

COMPRIMENTOS CRÍTICOS DE RAMPA PARA DIFERENTES MANEJOS DE RESÍDUOS CULTURAIS EM SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA EM UM ARGISSOLO VERMELHO DA DEPRESSÃO CENTRAL (RS)⁽¹⁾

L. F. B. MORAIS⁽²⁾ & N. P. COGO⁽³⁾

RESUMO

A falha ou perda da eficácia relativa dos resíduos culturais compromete o controle da erosão hídrica por meio da cobertura do solo em sistemas conservacionistas de preparo do solo. Com o objetivo de investigar a falha de resíduos culturais em diferentes situações no sistema de semeadura direta, foi instalado um experimento na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, em Eldorado do Sul (RS), sobre um Argissolo Vermelho distrófico típico com 0,105 m m⁻¹ de declividade média. Os tratamentos consistiram de resíduos recém-colhidos de aveia preta (out/97) e soja (maio/98) e resíduos semidecompostos de milho e soja (150 e 175 dias após a colheita, out/97 e 98, respectivamente), em diferentes quantidades e formas de manejo. Aplicou-se chuva simulada nas parcelas experimentais com intensidade constante de 63,5 mm h⁻¹, até obtenção da taxa constante de enxurrada e, então, iniciou-se, concomitantemente à aplicação de chuva, a adição de fluxos extras de água limpa na cabeceira das parcelas, para simular comprimentos de rampa mais longos. Os dez níveis de fluxos extras de água planejados variaram de 16 a 197 (10⁻⁵) m³ s⁻¹ m⁻¹, com duração de 7 min cada nível. A falha do resíduo foi identificada e o equivalente comprimento crítico de rampa calculado, a partir da observação visual no campo e do uso de critério teórico baseado na relação da taxa de erosão com a taxa de descarga da enxurrada. Os intervalos de ocorrência dos comprimentos críticos de rampa obtidos variaram de 29-58 m (3.950 kg ha⁻¹ de resíduos semidecompostos

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao CPG Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Trabalho apresentado no XX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Brasília (DF), 11-16 de julho de 1999. Realizado com apoio da FINEP/PRONEX, FAPERGS, PIBIC-CNPq/UFRGS e CNPq. Recebido para publicação em outubro de 2000 e aprovado em maio de 2001.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo da Secretaria Municipal do Meio Ambiente - SMAM/Prefeitura Municipal de Porto Alegre, Rua Barão de Ubá 182/203, Bela Vista, CEP 90450-090 Porto Alegre (RS). E-mail: lfmorais@ig.com.br

⁽³⁾ Professor Adjunto, Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia/UFRGS, Caixa Postal 776, CEP 900001-970 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: neroli@vortex.ufrgs.br

de soja, soltos) a 152-164 m (6.200 kg ha⁻¹ de resíduos semidecompostos de milho, semi-ancorados). No tratamento com 5.600 kg ha⁻¹ de resíduos de aveia preta, semi-ancorados, não foi observada falha do resíduo. Os resultados comprovaram que existem limites de comprimento de rampa no sistema de semeadura direta, dependendo do regime de chuva, solo, declividade e condições de manejo.

Termos de indexação: erosão hídrica, plantio direto, falha do resíduo cultural.

SUMMARY: *SLOPE-LENGTH LIMITS FOR DIFFERENT FORMS OF RESIDUE MANAGEMENT UNDER NO-TILL IN A ULTISOL IN THE DEPRESSÃO CENTRAL REGION OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL*

Erosion control benefits provided by conservation tillage can be diminished if mulch fails or loses its effectiveness. A field experiment was carried out at the Agriculture Experimental Station of the Federal University of Rio Grande do Sul in Eldorado do Sul, RGS, Brazil, on a 0.105 m m⁻¹ slope, sandy loam Ultisol, to investigate mulch failure for different forms of residue management under no-till system. Simulated rainfall (63.5 mm h⁻¹) was applied with the rotating-boom rainfall simulator until steady-runoff rates were obtained, when extra-inflow consisting of clear water was added at the upper end of the plots to simulate longer slope lengths. Ten-levels of extra-inflow ranged from 16 to 197 (10⁻⁵) m³ s⁻¹ m⁻¹, with a duration of 7-min each. Treatments consisted of fresh oat (Oct/97) and soybean (May/98) residues, and semi-decomposed corn and soybean residues (150 and 175 days after harvesting, Oct/97-98, respectively), in different rates and management forms. Mulch failure was identified, and critical slope lengths calculated, using visual observations in the field and a theoretical criterion, based on the relationship between erosion and discharge rates at the midpoint of the plot. Calculated, critical slope-length intervals ranged from 29-58 m (3,950 kg ha⁻¹ of unanchored, semi-decomposed soybean residue) to 152-164 m (6,200 kg ha⁻¹ of semi-anchored, semi-decomposed corn residue). There was no evidence of mulch failure for the 5,600 kg ha⁻¹ semi-anchored oat residue treatment. The results proved that slope-length limits may exist under no-till system, and that mulch failure criteria can be helpful for a better RUSLE's C-factor evaluation, as well as for determining terrace spacing in this system, resulting in its increased effectiveness for erosion control. Critical slope lengths, however, will vary with rainfall, soil, slope, and management decisions.

Index terms: water erosion, conservation tillage, no-tillage, mulch failure.

INTRODUÇÃO

Os sistemas conservacionistas de preparo do solo são eficazes na redução das perdas de solo em virtude da permanência da cobertura por resíduos remanescentes das culturas anteriores. No entanto, não apresentam a mesma eficácia de redução nas perdas de água por escoamento superficial (enxurrada), as quais podem até serem superiores àquelas verificadas nos sistemas convencionais de preparo, em determinadas situações. O controle do escoamento superficial tem importantes implicações, tanto na questão ambiental, evitando o carreamento de poluentes, como fertilizantes, agrotóxicos e sedimentos, quanto no controle da erosão hídrica, pois a água concentrada pode adquirir energia erosiva, aumentando as perdas de solo.

