

SEDIMENTOS TRANSPORTADOS PELA ENXURRADA RELACIONADOS À COBERTURA E RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO SOLO E TAXA DE DESCARGA¹

ILDEGARDIS BERTOL², NEROLI PEDRO COGO³, DAVID JOSÉ MIQUELLUTI⁴

RESUMO – O conhecimento da quantidade e distribuição de tamanho dos sedimentos disponíveis ao transporte pela enxurrada, influenciados pelo cultivo do solo, é importante no planejamento conservacionista. O efeito do tipo e quantidade de resíduos culturais, cobertura e rugosidade superficial do solo e taxa de descarga, sobre a velocidade da enxurrada e distribuição de tamanho dos sedimentos erodidos, foi avaliado no campo sob chuva simulada entre 1992 e 1994. Utilizou-se um solo podzólico vermelho amarelo, com declividade média de 0,066 m/m, em Eldorado do Sul (RS). Os tratamentos consistiram de semeadura direta, escarificação e aração+gradagem, na presença e ausência de resíduos culturais de milho e trigo. O índice D_{50} aumentou com o aumento da taxa de descarga, até determinado valor de tamanho dos sedimentos, diminuindo após esse tamanho, independente da cobertura e rugosidade do solo. Isto ocorreu porque quando todos os sedimentos previamente separados da massa do solo já haviam sido transportados, a enxurrada teve que dispende parte da energia para a separação e transporte de novos sedimentos, o que fez com que diminuísse o diâmetro médio dos novos sedimentos presentes no fluxo. Para uma dada taxa de descarga, os valores de D_{50} diminuíram com o aumento da cobertura e rugosidade.

Palavras-chave: Erosão do solo, índice D_{50} , cobertura do solo, taxa de descarga.

SIZE-DISTRIBUTION OF ERODED SEDIMENTS IN THE RUNOFF WATER AS AFFECTED BY RESIDUE MULCH, SURFACE ROUGHNESS, AND DISCHARGE RATE

ABSTRACT – Knowing the amount and size-distribution of sediments transported in the runoff water is important for both erosion studies and farm planning. The effect of type and amount of crop residues, mulch cover, surface roughness, and runoff rate on the size-distribution of eroded sediments, as evaluated by the D_{50} index, was investigated in a field study using simulated rainfall, in Eldorado do Sul-RS, Brazil, during the period of 1992 to 1994. The soil used in the experiment was a red-yellow podzolic, clay loam in texture, with 0.066 m/m slope. Treatments consisted of no-till, chisel plow, and plow-and-disk all of them in the presence and absence of cornstalk and wheat straw. The D_{50} index increased with runoff discharge up to a given size of eroded sediments and decreased thereafter, regardless of mulch cover and surface roughness. This was explained in terms of amount of sediments readily available for transport and in terms of available runoff energy to detach new sediments. For a given runoff rate, the D_{50} index values decreased with mulch cover and surface roughness.

Key words: soil erosion, D_{50} index for eroded sediments, mulch cover, runoff rate.

INTRODUÇÃO

A utilização do solo com culturas anuais, especialmente quando submetido continuamente ao preparo convencional, aumenta a quantidade de sedimentos disponíveis ao transporte pelo escoamento superficial. O conhecimento da quantidade, distribuição de tamanho e características físicas desses sedimentos é de grande importância para a seleção de práticas conservacionistas adequadas à redução da erosão hídrica e poluição das águas e à recuperação de solos fisicamente degradados.

O diâmetro dos sedimentos transportados na enxurrada é influenciado pelo tipo de processo erosivo

(ALBERTS et al., 1980), tipo de solo (LU et al., 1989), cobertura e rugosidade superficial do solo (COGO et al., 1983;) e inclinação do declive (GILLEY et al., 1987).

O aumento da cobertura do solo diminui a velocidade do fluxo superficial (COGO, 1981; BERTOL, 1995), diminuindo acentuadamente sua capacidade de transporte de sedimentos (COGO et al., 1983). Os resíduos culturais representam, ainda, uma barreira física ao escoamento da água sobre a superfície do solo, induzindo a deposição dos sedimentos transportados pelo fluxo. Isto acarreta uma diminuição na quantidade de sedimentos de maior diâmetro e um aumento relativo na quantidade de sedimentos de menor diâmetro transportados pelo escoamento superficial (COGO et al.,

1. Trabalho desenvolvido com recursos parciais do Departamento de Solos da UFRGS e da FAPERGS/RS.

2. Eng. Agr., Dr. – Prof. do Departamento de Solos do CAV/UEDESC, Av. Luiz de Camões 2090, Caixa Postal 281, 88520-000 Lages – SC/BRASIL. Bolsista de pesquisa do CNPq.

3. Eng. Agr., Ph. D. – Prof. Adjunto do Departamento de Solos da UFRGS, Av. Bento Gonçalves 7712, Caixa Postal 776, 91501-970 Porto Alegre – RS/BRASIL. Bolsista de pesquisa do CNPq.

4. Eng. Agr., Prof. do Departamento de Engenharia Rural do CAV/UEDESC, Av. Luiz de Camões 2090, Caixa Postal 281, 88520-000 Lages – SC/BRASIL. Recebido para publicação em 03/05/1997.

1983; LOPES et al., 1987). LOPES et al. (1987) constataram que os resíduos de soja, trigo e milho não diferiram quanto ao índice D_{50} dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial.

