

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**EROSÃO HÍDRICA E LIMITES CRÍTICOS DE COMPRIMENTO DE DECLIVE
EM DIFERENTES TIPOS E QUANTIDADES DE RESÍDUO CULTURAL E
DOIS MODOS DE SEMEADURA DIRETA**

André Julio do Amaral

(Tese de Doutorado)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**EROSÃO HÍDRICA E LIMITES CRÍTICOS DE COMPRIMENTO DE DECLIVE
EM DIFERENTES TIPOS E QUANTIDADES DE RESÍDUO CULTURAL E
DOIS MODOS DE SEMEADURA DIRETA**

ANDRÉ JULIO DO AMARAL

Engenheiro Agrônomo (CAV/UDESC)

M.Sc. em Ciência do Solo (CAV/UDESC)

Tese apresentada como um
dos requisitos à obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil

20 de Julho de 2010

ANDRÉ JULIO DO AMARAL
Engenheiro Agrônomo - CAV/UDESC
Mestre em Ciência do Solo - CAV/UDESC

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOCTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em:
Pela Banca Examinadora

Homologado em:
Por

NEROLI PEDRO COGO
Orientador-PPG Ciência do Solo/UFRGS

FLÁVIO A. O. CAMARGO
Coordenador do Programa
de Pós-Graduação em
Ciência do Solo

Dr. ILDEGARDIS BERTOL
Co-orientador - CAV/UDESC

Dr. CARLOS GUSTAVO TORNQUIST
PPG Ciência do Solo/UFRGS

Dr. JOSÉ ELOIR DENARDIN
EMBRAPA TRIGO

Dr. LUCIANO DA SILVA SOUZA
UFRB

Dr. EDEMAR VALDIR STRECK
EMATER - RS

PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade de
Agronomia

Aos que contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente meus pais, José Zanchetta do Amaral (in memoriam) e Maria dos P. do Amaral, pelo seu imenso amor e carinho,

DEDICO.

**O que acontecer com a terra
acontecerá com os filhos e filhas da terra.
O homem não teceu a teia da vida, ele é
dela apenas um fio. O que ele fizer para
a teia estará fazendo a si mesmo.**

**Ted Perry
(inspirado pelo Chefe Seattle)**

**“Afagar a terra conhecer os desejos da terra cio da terra, propícia estação
de fecundar o chão...”**

**Milton Nascimento/Chico
Buarque**

**“Porque ao final nós iremos
conservar somente o que amamos,
nós iremos amar somente o que
entendemos e nós iremos entender
somente o que nós é ensinado”.**

**Baba Dioum,
Agente Conservacionista Africano**

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, de forma bela e plena.

Ao professor Neroli Pedro Cogo, do PPGCS/UFRGS, meu orientador, pela sua disposição em aceitar a minha candidatura em sua área de atuação no Curso e, dedicada e integralmente, me orientar durante a sua realização, bem como durante a realização da pesquisa e a elaboração da tese, demonstrando ser, não apenas um profissional seguro e experiente, mas também um grande e verdadeiro amigo, sempre enaltecendo minhas virtudes e minha capacidade de trabalho, mas, na medida do necessário, chamando a atenção para as minhas dificuldades e limitações, porém de forma justa, compreensiva e encorajadora.

Ao professor Ildgardis Bertol, do CAV/UDESC, meu co-orientador, pela amizade e orientação segura e constante durante o desenvolvimento das atividades de campo, e por permitir o meu livre acesso aos Laboratórios de Física e Manejo e Conservação do Solo da sua instituição de trabalho, para a realização das análises laboratoriais, sem o que, certamente, este trabalho teria sido bem mais difícil e mais demorado.

Ao professor Jaime Antônio de Almeida, do CAV/UDESC, pelo inestimável auxílio na descrição morfológica do perfil de solo da área experimental, bem como na interpretação dos resultados das análises físicas e químicas do mesmo, com vistas a sua classificação taxonômica.

Aos professores do PPG Ciência do Solo e do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela receptividade e pelos ensinamentos transmitidos.

Ao Centro de Educação Profissionalizante – CEDUP - Caetano Costa, São José do Cerrito (SC), pela permissão em nele instalar a área experimental que serviu de base para a realização desta pesquisa e pelas facilidades concedidas, principalmente no que se refere à infra-estrutura e recursos humanos, que muito contribuíram para a realização deste trabalho, em especial aos Eng^{os}. Agr^{os} Almir Vedana Zapparoli e Edilceu dos Santos, respectivamente diretor de ensino e professor do referido Centro.

A CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao Secretário do PPG Ciência do Solo/UFRGS, Jader Ribeiro Amaro, pelo admirável e exemplar cumprimento de suas funções como servidor público, às vezes até deixando de lado suas justas e merecidas férias e seus importantes compromissos pessoais para, de forma alegre, afetiva e

animadora, ajudar e esclarecer os alunos em todas suas necessidades e em todas suas dúvidas, naquilo que pode ser considerado como um verdadeiro orgulho para a instituição onde trabalha.

À Equipe de Erosão e Conservação do Solo do PPG Ciência do Solo e do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, sob a orientação do professor Neroli Pedro Cogo, meus colegas de estudo e de trabalho, Jeane Cruz Portela, Gustavo Portz, Luciléia Gilles, Tatiane Bagatini, Silmara da Luz Correia, Henrique Thomaz Queiroz e Elias Davi Kuck, bem como à Equipe de Erosão e Conservação do Solo do Departamento de Solos e Recursos Naturais do CAV-UDESC, sob a orientação do professor Ildegardis Bertol, meus ex-colegas de estudo e de trabalho, Fabrício Tondello Barbosa, Pablo Grhal dos Santos, Romeu de Souza Werner e Julio Cesar Ramos, pela valiosa contribuição nos trabalhos de campo e de laboratório e pela amizade.

Aos amigos e colegas do PPG Ciência do Solo/UFRGS, principalmente os de convivência mais freqüente, como Osmar Conte, Henrique Debiase, Jeane Cruz Portela, Andrea Machado Pereira Franco, Luis de França, Flavio Pereira de Oliveira, Letícia Sequinatto, Edicarlos Damacena, Fabíola Lopes, Christina Venzke, Daniela Barbosa, Leandro Bortolon, Michael Mazurana, Jonatan Müller, Benjamin Dias Osório, Rosane Martinazzo, Michely Tomazi, Analu Mantovani, Sidnei Leandro, Regilene da Silva Souza, Gustavo Portz e Tatiane Bagatini, pela amizade, carinho e momentos felizes que juntos passamos, tornando a minha jornada mais amena e produtiva.

À Daniela Dambrós, pela amizade, apoio e momentos felizes.

A todos meus familiares, mas especialmente meus irmãos e minhas irmãs, Alceu, Áureo, Anilton, Antônio, Alcélcio, Rita, Rosane, Rosenéia e Luciane, pelo carinho, amizade, apoio e incentivo, sempre constantes.

Por fim, de modo muito especial, com muito carinho e muita gratidão, aos meus queridos pais, José Zanchetta do Amaral (*in memoriam*) e Maria dos P. do Amaral, pelo seu imenso amor e belos ensinamentos de vida, apontando-me o caminho certo a ser seguido, como indivíduo e como profissional.

EROSÃO HÍDRICA E LIMITES CRÍTICOS DE COMPRIMENTO DE DECLIVE EM DIFERENTES TIPOS E QUANTIDADES DE RESÍDUO CULTURAL E DOIS MODOS DE SEMEADURA DIRETA

Autor: André Julio do Amaral
Orientador: Neroli Pedro Cogo
Co-orientador: Ildegardis Bertol

RESUMO

Pela rapidez e grau com que podem alterar as condições físicas da superfície do solo, os métodos de seu preparo se destacam dentre os vários componentes de seu manejo, tendo em vista que eles são determinantes da quantidade de resíduo cultural e do grau de rugosidade com que ficará a superfície do solo após terem sido executados, e estas duas variáveis sendo a principal ferramenta para controlar a erosão. Baseado nisso, realizou-se este trabalho com o objetivo de avaliar a erosão hídrica pluvial do solo, direcionada para os aspectos de comprimento crítico de declive, em diferentes tipos e quantidades de resíduo cultural e dois modos de semeadura direta. Para tal, usou-se chuva simulada (simulador de braços rotativos; $i=75 \text{ mm h}^{-1}$; $d=1,25$ a 2 h), fluxos extras de água (06 níveis, 10 min de duração cada um) e um Nitossolo Bruno muito argiloso (declive de $0,16 \text{ m m}^{-1}$) da região do Planalto-Sul Catarinense (SC), em 2008 e em 2009. Os tratamentos foram constituídos dos resíduos culturais de aveia preta e de milho, nas quantidades de, respectivamente, 5,3, 2,65 e $1,32 \text{ Mg ha}^{-1}$ e 8, 4 e 2 Mg ha^{-1} , e dos modos de semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões e com hastes sulcadoras ou facões. Observou-se que perda de água variou de média a grande sob o resíduo de aveia preta e de pequena a média sob o de milho, e em ambos foi maior no modo de semeadura sem facões do que com facões e sem tendência da influência das doses de resíduo em qualquer dos modos de semeadura. Já a perda de solo foi sempre pequena e se diferenciou pouco entre os modos de semeadura e as doses de resíduo no caso deste ser o de aveia preta; com o resíduo de milho variou de muito pequena a grande e foi maior no modo de semeadura sem facões do que com facões e aumentou com o decréscimo das doses de resíduo em qualquer dos modos de semeadura. Os comprimentos de declive simulados, baseados nos dados obtidos com o resíduo de milho, foram maiores no modo de semeadura com facões do que sem facões, em qualquer das doses de resíduo, sem tendência da influência destas últimas nos dois modos de semeadura. Foi evidenciada falha do resíduo cultural ou existência de limites críticos de comprimento de declive em todos os tratamentos pelo critério da observação visual a campo, porém sendo confirmada apenas em um deles pelo critério das relações teóricas de erosão. Mesmo assim, como referência e medida de segurança, considerando a aplicação teórica e prática dos resultados, deu-se crédito real ao primeiro critério mencionado e, com base nele, apontaram-se os limites críticos de comprimento de declive de 64 a 118 m na semeadura direta realizada sem facões e de 171 a 456 m na realizada com facões, no conjunto das doses de resíduo, em cada modo de semeadura.