O maior, ou menor, efeito da cobertura do solo na redução da erosão hídrica depende de vários fatores, tais como: tipo, quantidade e forma de manejo dos resíduos culturais, erosividade da chuva, erodibilidade do solo, inclinação e comprimento da rampa, manejo da terra e da cultura e práticas conservacionistas de suporte. Assim, mesmo em áreas onde são utilizados sistemas conservacionistas de preparo do solo com bom manejo de culturas e de seus resíduos, certas combinações de situações, tais como: solos de alta erodibilidade, umidade antecedente e precipitações elevadas, elevada inclinação e, ou, comprimento da rampa e ausência de práticas conservacionistas de suporte, poderão ocasionar a diminuição da eficácia relativa da cobertura do solo pelos resíduos culturais, com conseqüente aumento nas taxas de erosão.

A perda relativa da eficácia dos resíduos culturais na redução da erosão hídrica inicia no ponto de falha desses resíduos, ou seja, no ponto sobre o terreno onde a taxa de enxurrada é suficiente para deslocá-los, diminuindo ou retirando completamente a cobertura do solo e, assim, aumentando a taxa de erosão a partir daquele ponto. A enxurrada poderá também aumentar a taxa de erosão sulcando o solo por baixo dos resíduos, mesmo sem removê-los, se o solo for susceptível ao sulcamento (Foster et al., 1982a). O aumento na taxa de erosão poderá situar-se acima ou abaixo da tolerância de perda de solo para determinado solo, conceito empregado em equações de predição de perdas de solo, como a USLE/RUSLE (Equação Universal de Perda de Solo/Equação Universal de Perda de Solo Revisada).

A diminuição da eficácia relativa dos resíduos culturais indica, primariamente, que os valores do fator cobertura e manejo (C) destas equações devem ser revistos, aumentando a partir do ponto de falha (Foster et al., 1982a; Bertol et al., 1997). Observações visuais e critérios teóricos relacionados com a falha dos resíduos culturais permitem que, para determinadas condições de solo, precipitação, manejo de resíduos e inclinação de rampa, sejam calculados comprimentos críticos de rampa equivalentes, que seriam os comprimentos verificados entre o ponto no terreno onde a enxurrada começa até o ponto de falha do resíduo.

A abordagem teórica, envolvendo conceitos e equações hidráulicas, e os critérios adotados para a determinação do ponto de falha dos resíduos foram desenvolvidos por Foster et al. (1982a,b), sendo também descritos de forma detalhada por Cogo (1981), Bertol (1995), Cogo et al. (1996) e Bertol et al. (1997).

Alguns resultados de experimentos para determinação de comprimentos críticos de rampa podem ser encontrados na literatura, consistindo de parcelas de campo onde são utilizadas chuvas simuladas, bem como adicionados fluxos extras de água na parte superior das parcelas, para simular comprimentos de rampa mais longos.

Meyer & Ports (1976) sugeriram (com base em experiência e dados de pesquisa limitados) comprimentos críticos de rampa para locais de construção civil, com declividades de 0,01 a 0,5 m m⁻¹, incluindo palha de trigo e outros resíduos. Os comprimentos críticos de rampa verificados por esses autores para palha de trigo (2,2 a 4,5 t ha⁻¹) variaram de 11 a 122 m. Já Laflen et al. (1978) observaram falha do resíduo no sistema conservacionista de preparo do solo *till plant*, mas o mesmo não foi verificado para uma série de outros sistemas de preparo. O comprimento de rampa equivalente simulado neste estudo foi de, no máximo, 50 m. Foster et al. (1982a) utilizaram resíduos não ancorados (colmos de milho em superfície de solo não preparado e resíduos de trigo sobre solo

preparado) e obtiveram comprimentos críticos de rampa na faixa de 45 a 200 m para solos não-susceptíveis à erosão em sulcos e de 40 a 150 m para solos susceptíveis, variando com a taxa de resíduos e a inclinação da rampa (0,06 a 0,092 m m⁻¹). Cogo (1981) e Cogo et al. (1996) simularam comprimentos de rampa de até 135 m em preparos conservacionistas com escarificadores, não observando falha de resíduos de trigo em solo com declividade de 0,065 m m⁻¹. Esses trabalhos foram efetuados, assim como os anteriores citados, nos Estados Unidos.

Bertol (1995) realizou experimento semelhante em Eldorado do Sul (RS), empregando resíduos não ancorados de milho e trigo e sistemas de preparo como semeadura direta, escarificação e aração + gradagem. Foram obtidos comprimentos críticos de rampa variando de 106-483 m, para semeadura direta, a 143-267 m, para escarificação. Nos tratamentos com aração + gradagem, não foi observada falha dos resíduos por esse autor, cuja área experimental apresentava declividade média de 0,066 m m⁻¹ nas parcelas. Os resultados de pesquisa já obtidos apontam o potencial de utilização de comprimentos críticos de rampa, determinados experimentalmente e fisicamente embasados, como auxiliares ou indicativos no cálculo do espaçamento e dimensões de terraços (Bertol et al., 2000) ou de outras práticas conservacionistas de suporte em sistemas conservacionistas de preparo do solo. Para tanto, torna-se necessário obter maior número de dados para os sistemas conservacionistas de preparo do solo, abrangendo climas, solos e culturas das principais regiões do País.

Os objetivos do trabalho foram: (a) investigar a existência de comprimentos críticos de rampa no sistema de semeadura direta e (b) avaliar o efeito de tipos, quantidades e formas de manejo de resíduos culturais no cálculo dos comprimentos críticos de rampa determinados.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram desenvolvidos na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, município de Eldorado do Sul (RS), em um Argissolo Vermelho distrófico típico. Os tratamentos foram constituídos de tipos e formas de manejo de resíduos culturais no sistema de preparo conservacionista do solo semeadura direta, em parcelas com declividade variando de 0,097 a 0,114 m m⁻¹.

No Experimento 1 (outubro/97), foram estudados os tratamentos: resíduos de milho, semidecompostos, avaliados 150 dias após a colheita e parcialmente ancorados, nas doses de 7.600 e 6.200 kg ha⁻¹, e resíduos de aveia preta, recém-colhidos (frescos) e parcialmente ancorados, nas doses de 5.600 e 3.400 kg ha⁻¹.