As condições de superfície do solo influenciam a distribuição de tamanho dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial. Em solo descoberto, uma alta rugosidade superficial induzida pelo preparo diminui o índice D_{50} dos sedimentos, enquanto que em condições de baixa rugosidade predominam sedimentos de maior diâmetro presentes no fluxo (COGO et al., 1983).

Em condições de lavoura, a distribuição de tamanho dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial é influenciada pela cobertura e rugosidade superficial do solo. Quando a superfície do solo apresenta baixa rugosidade, a cobertura é relativamente mais eficaz na diminuição do tamanho dos sedimentos erodidos do que quando a superfície apresenta alta rugosidade, na qual o efeito da cobertura é relativamente menos importante do que o efeito da rugosidade (COGO et al., 1983).

O objetivo do estudo foi avaliar a influência da cobertura e rugosidade superficial do solo e da taxa de descarga sobre a distribuição de tamanho dos sedimentos transportados pela enxurrada sob chuva simulada.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido num solo podzólico vermelho-amarelo com textura franco arenosa no horizonte superficial, localizado na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Eldorado do Sul – RS, no período de 1992 a 1994. O solo apresentava declividade média de 0,066 m/m e, na camada de 0-10 cm de profundidade, 200 g/kg de argila, 560 g/kg de areia, 240 g/kg de silte, 21 g/kg de matéria orgânica, 0,38 m³/m³ de porosidade total e densidade aparente de 1,59 kg/dm³.

A área experimental foi preparada com uma aração mais três gradagens e semeada com aveia em maio de 1992. Após a colheita da aveia, em novembro de 1992, foi semeado milho em semeadura direta, no sentido paralelo ao declive, com espaçamento de um metro entre fileiras e cinco plantas por metro linear. Em abril de 1993, o milho foi colhido, tendo produzido 12 t/ha de resíduo cultural da parte aérea.

A unidade experimental, constituída de uma parcela com 3,5 x 11 m, foi instalada conforme consta em IAPAR EMBRAPA (1975). Utilizaram-se doze parcelas e, para a aplicação das chuvas simuladas, um simulador de chuva de braços rotativos (SWANSON, 1975).

Sobre o resíduo de milho recém-colhido e uniformemente distribuído sobre a superfície do solo, foram efetuados os seguintes tratamentos de preparo do solo, em duas repetições: a) **semeadura direta, com o resí-**

duo cultural de milho (SDIc/rm) – as 12 t/ha do resíduo de milho foram mantidas na superfície e o solo não foi mobilizado, resultando numa cobertura de 95 % da superfície do solo; b) **semeadura direta, sem o resíduo cultural de milho (SDIs/rm)** – o resíduo de milho foi quase que totalmente removido manualmente da superfície, permanecendo cerca de 0,5 t/ha de pequenas peças do resíduo; as soqueiras da cultura foram mantidas e o solo não foi mobilizado, resultando numa cobertura de 43 % da superfície do solo, ocasionada por frágeis resíduos; c) **escarificação, com o resíduo cultural de milho (ESCCc/rm)** – as 12 t/ha do resíduo de milho foram mantidas na superfície e o solo foi preparado com um escarificador a 15-20 cm de profundidade no sentido longitudinal ao declive. A distância entre as hastes do escarificador foi de 30 cm, resultando numa cobertura de 78 % da superfície do solo após o preparo; d) **escarificação, sem o resíduo cultural de milho (ESCCs/rm)** – o resíduo de milho foi quase que totalmente removido manualmente da superfície do solo, permanecendo cerca de 0,5 t/ha de pequenas peças do resíduo; as soqueiras da cultura foram mantidas e o solo foi preparado como no tratamento (c), resultando numa cobertura de 15 % da superfície do solo após o preparo; e) **aração+gradagem, com remoção e posterior retorno do resíduo cultural de milho (A+Gc/rm)** – o resíduo de milho foi quase que totalmente removido manualmente da superfície do solo e as soqueiras da cultura foram mantidas. O preparo do solo foi executado com uma aração a 15-20 cm de profundidade, mais uma gradagem a 10-12 cm de profundidade, no sentido longitudinal ao declive. Após o preparo, todo o resíduo de milho anteriormente removido foi recolocado uniformemente sobre as parcelas, resultando numa cobertura de 96 % da superfície do solo; f) **aração+gradagem, sem o resíduo cultural de milho (A+Gs/rm)** – o resíduo de milho foi quase que totalmente removido manualmente da superfície do solo, permanecendo cerca de 0,5 t/ha e as soqueiras da cultura foram mantidas. O preparo do solo foi executado como no tratamento (e) e o resíduo removido não retornou à superfície, resultando numa cobertura de 6 % da superfície do solo.

