficiente de variação = 3,7 %. Interação significativa entre tratamento e teste de chuva, testada por análise de variância de Fischer a 5 %.

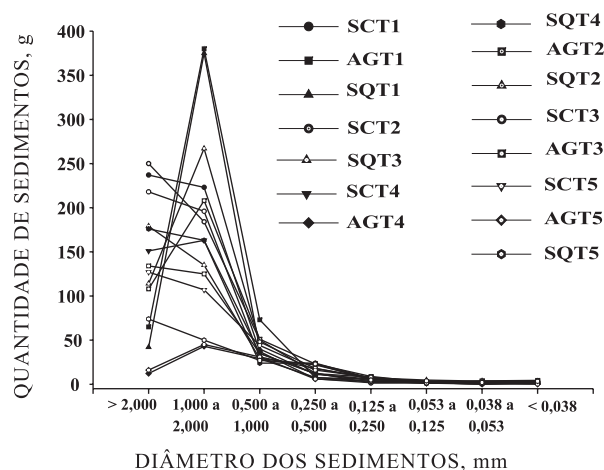


Figura 2. Distribuição dos sedimentos presentes na enxurrada, em função do diâmetro das partículas e do tratamento, durante o ciclo da soja nos testes 1 (T1), 2 (T2), 3 (T3), 4 (T4) e 5 (T5) de chuva simulada, em um Nitossolo Háplico. SC: solo sem cultivo, com uma aração e duas gradagens; AG: uma aração e duas gradagens; SQ: semeadura direta em solo nunca preparado e com resíduos queimados.

Quadro 3. Quantidade de sedimentos na enxurrada, em função do diâmetro das partículas nos diversos tratamentos, durante o ciclo da soja em um Nitossolo Háplico (média dos testes de chuva e das repetições)

Tratamento	Tamanho dos sedimentos (malha das peneiras - mm)								Total
	> 2	1 a 2	0,5 a 1	0,25 a 0,5	0,125 a 0,25	0,053 a 0,125	0,038 a 0,053	< 0,038	
	g								
SC	196,6 Aa	174,7 Bb	39,3 Ac	13,1 Bd	5,1 Ae	1,6 Aef	0,5 Ae	1,6 Aef	432,1
AG	67,1 Cb	160,2 Ca	43,7 Ac	11,2 Bd	5,1 Ae	1,7 Ae	2,0 Ae	2,2 Ae	293,0
SQ	116,9 Bc	198,0 Aa	33,6 Bc	19,4 Ad	6,3 Ae	3,6 Ae	2,3 Ae	2,9 Ac	382,8
Média	126,9	177,6	38,9	14,6	5,5	2,3	1,6	2,2	369,6

SC: solo sem cultivo, com uma aração seguida de duas gradagens; AG: uma aração seguida de duas gradagens; SQ: semeadura direta em solo nunca preparado e com resíduos queimados. Letras maiúsculas, na coluna, comparam os tratamentos e letras minúsculas, na linha, comparam os testes (teste t a 5 %). Coeficiente de variação = 4,7 %. Interação significativa entre tratamento e teste de chuva, testada por análise de variância de Fischer a 5 %.

tamanho > 1 mm foi 63 % maior do que no AG, enquanto para os sedimentos com tamanho < 0,5 mm praticamente não ocorreu diferença, na média dos testes de chuva. Esses resultados revelam que o cultivo do solo contribuiu mais para reduzir os sedimentos de maior diâmetro do que os de menor diâmetro, em relação ao solo sem cultivo, como observado também por Bertol et al. (1997). O tratamento SC apresentou quantidade de sedimentos 47 % maior do que a do AG, ao passo que o SQ apresentou tal quantidade 31 % maior do que a do AG, no total dos tamanhos de sedimentos.