No Experimento 2 (maio/98), foram estudados os tratamentos: resíduos de soja, recém-colhidos e parcialmente ancorados, nas doses de 5.100 e 3.400 kg ha⁻¹, resíduos de soja, recém-colhidos e soltos, na dose de 4.700 kg ha⁻¹ e solo sem cultivo e sem cobertura.

No Experimento 3 (outubro/98), foram estudados os tratamentos: resíduos de soja, semidecompostos, avaliados 175 dias após a colheita e parcialmente ancorados, nas doses de 4.500 e 2.900 kg ha⁻¹, resíduos de soja, semidecompostos, avaliados 175 dias após a colheita e soltos, na dose de 3.950 kg ha⁻¹ e solo sem cultivo e sem cobertura.

Os tratamentos foram estabelecidos em parcelas de 3,5 m de largura e 11 m de comprimento, apropriadas para estudos com o simulador de chuva do tipo braços rotativos (Swanson, 1965). Foi aplicada uma série de chuvas simuladas, com intensidade constante de 63,5 mm h⁻¹. No dia anterior à chuva inicial da série ou no mesmo dia, foi efetuado um pré-umedecimento das parcelas até que a taxa de enxurrada obtida fosse constante. A chuva inicial também tinha duração suficiente para que a taxa de enxurrada constante fosse atingida (aproximadamente 45 a 75 min). A segunda chuva, logo após, teve duração de dez minutos. A última, imediatamente a seguir, teve duração de 84 min, simultânea à aplicação de 10 níveis de fluxo extra de água limpa (16, 36, 56, 76, 96, 116, 137, 157, 177 e 197 (10⁻⁵) m³ s⁻¹ m⁻¹ de largura da parcela), na extremidade superior da parcela. Os fluxos extras tiveram duração de sete minutos cada um, sendo os dois maiores níveis aplicados separadamente no par de parcelas abrangidas pelo simulador. A aplicação de fluxos extras na cabeceira das parcelas objetivou simular comprimentos de rampa mais longos, variando de 50 até 500 m.

A massa de resíduos culturais e a taxa de cobertura do solo foram determinadas antes da aplicação das chuvas simuladas. Durante a aplicação das chuvas simuladas e dos fluxos extras, coletaram-se amostras da enxurrada, de dois em dois minutos, para medir a taxa de descarga e, posteriormente, determinar a concentração de sedimentos, perdas de solo e água e taxa de erosão, conforme descrito em Cogo (1981). As taxas de enxurrada e erosão foram ajustadas para a intensidade de chuva planejada (Cogo, 1981) e para a declividade média entre as parcelas (Wischmeier & Smith, 1978).

O comprimento equivalente de rampa foi calculado, para o caso de uma parcela com 11 m de comprimento, por meio da equação apresentada por Cogo (1981):

$$L_c = (q_a / q'_0) 11 + 11 \quad [1]$$

em que:

L_c: comprimento de rampa para determinado nível de fluxo (m);

q_a: taxa de fluxo adicionada na extremidade superior da parcela (m³ s⁻¹ m⁻¹); e

q'₀: taxa de enxurrada constante da chuva inicial (sem fluxo extra) (m³ s⁻¹ m⁻¹).

Foi efetuada análise de regressão linear entre a taxa média de erosão e a taxa de descarga no ponto médio da parcela.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observações visuais da ocorrência de falha dos resíduos culturais e relação da taxa de erosão com a taxa de descarga da enxurrada

As observações visuais da falha dos resíduos culturais no campo, analisadas posteriormente em conjunto com o critério teórico da relação entre a taxa de erosão e a taxa de descarga, foram decisivas na identificação do ponto de falha de resíduos em cada um dos tratamentos estudados, a partir dos quais foram calculados os comprimentos críticos de rampa equivalentes. A perda de eficácia de controle da erosão ou a falha dos resíduos culturais podem ser observadas no campo quando a cobertura superficial é removida pela enxurrada (peça por peça ou em massa conjunta) ou quando esta última provoca erosão do solo por baixo dos resíduos, mesmo sem movê-los (Foster et al., 1982a).

Os resultados da relação entre a taxa de erosão e a taxa de descarga no ponto médio da parcela, para os tratamentos de todos os experimentos realizados, encontram-se nas figuras 1 a 5. Foram ajustadas equações lineares para os pares de dados, tanto antes como depois dos pontos de falha do resíduo, com exceção dos tratamentos do Experimento 3, onde só existiu um par de dados antes dos pontos de falha do resíduo. Nas figuras, são mostrados os coeficientes angulares e de determinação destas equações, para comparação entre tratamentos.

Experimento 1

Os resultados para os tratamentos com os resíduos semidecompostos de milho e frescos de aveia preta, ambos parcialmente ancorados, encontram-se nas figuras 1 e 2, respectivamente. As taxas de erosão aumentaram com o aumento da taxa de descarga em todos os tratamentos, como demonstram os coeficientes angulares positivos das equações de regressão linear ajustadas. O aumento nas taxas de descarga, visando simular comprimentos de rampa maiores, aumenta o volume, profundidade e velocidade do escoamento superficial, aumentando, portanto, a tensão cisalhante da enxurrada e a taxa de erosão, esta última, caso seja superada a tensão de cisalhamento crítica superficial do solo. A relação linear entre taxas de erosão e taxas de descarga até o ponto de falha dos resíduos também foi observada por Foster et al. (1982a) e Bertol (1995), para

diferentes sistemas de preparo do solo e de manejo de resíduos de milho e trigo. Laflen et al. (1978), Cogo (1981) e Hussein & Laflen (1982) observaram esta mesma relação linear, embora não tenham constatado falha dos resíduos culturais em seus experimentos.