Em maio de 1993, após o final dos testes de chuva simulada sobre os tratamentos de preparo do solo recém-descritos, foi semeado o trigo, em semeadura direta. Em novembro de 1993, o trigo foi colhido, tendo produzido 2,6 t/ha de resíduo cultural da parte aérea. Após a colheita do trigo, foram novamente efetuados os tratamentos de preparo do solo, em duas repetições: a) **semeadura direta, com o resíduo cultural de trigo (SDIc/rt)** – nestas parcelas, havia sido retirado o resíduo de milho do cultivo anterior, como descrito no tratamento “SDIs/rm”. As 2,6 t/ha do resíduo de trigo recém-colhido foram mantidas na superfície e o solo não foi mobilizado, resultando numa cobertura de 90 % da

superfície do solo; **b) semeadura direta, sem o resíduo cultural de trigo (SDIs/rt)** – nestas parcelas, o resíduo de trigo do tratamento acima descrito “SDIc/rt” foi quase que totalmente removido manualmente da superfície do solo após o teste de chuva simulada, permanecendo cerca de 0,2 t/ha de pequenas peças do resíduo e o solo não foi mobilizado, resultando numa cobertura de 18 % da superfície do solo; **c) escarificação, com os resíduos culturais de trigo+milho (ESCc/rt+m)** – nestas parcelas, haviam ainda cerca de 2,7 t/ha do resíduo de milho remanescente do cultivo anterior. Este resíduo, mais as 2,6 t/ha do resíduo de trigo recém-colhido, foi mantido na superfície do solo, o qual foi preparado como descrito no tratamento “ESCc/rm”, resultando numa cobertura de 71 % da superfície do solo após o preparo; **d) escarificação, sem os resíduos culturais de trigo+milho (ESCs/rt+m)** – nestas parcelas, o resíduo de milho do cultivo anterior já havia sido retirado por ocasião do teste de chuva simulada e, agora, foi quase que totalmente removido manualmente também o resíduo recém-colhido de trigo, permanecendo cerca de 0,2 t/ha de pequenas peças do resíduo, mantendo-se também as soqueiras da cultura. O solo foi preparado como no tratamento “ESCs/rm”, resultando numa cobertura de 6 % da superfície do solo após o preparo; **e) aração+gradagem, com remoção e posterior retorno dos resíduos culturais de trigo+milho (A+Gc/rt+m)** – as cerca de 4 t/ha do resíduo de milho remanescente do cultivo anterior e as 2,6 t/ha do resíduo de trigo recém-colhido foram inicialmente removidas manualmente, mantendo-se apenas as soqueiras da cultura na superfície. O solo foi então preparado como no tratamento “A+Gc/rm” e os resíduos de trigo+milho foram recolocados uniformemente sobre a superfície das parcelas após o preparo, resultando numa cobertura de 90 % da superfície do solo; **f) aração+gradagem, sem os resíduos culturais de trigo+milho (A+Gs/rt+m)** – nestas parcelas, o resíduo de milho do cultivo anterior já havia sido removido por ocasião do teste de chuva simulada e, agora, foi removido também o resíduo de trigo recém-colhido, mantendo-se apenas as soqueiras da cultura na superfície. O solo foi então preparado como no tratamento “A+Gs/rm” e os resíduos de trigo+milho não retornaram à superfície, resultando numa cobertura de 1 % da superfície do solo após o preparo.

Ambos os experimentos receberam a seguinte série de chuva simulada, com intensidade constante de 64 mm/h e durações variáveis: 1) primeira chuva, com duração suficiente para que a enxurrada alcançasse taxa constante; 2) dez a quinze minutos após o término da primeira chuva, aplicou-se a segunda chuva, com duração de dez minutos; e 3) imediatamente após o término da segunda chuva, aplicou-se a terceira

chuva, com duração de sessenta minutos ininterruptos, simultaneamente à aplicação de seis níveis de fluxo extra de água limpa, com duração de dez minutos cada um. Esta chuva teve seis segmentos, com duração de dez minutos cada um, com o objetivo de estimar comprimentos de declive mais longos (SWANSON e DEDRICK, 1966).

A umidade do solo foi determinada em amostras coletadas nas parcelas experimentais imediatamente antes da aplicação das chuvas. Durante a aplicação das chuvas e dos fluxos extras de água, coletaram-se amostras de enxurrada de três em três minutos e mediu-se sua taxa de descarga para posterior quantificação das perdas de solo e água, medindo-se ainda a velocidade da enxurrada, como descrito por COGO (1981). A percentagem de cobertura do solo foi determinada pelo método descrito por HARTWIG e LAFLÉN (1978) e a rugosidade superficial do solo obtida pelo método descrito por KUIPERS (1957), ambas determinadas após o preparo do solo. O índice D_{50} , o qual representa um tamanho de sedimentos erodidos em que 50 % da massa é constituída de partículas maiores e 50 % de partículas menores do que tal tamanho, foi determinado graficamente. No gráfico, traçou-se uma linha partindo do 50 % de massa acumulada de sedimentos (na ordenada) até o ponto de intersecção com a curva correspondente a cada tipo de preparo e de resíduo superficial do solo e, deste ponto, traçou-se uma linha vertical até as classes de tamanho de sedimentos (na abscissa), obtendo-se assim o índice D_{50} (Amado, 1985). Para a obtenção da distribuição de tamanho dos sedimentos erodidos, foi utilizado um conjunto de peneiras com aberturas de malha de 2,00, 1,00, 0,50, 0,25, 0,125, 0,053 e 0,037 mm de diâmetro, de tal modo que os sedimentos estudados apresentavam um diâmetro variando de $< 0,037$ a $> 2,00$ mm.