Os valores de índice D_{50} dos sedimentos em geral foram altos (0,575 a 0,995 mm), quando comparados com os encontrados em outros trabalhos, em diversos tipos de solo e sistemas de manejo (Cogo et al., 1983 – 0,011 a 0,033 mm; Bertol et al., 1997 – 0,04 a 0,32 mm) (Quadro 4), com interação significativa entre tratamentos e testes de chuva simulada. O D_{50} foi maior no SC, comparando os tratamentos, e maior no teste 3 de chuva, comparando os testes. O maior D_{50} no SC justifica-se principalmente pela maior velocidade da enxurrada (Quadro 2) e também pelo maior sulcamento do solo (observação visual dos autores); a maior velocidade da enxurrada e o maior sulcamento do solo aumentaram a energia de desagregação e transporte da enxurrada no SC em relação aos demais tratamentos, conforme constatado também por Cogo et al. (1983). O sulcamento do solo ocorreu também no tratamento SQ, especialmente do teste 3 em diante; por isso, neste tratamento os valores de D_{50} também foram altos, nos testes 3 e 4 de chuva.

A quantidade de sedimentos transportados pela enxurrada apresentou relação exponencial, decrescente, com o diâmetro dos sedimentos, significativa a 5 % (Figura 3); isso confirma que a quantidade de sedimentos diminui com a redução do diâmetro das partículas do solo que compõem tais sedimentos (Cogo et al., 1983). Portanto, sistemas de manejo que controlam melhor as perdas de solo, em termos de quantidade, podem não controlar

adequadamente tais perdas, em termos de qualidade; quando diminui o total de solo perdido por erosão, diminui a quantidade de sedimentos de maior diâmetro – em consequência, aumenta a quantidade de sedimentos de menor diâmetro presentes na enxurrada. Isso aumenta o risco de contaminação por esses sedimentos, já que normalmente eles contêm maiores teores de produtos químicos adsorvidos do que os sedimentos maiores. Os dados apresentados no quadro 4 e relacionados na figura 2 indicam que as duas maiores classes de diâmetro de sedimentos (> 2 mm e 1 a 2 mm) compuseram mais de 80 % da quantidade total de sedimentos retidos nas diversas malhas de peneiras utilizadas no estudo.

Os sedimentos transportados pela enxurrada são influenciados pelo fluxo superficial, e este é influenciado pelas características da superfície do solo, entre outros fatores. A cobertura do solo por resíduos culturais, a velocidade da enxurrada e o índice D_{50} dos sedimentos relacionaram-se entre si significativamente a 5 %. A

Quadro 4. Índice D_{50} dos sedimentos transportados pela enxurrada, nos testes de chuva sobre os diversos tratamentos, durante o cultivo da soja em um Nitossolo Háplico (média das repetições)

Tratamento	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
	mm				
SC	0,915Ab	0,995Aa	0,975Aa	0,895Abc	0,875Ac
AG	0,735Bc	0,785Bb	0,905Ba	0,575Bd	0,600Cd
SQ	0,735Bd	0,785Bc	0,975Aa	0,915Ab	0,800Bc

SC: solo sem cultivo, com uma aração seguida de duas gradagens; AG: uma aração seguida de duas gradagens; SQ: semeadura direta em solo nunca preparado e com resíduos queimados. Letras maiúsculas, na coluna, comparam os tratamentos e letras minúsculas, na linha, comparam os testes (teste t a 5 %). Coeficiente de variação = 1,5 %. Interação significativa entre tratamento e teste de chuva, testada por análise de variância de Fischer a 5 %.

velocidade da enxurrada diminuiu exponencialmente com o aumento da cobertura do solo, tendo sido a variação de velocidade explicada em 76 % pela variação da cobertura (Figura 4). O índice D_{50} , por sua vez, aumentou potencialmente com o aumento da velocidade da enxurrada, tendo sido a variação de tal índice explicada em 99 % pela variação da velocidade (Figura 5). Isso significa que a velocidade da enxurrada e a cobertura do solo são as duas características de superfície do solo que melhor explicam a distribuição de tamanho de sedimentos transportados pela enxurrada, conforme constatado também por Cogo et al. (1983), Lu et al. (1989) e Bertol