Nos tratamentos com resíduos de milho semidecompostos e parcialmente ancorados, o aumento da taxa de erosão com o aumento da taxa de descarga foi pequeno até o nono e o oitavo nível de fluxo extra, respectivamente, para as doses do resíduo de 7.600 e 6.200 kg ha⁻¹, correspondendo a taxas equivalentes de descarga de 0,00187 e 0,00145 m³ s⁻¹ m⁻¹. A partir destes níveis, entretanto, observou-se visualmente falha dos resíduos culturais em massa, com exposição de solo sem cobertura em sulcos ao longo da rampa nas entrelinhas e considerável aumento na erosão hídrica. Analisando a figura 1, nota-se que a linearidade apresentada antes do ponto de falha é rompida, alterando-se o coeficiente angular e confirmando as proposições teóricas apresentadas por Foster et al. (1982a,b). As taxas de erosão apresentadas pelo tratamento com 6.200 kg ha⁻¹ do resíduo foram maiores do que aquelas para o tratamento com 7.600 kg ha⁻¹ do resíduo, o que era esperado, podendo ser justificadas pela menor quantidade de resíduo cultural na superfície do solo.

Nos tratamentos com resíduos culturais frescos e parcialmente ancorados de aveia preta (Figura 2), a linearidade da relação entre taxa de erosão e taxa de descarga também foi verificada. No tratamento com 3.400 kg ha⁻¹ do resíduo, a relação foi linear até

o ponto de falha, no oitavo nível, equivalente à taxa de descarga de 0,00164 m³ s⁻¹ m⁻¹, ocorrendo aumento expressivo no coeficiente angular após este ponto, coincidindo com a observação de falha em massa dos resíduos culturais na parcela. No caso do tratamento com 5.600 kg ha⁻¹ do resíduo, não se verificou falha do resíduo cultural na parcela, nem quebra da linearidade da relação teórica, pelo menos para a descarga máxima aplicada. Como era esperado, o tratamento com menor quantidade de resíduo apresentou as maiores taxas de erosão.

Experimento 2

Os resultados dos tratamentos com resíduos culturais frescos de soja (Experimento 2) encontram-se na figura 3, e o tratamento solo sem cultivo e sem cobertura (sem resíduos) do presente experimento na figura 5, em conjunto com tratamento semelhante do Experimento 3. Pela figura 3, verifica-se que as taxas de erosão aumentaram com o aumento da taxa de descarga em todos os tratamentos, sendo a relação linear até o ponto de falha dos resíduos, onde houve quebra desta linearidade, representada pelo aumento nos coeficientes angulares das equações ajustadas. A falha em massa dos resíduos, verificada no campo e confirmada pela análise da relação teórica empregada, ocorreu no sexto nível de fluxo extra, em todos os tratamentos, correspondendo a taxas equivalentes de descarga de 0,00132, 0,00115 e 0,00111 m³ s⁻¹ m⁻¹, respectivamente, para 4.700 kg ha⁻¹ de resíduos recém-colhidos e soltos, e de 5.100 e 3.400 kg ha⁻¹, para resíduos recém-colhidos e parcialmente ancorados.

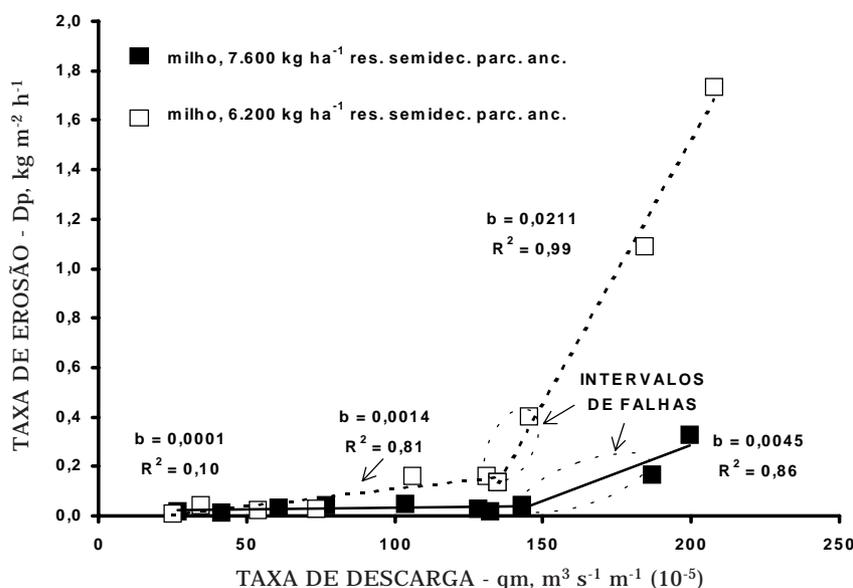


Figura 1. Relação da taxa média de erosão, Dp, com a taxa de descarga no ponto médio da parcela, qm, nos tratamentos com 7.600 e 6.200 kg ha⁻¹ de resíduos de milho, semidecompostos e parcialmente ancorados, no sistema de semeadura direta (Experimento 1).

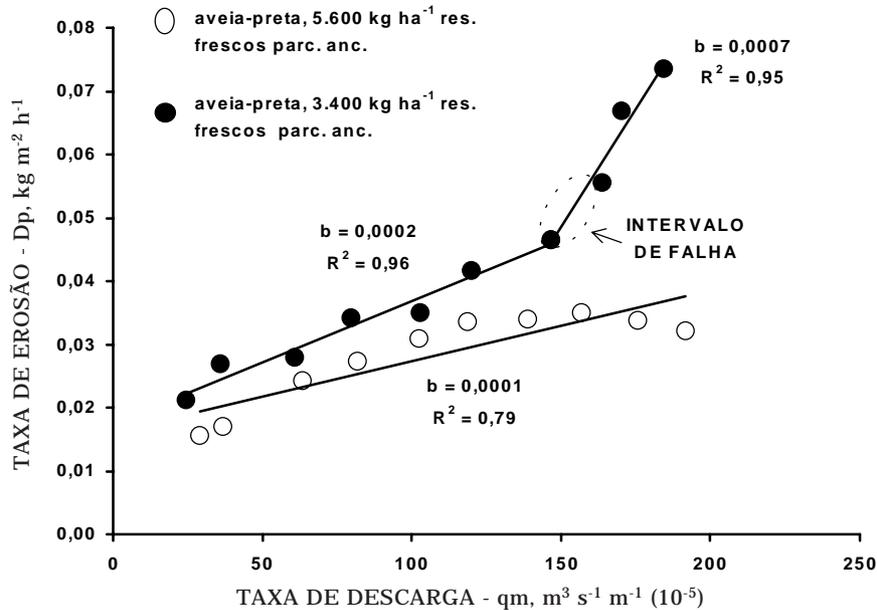


Figura 2. Relação da taxa média de erosão, D_p , com a taxa de descarga no ponto médio da parcela, q_m , nos tratamentos com 5.600 e 3.400 kg ha⁻¹ de resíduos de aveia preta, frescos e parcialmente ancorados, no sistema de semeadura direta (Experimento 1).