Os dados foram interpretados utilizando análise de regressão linear e não-linear simples e análise da variância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O preparo do solo executado com escarificador ocasionou uma diminuição de 18 % na cobertura após a colheita do milho e 21 % após a colheita do trigo, em relação à semeadura direta, quando os resíduos culturais foram mantidos na superfície (Tabela 1). Esta diferença na diminuição da percentagem de cobertura do solo ocasionada pela escarificação, entre os dois resíduos, é explicada pela quantidade de resíduo existente na superfície do solo antes do preparo, 12 t/ha do resíduo de milho e 2,6 t/ha do resíduo de trigo, além da diferença de constituição física entre eles, conforme argumentado por BERTOL et al. (1997).

TABELA 1 – Valores médios de cobertura e rugosidade superficial após o preparo do solo e velocidade do escoamento superficial durante o período de taxa constante da primeira chuva, em diferentes preparos do solo após os cultivos de milho e trigo, na presença e ausência dos resíduos culturais

Preparo do solo	Após a colheita do milho		Após a colheita do trigo	
	Resíduos mantidos na superfície	Resíduos removidos da superfície	Resíduos mantidos na superfície	Resíduos removidos da superfície
Cobertura superficial do solo (%)				
Semeadura direta	95Aa	43Ba	90Aa	18Ba
Escarificação	78Ab	15Bb	71Ab	6Bb
Aração+gradagem	96Aa	6Bc	90Aa	1Bc
Coefficiente de variação	3,6		1,6	
Rugosidade superficial do solo (cm)				
Semeadura direta	1,60Ac	0,47Bc	1,27Ac	1,02Bc
Escarificação	5,03Aa	4,23Bb	4,04Ab	4,00Ab
Aração+gradagem	4,23Bb	4,95Aa	4,37Ba	4,56Aa
Coefficiente de variação, %	8,3		2,6	
Velocidade do escoamento superficial (m/s)				
Semeadura direta	0,008Bb	0,064Ab	0,040Bb	0,073Ac
Escarificação	0,013Bab	0,048Ac	0,029Bc	0,086Ab
Aração+gradagem	0,018Ba	0,150Aa	0,048Ba	0,150Aa
Coefficiente de variação, %	5,1		5,6	

Letra maiúscula na horizontal compara tratamento de resíduo dentro da condição preparo e letra minúscula na vertical compara tratamento de preparo dentro da condição resíduo, em cada cultura separadamente, pelo teste de Duncan ao nível de 5 % de probabilidade.

O resíduo de milho era constituído por peças grandes e rígidas, dificultando a incorporação, enquanto que o resíduo de trigo compunha-se de peças pequenas e flexíveis, facilitando sua incorporação pelos equipamentos de preparo do solo. Quando os resíduos foram manualmente removidos, restando apenas fragmentos frágeis na superfície do solo, a diminuição da cobertura ocasionada pela escarificação foi da ordem de 65 % após a colheita do milho e 67 % após a colheita do trigo, em relação à semeadura direta. Neste caso, a diferença na diminuição da cobertura ocasionada pela escarificação é explicada, principalmente, pela diferença na cobertura existente antes do preparo, a qual era de 43 % após o milho e 18 % após o trigo (Tabela 1). Em geral, a diminuição na cobertura do solo é explicada pela semi-incorporação dos resíduos ocasionada pela operação de escarificação. Os resíduos de milho ocasionaram maior cobertura do solo do que os resíduos de trigo+milho, tanto na sua presença quanto ausência sobre a superfície. Isto é explicado pela maior quantidade do resíduo de milho (12 t/ha) do que da mistura dos resíduos de trigo (2,6 t/ha) e de milho remanescente do cultivo anterior (4 t/ha).

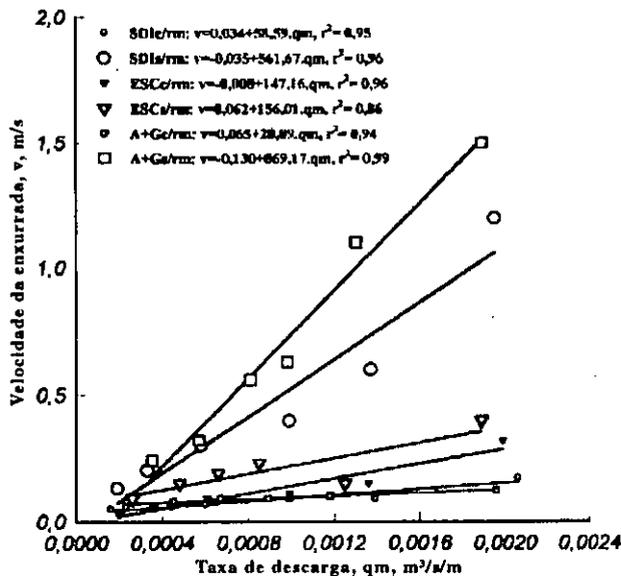
Em ambos os cultivos, a rugosidade superficial foi maior na presença do que na ausência dos resíduos culturais, em todos os tratamentos de preparo do solo estudados, com exceção da aração+gradagem (Tabela 1). Na semeadura direta, o aumento da rugosidade foi ocasionado unicamente pelo efeito dos resíduos culturais sobre a superfície do solo. Na escarificação, no entanto, isto ocorreu devido ao efeito combinado do preparo e dos resíduos. Na aração+gradagem, a rugosidade diminuiu na presença dos resíduos em relação a sua ausência. Isto ocorreu porque, ao serem distribuídos após o preparo sobre a superfície do solo, os resíduos ocuparam as depressões do microrelevo, obstruindo-as e diminuindo a rugosidade superficial. Dentre todos os tratamentos, a semeadura direta apresentou a menor rugosidade, explicada pela ausência de preparo do solo e ocorrência de consolidação num período de tempo relativamente longo, a partir da instalação da área experimental, o que está de acordo com dados obtidos por COGO (1981) e BERTOL (1995).