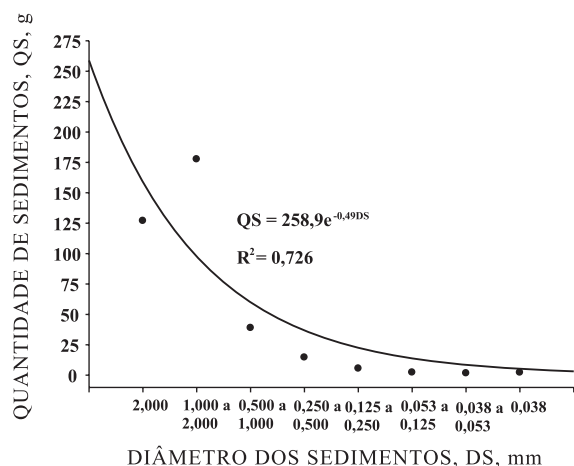


Figura 3. Relação entre a quantidade de sedimentos transportados na enxurrada, QS, e o diâmetro dos sedimentos, DS, durante o cultivo da soja em um Nitossolo Háplico (média das repetições, dos tratamentos e dos testes de chuva simulada).

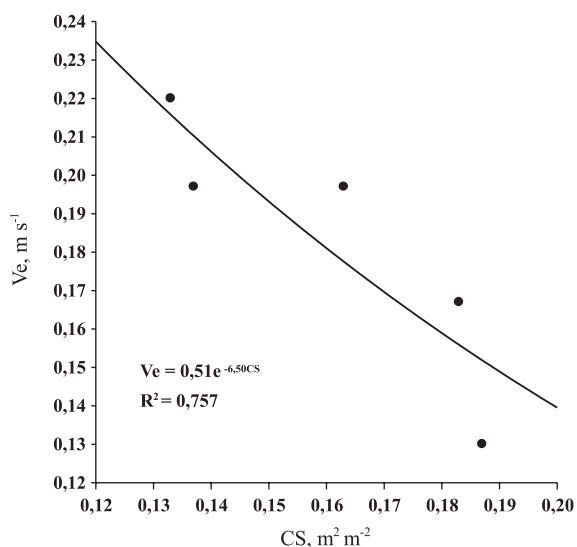


Figura 4. Relação entre a velocidade da enxurrada, V_e , e a cobertura do solo por resíduos culturais, CS, nos testes de chuva simulada durante o cultivo da soja em um Nitossolo Háplico (média das repetições e dos tratamentos).

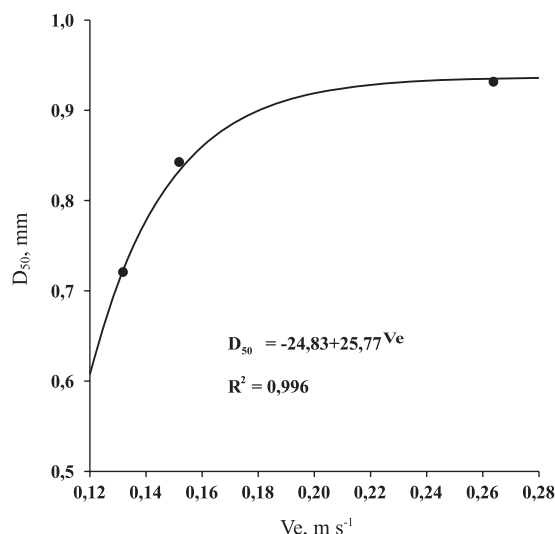


Figura 5. Relação entre o índice D_{50} dos sedimentos e a velocidade da enxurrada, V_e , nos tratamentos durante o cultivo da soja, em um Nitossolo Háplico (média das repetições e dos testes de chuva).

et al. (1997). Os resíduos culturais na superfície do solo, além de atuarem na redução da energia cinética das gotas de chuva, reduzindo a desagregação do solo, atuam na redução da velocidade da enxurrada, aumentando o tempo de deposição dos sedimentos, sobretudo os maiores e mais densos. A velocidade da enxurrada, diminuída, perde energia de transporte e, por isso, passa a transportar, preferencialmente, os sedimentos de menor diâmetro e, ou, menos densos. Assim, de acordo com o conceito do índice D_{50} , em velocidades de enxurrada menores, maior quantidade de sedimentos de menor diâmetro e, ou, menos densos é transportada, o que compensa o menor número de sedimentos de maior diâmetro e, ou, mais densos em transporte.