No tratamento com resíduos soltos, a exposição de solo descoberto não apresentou a orientação pronunciada de sulcos nas entrelinhas, como nos outros tratamentos, parcialmente ancorados. As taxas de erosão foram semelhantes, independentemente da quantidade de resíduos ou do grau de ancoramento, antes dos pontos de falha. Após a falha dos resíduos, houve aumento mais acentuado da taxa de erosão no tratamento com 4.700 kg ha⁻¹ de resíduos de soja soltos.

Experimento 3

Os resultados dos tratamentos com resíduos culturais semidecompostos de soja (Figura 4) mostram que as taxas de erosão aumentaram com o aumento da taxa de descarga em todos os tratamentos. A linearidade desta relação até à falha dos resíduos não pôde ser constatada graficamente nem expressa por equação, pois o ponto de falha em massa dos resíduos, verificado no campo, ocorreu logo no segundo nível de fluxo extra em todos os tratamentos, correspondendo a taxas equivalentes de descarga de 0,00047, 0,00029 e 0,00042 m³ s⁻¹ m⁻¹, respectivamente, para 3.950 kg ha⁻¹ dos resíduos soltos e 4.500 e 2.900 kg ha⁻¹ dos resíduos parcialmente ancorados. A formação de sulcos pronunciados nas entrelinhas e a remoção abrupta em massa de resíduos culturais provocaram entupimento momentâneo das calhas coletoras no oitavo nível de fluxo extra. A causa desta falha generalizada e precoce foi o estado avançado de decomposição dos resíduos de soja, com conseqüente diminuição de sua massa, facilitando o transporte, e

da percentagem de cobertura superficial. As taxas de erosão foram maiores para os resíduos soltos, sendo semelhantes em ambas as doses estudadas para os resíduos parcialmente ancorados.

As taxas de erosão diminuíram com o aumento da taxa de descarga no solo sem cultivo e sem cobertura, nos dois experimentos, o que pode ser visualizado graficamente ou por meio das equações lineares ajustadas, cujos coeficientes angulares foram negativos (Figura 5). Este fato, contrário ao verificado em todos os tratamentos com a presença de resíduos culturais e, de certa forma, aparentemente surpreendente, pode ser creditado à consolidação da superfície do solo nesta parcela, com histórico de três ciclos culturais em sistema de semeadura direta, nos quais também foram aplicadas chuvas simuladas.

A taxa de perda de solo, a partir da qual é calculada a taxa de erosão, depende do produto da concentração de sedimentos pela taxa de enxurrada. A redução da concentração de sedimentos com o aumento da taxa de descarga (efeito de diluição) no tratamento solo sem cultivo e sem cobertura teve magnitude superior (em torno de 15 vezes) ao aumento na taxa de enxurrada (3,5 vezes) (Figura 5, Experimento 2).

Assim, a diminuição da concentração de sedimentos compensou o efeito do aumento da enxurrada, determinando taxas de erosão decrescentes. Fisicamente, supõe-se que, após a remoção das partículas mais facilmente destacáveis, o fluxo concentrado tenha atingido superfície de solo com tensão de cisalhamento crítica elevada

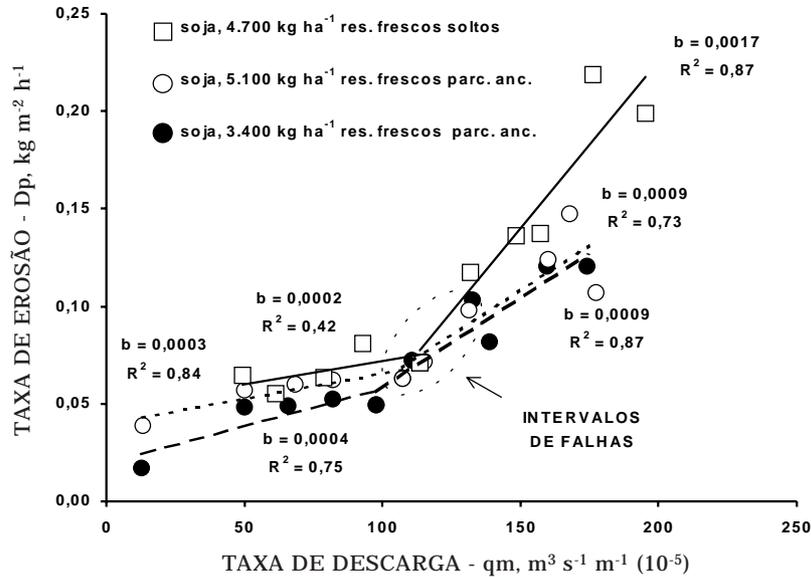


Figura 3. Relação da taxa média de erosão, Dp, com a taxa de descarga no ponto médio da parcela, qm, nos tratamentos com 5.100 e 3.400 kg ha⁻¹ de resíduos de soja, ambos frescos e parcialmente ancorados, e 4.700 kg ha⁻¹ de resíduos de soja frescos e soltos, no sistema de semeadura direta (Experimento 2).