Em geral, a velocidade da enxurrada foi influenciada pela cobertura e rugosidade superficial durante o período de taxa constante de descarga (Tabela 1), con-

cordando com dados obtidos por COGO (1981) e AMADO (1985). A semeadura direta e a escarificação foram mais eficazes do que a aração+gradagem na diminuição da velocidade da enxurrada, apesar da baixa rugosidade superficial existente na semeadura direta. Isto é explicado pela elevada cobertura do solo ocasionada pelos resíduos culturais na semeadura direta e, na escarificação, pela cobertura e rugosidade, combinadamente. Os resíduos culturais e a rugosidade armazenam água na forma de detenção e retenção superficial, oferecendo uma barreira física e retardando o fluxo. A remoção manual quase que completa dos resíduos, tanto de milho quanto de trigo+milho, criou condições para um aumento da velocidade do escoamento superficial em todos os tratamentos de preparo do solo. Esse aumento foi mais expressivo na aração+gradagem, explicado pelo aumento do escoamento em sulcos na superfície do solo descoberto. Neste tratamento, a remoção dos resíduos culturais de milho e trigo+milho da superfície do solo, com conseqüente aumento na velocidade

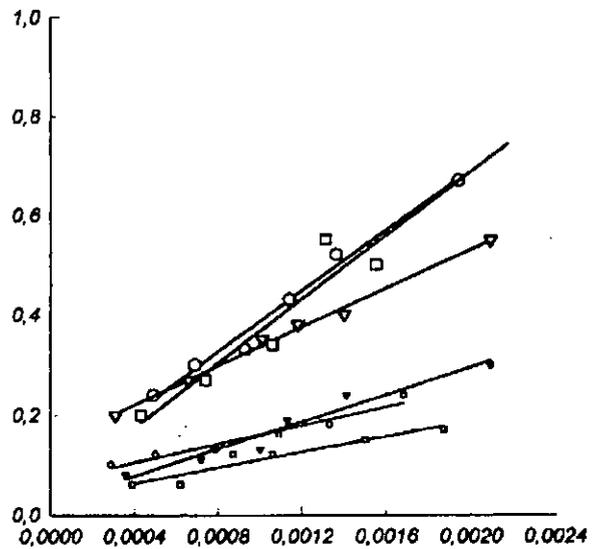
do escoamento superficial, provocou um aumento no índice D_{50} dos sedimentos transportados, concordando com dados obtidos por LOPES et al. (1987).

A velocidade da enxurrada aumentou linearmente com o aumento da taxa de descarga, em todos os tratamentos estudados (Figuras 1 e 2), o que foi também constatado por COGO (1981) e BERTOL (1995). Isto ocorreu porque o aumento no comprimento do declive proporcionou aumento no volume e, conseqüentemente, na velocidade do escoamento superficial. Na presença dos resíduos culturais, a aração+gradagem foi o tratamento mais eficaz na diminuição da velocidade do escoamento superficial com o aumento da taxa de descarga. Isto se deve ao fato de que os resíduos, presentes sobre a superfície rugosa, contribuíram para aumentar a capacidade de armazenagem superficial e a taxa de infiltração de água no solo, além de serem um impedimento físico ao escoamento da água. Na ausência dos resíduos, no entanto, este tratamento foi o menos eficaz na redução da velocidade da enxurrada, em função do



SDIc/rm: semeadura direta com resíduo de milho; SDIs/rm: semeadura direta sem resíduo de milho; ESCc/rm: escarificação com resíduo de milho; ESCs/rm: escarificação sem resíduo de milho; A+Gc/rm: aração+gradagem com resíduo de milho; A+Gs/rm: aração+gradagem sem resíduo de milho.

FIGURA 1 – Relação da velocidade média do escoamento superficial, v , com a taxa média de descarga, qm , durante a aplicação dos fluxos extras de água, em diferentes tratamentos de preparo do solo após o cultivo do milho, na presença e ausência do resíduo cultural



SDIc/rt: semeadura direta com resíduo de trigo; SDIs/rt: semeadura direta sem resíduo de trigo; ESCc/rt+m: escarificação com resíduos de trigo+milho; ESCs/rt+m: escarificação sem resíduos de trigo+milho; A+Gc/rt+m: aração+gradagem com resíduos de trigo+milho; A+Gs/rt+m: aração+gradagem sem resíduos de trigo+milho

FIGURA 2 – Relação da velocidade média do escoamento superficial, v , com a taxa média de descarga, qm , durante a aplicação dos fluxos extras de água, em diferentes tratamentos de preparo do solo após o cultivo do trigo, na presença e ausência dos resíduos culturais

aumento da taxa de descarga, equivalente ao aumento do comprimento de declive, tanto após a colheita do milho quanto do trigo.