^{1/}Tese de Doutorado em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. (145 p.) – Julho, 2010.

WATER EROSION AND CRITICAL SLOPE-LENGTH LIMITS IN DIFFERENT TYPES AND AMOUNTS OF CROP RESIDUE AND TWO MODES OF DIRECT SEEDING

Author: André Julio do Amaral

Adviser: Neroli Pedro Cogo

Co-adviser: Ildegardis Bertol

SUMMARY

Because of the speed and degree in which they can change the physical conditions of the soil surface, tillage methods stand out among its various management components, since they are determinants of both the amount of crop residue and the degree of roughness the surface of the soil will expose after they are accomplished, and these two variables being the main tool for controlling erosion. Based on that, this work was developed with the objective of evaluating the soil erosion caused by water-rainfall, directed to the aspects of critical slope lengths, in different types and amounts of crop residue and two modes of direct seeding. To accomplish that, simulated rainfall (rotating-boom rainfall simulator; $i=75 \text{ mm h}^{-1}$; $d=1.25$ to 2 h), inflows of extra water (06 levels, 10 min duration each), and a heavy clay Alfisol (0.16 m m^{-1} slope steepness) of the region of the Planalto Sul-Catarinense, Santa Catarina State, Brazil, were used, in 2008 and in 2009. Treatments consisted of straw of black oats and cornstalk, in the rates of, respectively, 5.3, 2.65, and 1.32 Mg ha^{-1} and 8, 4, and 2 Mg ha^{-1} , and the modes of direct seeding without shanks or knives and with shanks or knives. It was observed that the water loss varied from medium to great under the straw of black oats and from very small to medium under the cornstalk, and in both of them was greater in the mode of seeding without knives than with knives and with no-tendency with respect to the influence of the rates of the crop residues in any of the seeding modes. Yet the soil loss was always small and differed little between both modes of seeding and rates of crop residue when this was that of straw of black oats; with cornstalk it varied from very small to great and was greater in the mode of seeding with knives than without knives and increased with the diminishment of the rates of crop residue in the two modes of seeding. The simulated slope lengths, based on data obtained with the crop residue of cornstalk, were greater in the mode of seeding with knives than without knives, in any of the rates of crop residue, without tendency with respect to the influence of these later in any of the seeding modes. It was evidenced failure of the crop residue or existence of critical slope lengths in all treatments by the criterion of visual field observation, but being confirmed only in one of them by the criterion of theoretical erosion relationships. Still, as a reference and measure of safety, in regard to the theoretical and practical application of the data, real credit was given to the first criterion mentioned and, based on it, were pointed the critical slope-length limits of 64 to 118 m in the direct seeding performed without knives and of 171 to 456 m in that performed with knives, in the whole of the rates of crop residue, in each mode of seeding.