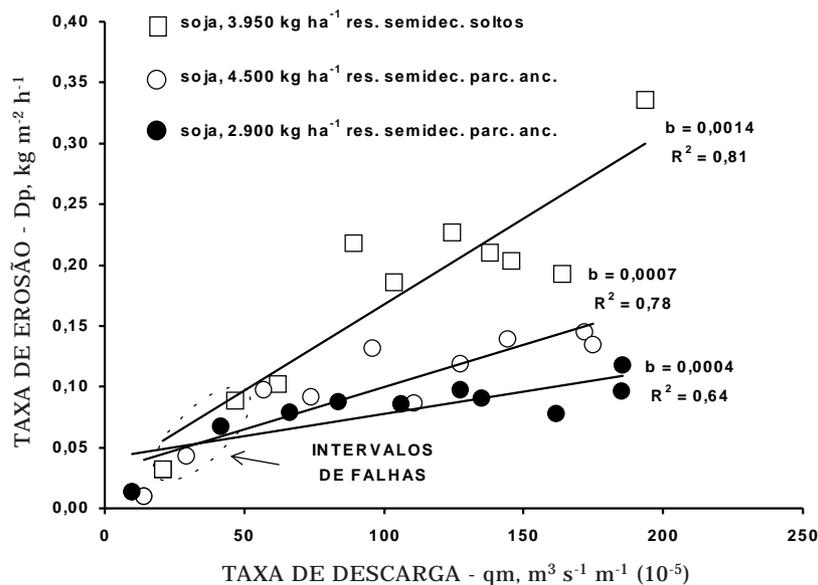


Figura 4. Relação da taxa média de erosão, Dp, com a taxa de descarga no ponto médio da parcela, qm, nos tratamentos com 4.500 e 2.900 kg ha⁻¹ de resíduos de soja, ambos semidecompostos e parcialmente ancorados, e 3.950 kg ha⁻¹ de resíduos semidecompostos de soja soltos, no sistema de semeadura direta (Experimento 3).

(consolidado) e que, mesmo o aumento da tensão de cisalhamento do fluxo, com o aumento da taxa de descarga, não tenha sido suficiente para erodi-la. Bertol (1995) também observou, em tratamento com ausência de resíduos culturais, taxas de perda de solo praticamente constantes durante a aplicação de níveis crescentes de fluxo extra, atribuindo este fato à consolidação e encrostamento superficiais do solo.

As taxas de erosão verificadas no Experimento 3 foram menores do que no Experimento 2 (Figura 5), indicando possível maior grau de consolidação da superfície do solo. As taxas de erosão, entretanto, aparentaram patamar de estabilidade, pois pouco variaram com o aumento da taxa de descarga e foram semelhantes às observadas nas maiores taxas de descarga do Experimento 2.

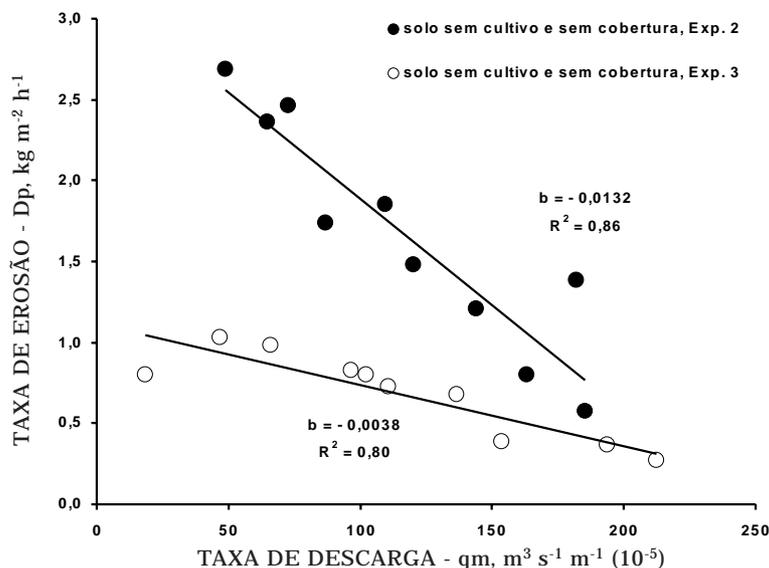


Figura 5. Relação da taxa média de erosão, D_p , com a taxa de descarga no ponto médio da parcela, q_m , no tratamento solo sem cultivo e sem cobertura (Experimentos 2 e 3).

Comprimentos de rampa equivalentes e críticos simulados

Os comprimentos equivalentes de rampa, calculados por meio da equação [1] para os tratamentos dos Experimentos 1, 2 e 3, encontram-se no quadro 1. Analisando esta equação, observa-se que, quanto maior a taxa constante de enxurrada da chuva inicial

($q'o$), menores os comprimentos de rampa (inclusive os críticos) possíveis de ser simulados.

Bertol (1995) e Bertol et al. (1997), em trabalho realizado com método semelhante, sobre o mesmo solo e em local próximo, observaram que os valores de $q'o$ variaram de 14 a 46 mm h^{-1} nos tratamentos com resíduos de milho e trigo, ambos sem preparo

Quadro 1. Comprimentos equivalentes de rampa simulados (L_c), estimados com base nas taxas de fluxo extra adicionados (q_a) e nas taxas constantes de enxurrada da chuva inicial ($q'o$), para os tratamentos de tipos e formas de manejo do resíduo cultural dos três experimentos realizados

Tratamento ⁽¹⁾	Nível de fluxo extra									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	m									
	Experimento 1 – out/97									
Milho, 7.600 kg ha^{-1} res. semidec., parc. anc.	25	24	49	60	81	97	100	107	138	148
Milho, 6.200 kg ha^{-1} res. semidec., parc. anc.	33	43	64	86	121	148	152	164	201	232
Aveia preta, 5.600 kg ha^{-1} res. frescos, parc. anc.	33	41	65	82	102	117	136	153	171	186
Aveia preta, 3.400 kg ha^{-1} res. frescos, parc. anc.	21	28	44	56	71	82	99	110	114	123
	Experimento 2 – maio/98									
Soja, 4.700 kg ha^{-1} res. frescos, soltos	44	53	66	78	94	108	120	127	137	157
Solo sem cultivo e sem cobertura	41	52	58	68	84	92	109	123	137	139
Soja, 5.100 kg ha^{-1} res. frescos, parc. anc.	23	50	67	79	102	109	123	148	155	164
Soja, 3.400 kg ha^{-1} res. frescos, parc. anc.	20	49	63	77	91	102	121	126	144	157
	Experimento 3 – out/98									
Soja, 3.950 kg ha^{-1} res. semidec., soltos	29	58	75	107	122	143	161	169	190	223
Solo sem cultivo e sem cobertura	22	40	54	76	80	87	105	118	147	161
Soja, 4.500 kg ha^{-1} res. semidec., parc. anc.	33	63	118	151	195	224	257	293	344	351
Soja, 2.900 kg ha^{-1} res. semidec., parc. anc.	20	66	103	128	161	192	203	242	281	277

⁽¹⁾ res. = resíduos; semidec. = semidecompostos; parc. anc. = parcialmente ancorados; frescos = recém-colhidos.

do solo, o que lhes permitiu simular comprimentos equivalentes de rampa máximos de 483 e 143 m, respectivamente.