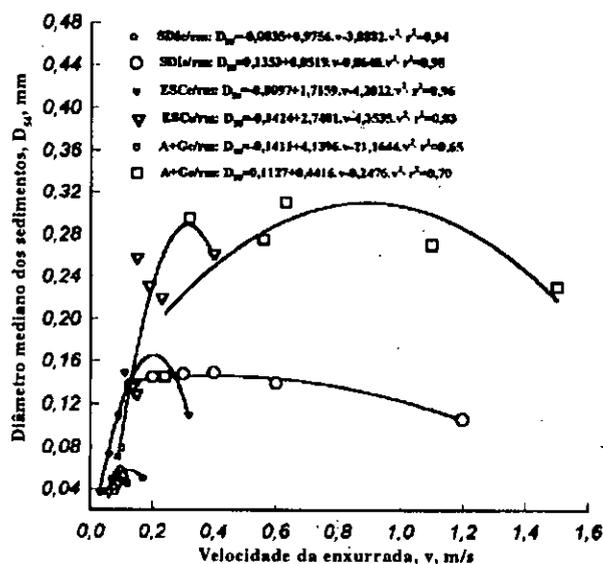
A taxa de aumento da velocidade da enxurrada, expressa pelo coeficiente angular da equação linear no tratamento aração+gradagem, foi cerca de 30 vezes maior na ausência do resíduo de milho do que na sua presença (Figura 1), enquanto na ausência dos resíduos de trigo+milho ela foi cerca de quatro vezes maior do que na sua presença (Figura 2). Isto é explicado, em parte, pelo provável selamento superficial ocasionado pelo impacto das gotas da chuva sobre a superfície descoberta do solo na aração+gradagem, diminuindo sua capacidade de infiltração e aumentando o sulcamento e, ainda, pela ausência de impedimento físico ao fluxo superficial. Na semeadura direta, por outro lado, o resíduo cultural mantido sobre a superfície do solo diminuiu a velocidade da enxurrada em aproximadamente dez vezes após o milho (Figura 1) e cerca de três vezes após o trigo (Figura 2), com um aumento de aproximadamente cinco vezes na taxa de descarga. Isto indica que os resíduos culturais, quando presentes sobre a superfície do solo, foram mais eficazes na aração+gradagem do que na semeadura direta, em termos de diminuição da velocidade do escoamento superficial, em ambos os cultivos. Isto pode ser explicado, principalmente, pelo provável aumento da porosidade total, especialmente dos grandes poros, quando o solo foi mobilizado por uma aração e apenas uma gradagem, mantendo, ainda, uma rugosidade relativamente alta na superfície do solo. A porosidade e a rugosidade, que possivelmente mantiveram uma alta taxa de infiltração de água no solo, foram preservadas pela presença da cobertura sobre a superfície, a qual, ainda, foi protegida contra o selamento superficial. Contribuiu para isto o fato de que a superfície do solo descoberto (resíduos removidos), na semeadura direta, se encontrava mais consolidada e menos rugosa do que na aração+gradagem, em ambos os cultivos, facilitando o aumento da velocidade da enxurrada.

Considerando a média dos tratamentos semeadura direta e aração+gradagem, a taxa de aumento da velocidade do escoamento superficial, expressa pelo coeficiente angular da equação linear, foi diminuída em cerca de 94 % na presença do resíduo de milho (Figura 1), enquanto na presença dos resíduos de trigo (semeadura direta) e de trigo+milho (aração+gradagem) (Figura 2), esta redução foi da ordem de 72 %, em relação à ausência dos respectivos resíduos. Isto demonstra a eficácia da cobertura por resíduos culturais na diminuição da velocidade do escoamento superficial nestes dois tipos de preparo do solo, refletindo-se na diminuição da erosão hídrica, conforme constatado por BERTOL et al. (1997).

O índice D_{50} dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial foi influenciado pela velocidade

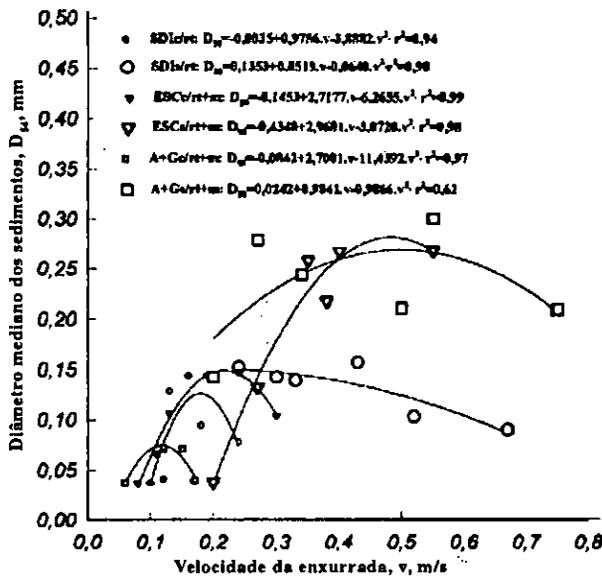
de do escoamento, tipo de preparo e cobertura superficial do solo (Figuras 3 e 4). A presença dos resíduos culturais sobre a superfície do solo determinou uma expressiva diminuição do índice D_{50} dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial em relação à ausência quase que completa dos referidos resíduos, em todos os tratamentos de preparo do solo estudados. Isto foi ocasionado pelo efeito físico dos resíduos na diminuição da velocidade do fluxo, uma vez que, em ambos os cultivos, a velocidade máxima do escoamento superficial foi da ordem de 0,3 m/s na presença dos resíduos, enquanto na ausência do resíduo de milho ela foi de aproximadamente 1,6 m/s (Figura 3) e de trigo+milho da ordem de 0,8 m/s (Figura 4). A diminuição da velocidade do fluxo pelo efeito dos resíduos culturais implica numa redução da capacidade da enxurrada de desagregar e transportar sedimentos de maior tamanho, os quais, quando presentes no fluxo, são filtrados pelos resíduos.