CONCLUSÕES

1. O tamanho de sedimentos transportados pela enxurrada foi influenciado pelo sistema de manejo do solo e pela quantidade de chuva durante o ciclo da soja: na condição sem cultivo do solo, houve maior quantidade de sedimentos de maior tamanho do que nas condições em que o solo foi cultivado; na condição de solo cultivado, a quantidade de sedimentos de menor tamanho foi maior do que na condição em que o solo não foi cultivado; e houve tendência de aumentar a quantidade de sedimentos na enxurrada com o aumento do número de chuvas simuladas aplicadas durante o ciclo da soja, nas diversas condições de manejo do solo e de tamanho de sedimentos.

2. O modelo exponencial explicou os dados de quantidade e tamanho dos sedimentos e a velocidade da enxurrada e cobertura do solo por resíduo vegetal; a quantidade de sedimentos diminuiu com a redução de seu tamanho e a velocidade da enxurrada diminuiu com o aumento da cobertura do solo; o modelo potencial explicou os dados de D_{50} e velocidade da enxurrada, tendo o primeiro aumentado com o aumento da velocidade.

LITERATURA CITADA

- ALBERTS, E.E.; MOLDENHAUER, W.C. & FOSTER, G.R. Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:590-595, 1980.
- AMADO, T.J.C.; CONCEIÇÃO, P.C.; BAYER, C. & ELTZ, F.L.F. Qualidade do solo avaliada pelo "soil quality kit test" em dois experimentos de longa duração no Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:109-121, 2007.
- BERTOL, I.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Cobertura morta e métodos de preparo do solo na erosão hídrica em solo com crosta superficial. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:373-379, 1989.
- BERTOL, I.; COGO, N.P. & MIQUELLUTI, D.J. Sedimentos transportados pela enxurrada relacionados à cobertura e rugosidade superficial do solo e taxa de descarga. *Pesq. Agropec. Gaúcha*, 3:199-206, 1997.
- BERTOL, I.; ENGEL, F.L.; MAFRA, A.L.; BERTOL, O.B. & RITTER, S.R. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. *Soil Tillage Res.*, 94:142-150, 2007.
- BERTOL, I.; ZOLDAN JUNIOR, W.A.; FABIAN, E.L.; ZAVASCHI, E.; PEGORARO, R. & PAZ GONZÁLEZ, A. Efeito de uma escarificação e da erosividade de chuvas sobre algumas variáveis de valores de erosão hídrica em sistemas de manejo de um Nitossolo Háplico. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:747-757, 2008.
- COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C. & FOSTER, G.R. Effect or crop residue, tillage-induced roughness, and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1005-1008, 1983.
- ELTZ, F.L.F.; PEIXOTO, R.T.G. & JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparos do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. *R. Bras. Solo*, 13:259-267, 1989.
- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: BASSELMAN, J.A. *Hydrological modeling of small watersheds*. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineering, 1982. p.297-300.
- GABRIELS, D. & MOLDENHAUER, W.C. Size distribution of eroded material from simulated rainfall: Effect over a range of texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:954-958, 1978.
- GILLEY, J.E.; FINKNER, S.C. & VARVEL, G.E. Size distribution of sediment as affected by surface residue and slope length. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 30:1419-1424, 1987.
- HARTWING, R.O. & LAFLEN, I.M. A meterstick method for measuring crop residue cover. *J. Soil Water Conserv.*, 33:90-91, 1978.
- KIEHL, E.J. *Manual de edafologia*. São Paulo, CERES, 1979. 262p.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. Part 1. p.499-510. (Agronomy, 9)
- LEITE, D.; BERTOL, I.; GUADAGNIN, J.C.; SANTOS, E.J. & RITTER, S.R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada: I. Perdas de solo e água. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:1033-1044, 2004.
- LU, J.Y.; CASSOL, E.A. & MOLDENHAUER, W.C. Sediment transport relationships for sand and silt loam soils. *Trans. Am. Soc. Agric.*, 32:1923-1931, 1989.
- SWANSON, N.P. Suggestions for use the rotating-boom field plot rainfall simulator to obtain data for application of the soil loss equation. Paraná, FAO, University of Nebraska, 1975. 6p.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Agron.*, 28:337-351, 1936.
- ZOLDAN JUNIOR, W.A.; BERTOL, I.; PEGORARO, R.; FABIAN, E.L.; ZAVASCHI, E. & VIDAL VÁZQUEZ, E. Rugosidade superficial do solo formada por escarificação e afetada pela erosividade da chuva. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:353-362, 2008.