No presente trabalho, os valores de q observados foram mais elevados (18,2 a 56,5 mm h⁻¹) nos tratamentos com resíduos culturais, provavelmente por tratar-se de parcelas com semeadura direta e solo superficial mais consolidado, que já haviam sofrido testes com chuvas simuladas. Estas taxas permitiram a simulação de comprimentos equivalentes de rampa máximos entre 351 e 123 m, respectivamente.

Cabe ressaltar que este foi o motivo pelo qual não foram atingidos os comprimentos equivalentes de rampa simulados máximos inicialmente planejados, por ocasião da calibração dos níveis de fluxo extra (Morais, 1999). Este fato, entretanto, não prejudicou os resultados alcançados, pois, com exceção do tratamento com resíduos de aveia preta, frescos e parcialmente ancorados, os comprimentos de rampa equivalentes simulados foram suficientes para que acontecessem pontos de falha dos resíduos culturais estudados, objetivo principal do trabalho.

Os comprimentos críticos de rampa, em intervalos de ocorrência ou faixas de variação (valor inferior e superior), estão apresentados no quadro 2. A falha do resíduo cultural foi observada visualmente e determinada pelo critério teórico, no nível de fluxo extra correspondente ao valor superior do intervalo de ocorrência do comprimento crítico de rampa. Há possibilidade, entretanto, da falha ter ocorrido em

algum ponto ou para alguma taxa de descarga crítica intermediária, situada entre o nível de fluxo correspondente ao valor inferior e o nível de fluxo referente ao valor superior do intervalo. Como em alguns tratamentos o intervalo da possível ocorrência do comprimento crítico de rampa (valor inferior e superior) é mais amplo, optou-se por esta forma de apresentação dos resultados (intervalos) mais segura e conservativa.

Os intervalos de ocorrência dos comprimentos críticos de rampa determinados para os tratamentos com resíduos semidecompostos de milho foram superiores àqueles verificados para os tratamentos com resíduos frescos de aveia preta e soja. A maior quantidade total de resíduos de milho, bem como o maior tamanho e massa de suas peças, em relação aos demais, provavelmente explicam este fato. A perda de massa e a maior facilidade para suspensão e remoção pela enxurrada, decorrente do processo de decomposição, não teriam sido ainda suficientes para tornar os resíduos de milho menos eficazes no controle da erosão do que os de aveia preta e soja. Bertol et al. (1997) obtiveram comprimentos críticos de rampa entre 328 e 483 m para resíduos de milho em solo sem preparo; contudo, tratava-se de resíduos recém-colhidos e em quantidade elevada (12.000 kg ha⁻¹).

O intervalo de ocorrência do comprimento crítico de rampa obtido para o tratamento com metade dos resíduos produzidos frescos e parcialmente ancorados de aveia preta teve magnitude semelhante aos intervalos verificados para os tratamentos com

Quadro 2. Intervalos de ocorrência dos comprimentos críticos de rampa determinados para os tratamentos, nos três experimentos, onde foi constatada falha do resíduo cultural

Tratamento ⁽¹⁾	Intervalo de ocorrência do comprimento crítico		Nível de fluxo extra	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
m				
Experimento 1 – out/97				
Milho, 7.600 kg ha ⁻¹ res. semidec., parc. anc.	> 107	138	8	9
Milho, 6.200 kg ha ⁻¹ res. semidec., parc. anc.	> 152	164	7	8
Aveia preta, 3.400 kg ha ⁻¹ res. frescos, parc. anc.	> 99	110	7	8
Experimento 2 – maio/98				
Soja, 4.700 kg ha ⁻¹ res. frescos, soltos	> 94	108	5	6
Soja, 5.100 kg ha ⁻¹ res. frescos, parc. anc.	> 102	109	5	6
Soja, 3.400 kg ha ⁻¹ res. frescos, parc. anc.	> 91	102	5	6
Experimento 3 – out/98				
Soja, 3.950 kg ha ⁻¹ res. semidec., soltos	> 29	58	1	2
Soja, 4.500 kg ha ⁻¹ res. semidec., parc. anc.	> 33	63	1	2
Soja, 2.900 kg ha ⁻¹ res. semidec., parc. anc.	> 20	66	1	2

⁽¹⁾ res. = resíduos; semidec. = semidecompostos; parc. anc. = parcialmente ancorados; frescos = recém-colhidos.

os resíduos recém-colhidos de soja (Experimento 2), que não apresentaram diferenças relevantes, quando a quantidade e o grau de ancoramento desses resíduos aumentaram.

Os intervalos de ocorrência dos comprimentos críticos de rampa determinados para os tratamentos com resíduos semidecompostos de soja (Experimento 3) também não mostraram diferenças expressivas para as diferentes quantidades e ancoramentos testados. Os valores obtidos foram 36 a 46 % menores do que aqueles verificados para os tratamentos correspondentes de resíduos frescos de soja (Experimento 2), comparando-se os valores superiores dos intervalos dos comprimentos críticos de rampa. Bertol et al. (1997) também obtiveram redução no comprimento crítico de rampa ao testar resíduos semidecompostos de trigo mais milho em solo sem preparo (140 dias após a colheita e com operação de plantio simulada), em relação ao valor obtido para os mesmos resíduos, logo após a colheita do trigo. O comprimento crítico de rampa determinado reduziu-se da faixa entre 157 e 272 m para a de 87 a 174 m.