Após o cultivo do milho (Figura 3), a semeadura direta sem o resíduo ocasionou perda de sedimentos com D_{50} máximo da ordem de 0,15 mm quando a velocidade da enxurrada era de 0,3 m/s. Na presença do resíduo, no



SDIc/rm: semeadura direta com resíduo de milho; SDIs/rm: semeadura direta sem resíduo de milho; ESCc/rm: escarificação com resíduo de milho; ESCs/rm: escarificação sem resíduo de milho; A+Gc/rm: aração+gradagem com resíduo de milho; A+Gs/rm: aração+gradagem sem resíduo de milho.

FIGURA 3 – Relação do índice D_{50} dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial, D_{50} , com a velocidade média do fluxo, v , em diferentes tratamentos de preparo do solo após o cultivo do milho, na presença e ausência do resíduo cultural



SDIc/rt: semeadura direta com resíduo de trigo; SDIs/rt: semeadura direta sem resíduo de trigo; ESCc/rt+m: escarificação com resíduos de trigo+milho; ESCs/rt+m: escarificação sem resíduos de trigo+milho; A+Gc/rt+m: aração+gradagem com resíduos de trigo+milho; A+Gs/rt+m: aração+gradagem sem resíduos de trigo+milho.

FIGURA 4 – Relação do índice D_{50} dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial, D_{50} , com a velocidade média do fluxo, v , em diferentes tratamentos de preparo do solo após o cultivo do trigo, na presença e ausência dos resíduos culturais

entanto, o valor do D_{50} não ultrapassou 0,05 mm na velocidade da enxurrada de 0,1 m/s. Portanto, na semeadura direta, a ausência do resíduo ocasionou um aumento de três vezes no D_{50} máximo, quando o aumento da velocidade da enxurrada foi de dez vezes, enquanto na escarificação o D_{50} atingiu um valor máximo cerca de 1,6 vezes maior na ausência do que na presença do resíduo, com a velocidade da enxurrada cerca de 1,5 vezes maior. No tratamento aração+gradagem, no entanto, o D_{50} atingiu um valor máximo cerca de quatro vezes maior na ausência do que na presença do resíduo, com uma velocidade da enxurrada aproximadamente nove vezes maior. Assim, após o cultivo do milho, o resíduo cultural foi mais eficaz na diminuição do D_{50} máximo na aração+gradagem do que nos demais tratamentos de preparo do solo. Isto ocorreu porque, na ausência do resíduo, a quantidade de sedimentos de maior diâmetro colocados à disposição do escoamento superficial, pela ação do preparo do solo, provavelmente foi maior na aração+gradagem do que nos demais sistemas de preparo do solo. Além disso, na ausência do resíduo, a co-

bertura do solo foi menor na aração+gradagem do que nos demais tratamentos (Tabela 1), o que possivelmente contribuiu para aumentar o selamento e o escoamento superficial da água.

Após o cultivo do trigo (Figura 4), a ausência dos resíduos culturais na semeadura direta ocasionou um D_{50} máximo cerca de 1,2 vezes maior do que na presença dos resíduos, enquanto a velocidade da enxurrada foi cerca de 1,7 vezes maior. Na escarificação, o D_{50} atingiu um valor máximo cerca de duas vezes maior na ausência do que na presença dos resíduos, enquanto a velocidade da enxurrada foi aproximadamente 2,5 vezes maior. No tratamento aração+gradagem, o valor máximo atingido pelo D_{50} foi cerca de cinco vezes maior na ausência do que na presença dos resíduos, enquanto a velocidade da enxurrada atingiu valores aproximadamente cinco vezes maiores na presença do que na ausência dos resíduos. Portanto, do mesmo modo como ocorreu após o milho, após o trigo a presença dos resíduos culturais foi mais eficaz na diminuição do D_{50} máximo no tratamento aração+gradagem do que nos demais, explicado do mesmo modo como no caso do cultivo do milho.

Em todos os tratamentos estudados, o índice D_{50} dos sedimentos transportados no fluxo aumentou com o aumento da velocidade do escoamento superficial até determinado valor, dependendo do tipo de preparo, quantidade de resíduo e cobertura do solo, diminuindo a partir dessa velocidade. Após o cultivo do milho (Figura 3), o D_{50} aumentou até as velocidades aproximadas de 0,10, 0,20 e 0,10 m/s na presença do resíduo e 0,30, 0,30 e 0,90 m/s na sua ausência, respectivamente nos tratamentos semeadura direta, escarificação e aração+gradagem, decrescendo após essas velocidades. Nestes mesmos tratamentos de preparo, após o cultivo do trigo (Figura 4), o aumento do D_{50} ocorreu até as velocidades aproximadas de 0,15, 0,20 e 0,10 m/s na presença dos resíduos e 0,30, 0,50 e 0,50 m/s na sua ausência, também decrescendo após essas velocidades. Isto pode ser explicado pelo fato de que, enquanto haviam sedimentos separados da massa do solo e disponíveis para o transporte, eles foram transportados em tamanhos cada vez maior na medida em que aumentaram o volume e a velocidade do fluxo. Quando todos os sedimentos previamente separados da massa do solo já haviam sido transportados, o escoamento superficial teve que dispender parte da energia para a separação de novos sedimentos e, ainda, transportá-los. Isto fez com que diminuísse o diâmetro médio dos novos sedimentos presentes no fluxo.