A falha dos resíduos culturais não significa perda completa do controle da erosão hídrica, mas, sim, redução de sua eficácia relativa. Logo, os expoentes do fator L e o coeficiente derivado para o fator C em determinada condição de manejo (modelos de predição de perdas de solo USLE e RUSLE) não seriam mais válidos, devendo ser corrigidos para a situação pós-falha. O aumento na taxa de erosão poderá ou não ser significativo, dependendo, entre outros fatores, da tensão de cisalhamento crítica da superfície do solo ser ou não atingida, do quanto recente foi o último preparo e da susceptibilidade do solo à erosão em sulcos (Foster, 1982a). As taxas de erosão no ponto de falha podem ainda ser maiores ou menores do que a tolerância de perda anual de solo (critério adotado nos modelos USLE e RUSLE) para o tipo de solo em questão.

Para que o sistema de manejo adotado mantenha a mesma eficácia de controle da erosão, por uma questão de segurança e critério conservativo, no ponto onde se constatou falha do resíduo cultural deverá ser colocado um obstáculo à enxurrada (práticas de suporte, como os terraços, por exemplo), para impedir que ela atinja maior potencial erosivo. No entanto, a decisão de colocar ou não um terraço naquele ponto irá depender do volume de enxurrada e da praticidade de suas dimensões (Bertol et al., 2000). Na eventualidade de os comprimentos críticos de rampa serem utilizados como subsídio na decisão de uso e, ou, espaçamento entre práticas de suporte, sugere-se o uso do valor inferior do intervalo de ocorrência não só por questão de segurança, mas também para possibilitar o uso de estruturas de menor dimensão.

Deve-se ainda ressaltar que os pontos de falha dos resíduos e os correspondentes comprimentos críticos de rampa determinados só são válidos para

condições semelhantes àquelas dos tratamentos estudados, ou seja: tipos, quantidades e formas de manejo de resíduos, tipo e declividade do solo e quantidade e intensidade de precipitação. Não é válida a extrapolação para outras situações, uma vez que a tensão de cisalhamento da enxurrada e a tensão de cisalhamento crítico do solo e dos resíduos culturais, dentre outros fatores, serão diferentes.

CONCLUSÕES

1. Foi comprovada a ocorrência de falha dos resíduos culturais no sistema de semeadura direta.
2. O ponto de falha e o respectivo comprimento crítico de rampa variaram com o tipo, quantidade e forma de manejo dos resíduos culturais.
3. Foram observados comprimentos críticos de rampa em todos os tratamentos com resíduos culturais, com exceção do tratamento com 5.600 kg ha⁻¹ de resíduos frescos e parcialmente ancorados de aveia preta, cujas taxas de descarga aplicadas não foram suficientes para caracterizar um ponto de falha dos resíduos ou atingir uma descarga crítica.
4. A disseminação generalizada da idéia de retirada dos terraços das lavouras sob sistema de semeadura direta poderá resultar em sérios problemas de erosão, especialmente se acompanhada de plantio morro-abaxio, devendo, portanto, ser abandonada.
5. Há necessidade premente de realização de mais experimentos para determinar comprimentos críticos de rampa em sistemas conservacionistas de preparo do solo com as principais culturas utilizadas, especialmente em solos mais importantes do ponto de vista agrícola, tais como os Latossolos. Os experimentos deverão avaliar tipos, quantidades e formas de manejo de resíduos culturais, contemplando ainda diferentes declividades do solo, bem como o tempo de condução dos sistemas conservacionistas de preparo do solo.

AGRADECIMENTOS

À Estação Experimental Agronômica da UFRGS, especialmente aos funcionários Sr. Ozébio e Sr. Paulo Lima, bem como ao Eng^o. Agro. Dr. Edeimar Valdir Streck (EMATER-RS), que, de uma forma ou outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- BERTOL, I. Comprimento crítico de declive para preparos conservacionistas de solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 185p. (Tese de Doutorado)

- 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.
- BERTOL, I.; COGO, N.P. & CASSOL, E.A. Distância entre terraços usando o comprimento crítico de rampa em dois preparos conservacionistas de solo. R. Bras. Ci. Solo, 24:417-425, 2000.
- COGO, N.P. Effect of residue cover, tillage-induced roughness and slope length on erosion and related parameters. West Lafayette, Purdue University, 1981. 346p. (Tese de Doutorado)
- COGO, N.P.; FOSTER, G.R. & MOLDENHAUER, W.C. Flow rates-soil erosion relationships as affected by wheat residue cover: an attempt to define slope length limits for conservation tillage. R. Bras. Ci. Solo, 20:475-483, 1996.
- FOSTER, G.R.; JOHNSON, C.B. & MOLDENHAUER, W.C. Critical slope lengths for unanchored cornstalk and wheat straw residue. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 25:935-939, 947, 1982a.
- FOSTER, G.R.; JOHNSON, C.B. & MOLDENHAUER, W.C. Hydraulics of failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 25:940-947, 1982b.
- HUSSEIN, M.H. & LAFLEN, J.M. Effects of crop canopy and residue on rill and interrill soil erosion. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 25:1310-1315, 1982.
- LAFLEN, J.M.; BAKER, J.L.; HARTWIG, R.O.; BUCHELE, W.F. & JOHNSON, H.P. Soil and water loss from conservation tillage systems. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 21:881-885, 1978.
- MEYER, L.D. & PORTS, M.A. Prediction and control of urban erosion and sedimentation. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON URBAN HYDROLOGY, HIDRAULICS, AND SEDIMENTATION, Lexington, 1976. Proceedings. Lexington, University of Kentucky, 1976. p.323-331.
- MORAIS, L.F.B. Comprimentos críticos de declive para diferentes manejos de resíduos culturais no sistema plantio direto em um solo Podzólico da Depressão Central-RS. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 162p. (Tese de Doutorado)
- SWANSON, N.P. A rotating-boom rainfall simulator. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 8:71-72, 1965.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. Washington, USDA, 1978. 58p. (Agricultural Handbook, 537)