Na presença dos resíduos culturais, o diâmetro médio dos sedimentos transportados apresentou uma queda mais acentuada do que na ausência dos referidos resíduos, após ter atingido o valor máximo discutido anteriormente, variável com o tipo de preparo do solo,

com exceção do tratamento escarificação. Isto mostra que, após ter transportado os sedimentos disponíveis, o escoamento superficial teve uma determinada quantidade de energia dissipada nos resíduos culturais e, conseqüentemente, menor quantidade de energia livre para separar novos sedimentos da massa do solo e transportá-los. Na ausência dos resíduos culturais, no entanto, essa queda no diâmetro médio dos sedimentos transportados foi em geral menos acentuada, com exceção da escarificação após o cultivo do milho, pois toda a energia do fluxo foi utilizada para a separação e transporte de novos sedimentos da massa do solo.

CONCLUSÕES

1. O preparo do solo executado com escarificador diminui a cobertura e aumenta a rugosidade superficial em relação à semeadura direta, tanto na presença quanto na ausência dos resíduos culturais; no entanto, isto em geral não se reflete na diminuição da velocidade do escoamento superficial e do índice D_{50} de sedimentos transportados pelo fluxo, quando a operação de preparo é executada no sentido paralelo ao declive.

2. A velocidade do escoamento superficial aumenta linearmente com o aumento da taxa de descarga, independentemente do tipo de preparo do solo e das condições de cobertura e rugosidade superficial; a taxa de aumento da velocidade do escoamento superficial na semeadura direta e aração+gradagem é maior na ausência do que na presença dos resíduos culturais e, ainda, é maior nestes tratamentos do que na escarificação quando o preparo do solo é executado no sentido paralelo ao declive.

3. O índice D_{50} de sedimentos transportados pelo escoamento superficial aumenta com o aumento da taxa de descarga, em geral até determinado valor de tamanho dos sedimentos, diminuindo após esse valor limite, independentemente do tipo de preparo do solo e das condições de cobertura e rugosidade superficial; a taxa de diminuição do índice D_{50} dos sedimentos presentes no fluxo, após ter atingido um valor máximo de diâmetro, em geral é maior na presença do que na ausência dos resíduos culturais.

BIBLIOGRAFIA CITADA

ALBERTS, E.E.; MOLDENHAUER, W.C.; FOSTER, G.R. Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill flow. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 44, p. 590-595, 1980.

AMADO, T.J.C. *Relações da erosão hídrica do solo com níveis e formas de manejo do resíduo cultural de soja*. Porto Alegre: UFRGS, 1985. 104 p. Dissertação

(Mestrado em Agronomia) – Conservação do Solo, Faculdade de Agronomia, UFRGS. 1985.

BERTOL, I. *Comprimento crítico de declive para preparos conservacionistas de solo*. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 185 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Conservação do Solo, Faculdade de Agronomia, UFRGS. 1995.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e ausência dos resíduos culturais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 21, n. 3, 1997. (No prelo)

COGO, N.P. *Effect of residue cover, tillage induced roughness, and slope length on erosion and related parameters*. West Lafayette: Purdue University, 1981. 346 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Conservação do Solo, Faculdade de Agronomia, Purdue University. 1981.

COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C.; FOSTER, G.R. Effect of crop residue, tillage-induced roughness, and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 47, p. 1005-1008, 1983.

GILLEY, J.E.; FINKNER, S.C.; VARVEL, G.E. Size distribution of sediment as affected by surface residue and slope length. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, St. Joseph, v. 30, n. 5, p.1419-1424, 1987.

HARTWIG, R.O.; LAFLEN, J.M. A meterstick method for measuring crop residue cover. *Journal Soil Water Conservation*, Ankeny, v. 33, p. 90-91, 1978.

IAPAR; EMBRAPA. *Recomendações gerais do encontro sobre uso do simulador de chuva em pesquisa de conservação do solo no Brasil*. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE PESQUISA DE EROSÃO COM SIMULADORES DE CHUVA, 1975, Londrina. *Anal...* Londrina: EMBRAPA, 1975. p. 107-120.

KUIPERS, H. A relief meter of soil cultivation studies. *Journal of Agricultural Science*, Groningen, v. 5, p. 255-262, 1957.

LOPES, P.R.C.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Influência da cobertura vegetal morta na redução da velocidade da enxurrada e na distribuição de tamanho dos sedimentos transportados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 11, p. 193-197, 1987.

LU, J.Y.; CASSOL, E.A.; MOLDENHAUER, W.C. Sediment transport relationships for sand and silt loam soils. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, St. Joseph, v. 32, n. 6, p.1923-1931, 1989.

SWANSON, N.P. *Suggestions for use of the rotating boom field plot rainfall simulator to obtain data for application of the soil loss equation*. Entre-Rios: FAO, 1975. 6 p. (Report of FAO consultant)

SWANSON, N.P.; DEDRICK, A.R. Simulation of increased slope length on small runoff plots. *American Society of Agricultural Engineering*, St. Joseph, Paper 66-211, 1966.