^{1/} Doctorate thesis in Soil Science, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. (145 p.) – Julho, 2010.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1.Mecanismos básicos de erosão hídrica pluvial do solo.....	6
2.2.Fatores principais que afetam o processo de erosão hídrica pluvial do solo.....	8
2.3.Influência do preparo do solo na erosão hídrica pluvial.....	16
2.4.Influência das condições físicas de superfície e subsuperfície do solo na erosão hídrica pluvial.....	18
2.5.Influência do tipo, quantidade e forma de manejo dos resíduos culturais na erosão hídrica pluvial do solo.....	22
2.6.Perda da eficácia relativa de redução da erosão hídrica pluvial pelos resíduos culturais nos métodos conservacionistas de preparo do solo.....	24
2.7.Indicadores do ponto de falha ou movimentação e deslocamento dos resíduos culturais.....	26
2.7.1. Observação visual a campo.....	26
2.7.2. Relações teóricas de erosão.....	27
2.7.2.1. Taxa de erosão versus taxa de descarga da enxurrada...	27
2.7.2.2. Concentração de sedimentos na enxurrada versus taxa de descarga da enxurrada.....	29
2.7.2.3. Velocidade da enxurrada versus sua taxa de descarga....	30
2.8.Limites críticos de comprimento de declive observados a campo para a eficácia máxima de redução da erosão hídrica pelos resíduos culturais nos preparos conservacionistas de solo.....	31
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1.Esclarecimento inicial.....	34
3.2.Localização e solo da área experimental.....	35
3.3.Histórico da área experimental.....	36
3.4.Natureza da pesquisa, aparelho simulador de chuva, intensidade e duração das chuvas simuladas, unidade experimental e níveis de fluxo extra de água usados na mesma.....	37
3.5.Tratamentos estudados.....	41
3.6.Determinações efetuadas.....	42
3.6.1. Determinações a campo, antes da aplicação das chuvas simuladas e da adição dos níveis de fluxo extra de água.....	42
3.6.1.1. Caracterização das condições físicas subsuperficiais do solo.....	42
3.6.1.2. Caracterização das condições físicas superficiais do solo.....	42
3.6.1.3. Teor de água no solo.....	44
3.6.2. Determinações a campo, durante a aplicação das chuvas simuladas e a adição dos níveis de fluxo extra de água.....	44
3.6.3. Determinações de laboratório e procedimentos de escritório.	45

3.6.3.1. Checagem da intensidade das chuvas simuladas aplicadas.....	45
3.6.3.2. Concentrações instantâneas de sedimento na enxurrada	45
3.6.3.3. Taxas instantâneas de perda de solo.....	46
3.6.3.4. Perda total de água.....	46
3.6.3.5. Perda total de solo.....	46
3.6.3.6. Cálculo dos comprimentos equivalentes de declive simulados na pesquisa.....	47
3.7. Ajuste de resultados.....	47
3.8. Análise e interpretação dos resultados.....	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1. Parte 1 – Erosão hídrica sob resíduos culturais de aveia e milho e modos de semeadura direta.....	50
4.1.1. Condições físicas internas do solo antes da implantação dos tratamentos e da realização dos testes de chuva simulada.....	50
4.1.2. Massa de matéria seca da parte aérea, cobertura do solo por resíduos culturais e massa de matéria seca de raízes das culturas de aveia e milho, antes e após a implantação dos tratamentos, antes da realização dos testes de chuva simulada.....	51
4.1.3. Condições físicas externas e teor de água do solo logo após a implantação dos tratamentos, antes da realização dos testes de chuva simulada.....	54
4.1.4. Distribuição temporal das taxas de descarga da enxurrada...	58
4.1.5. Distribuição temporal da concentração de sedimentos na enxurrada.....	61
4.1.6. Distribuição temporal da taxa de perda de solo.....	63
4.1.7. Tempo de início da enxurrada, lâmina de água da chuva retida e infiltrada na superfície do solo no período que o antecedeu, taxa constante de descarga da enxurrada (q_c), taxa constante de infiltração de água no solo (if_c) e coeficiente de enxurrada (c).....	65
4.1.8. Perdas totais de água e solo.....	69
4.2. Parte 2 – Limites críticos de comprimento de declive sob três doses de resíduo cultural e dois modos de semeadura direta.....	74
4.2.1. Fluxos extras de água adicionados nas parcelas experimentais e equivalentes comprimentos de declive.....	74
4.2.2. Taxas de descarga da enxurrada a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água.....	80
4.2.3. Concentrações de sedimento na enxurrada a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água.....	82

4.2.4. Taxas de erosão ou perda de solo a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água.....	86
4.2.5. Análise preliminar do processo de falha do resíduo cultural ou da existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo.....	88
4.2.6. Análise padrão dos indicadores do processo de falha do resíduo cultural ou da existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo.....	91
4.2.6.1. Critério da observação visual a campo.....	93
4.2.6.2. Critério das relações teóricas de erosão.....	104
4.2.6.2.1. Concentração de sedimentos na enxurrada versus taxa de descarga da mesma no ponto médio das parcelas experimentais.....	106
4.2.6.2.2. Taxa de erosão versus taxa de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais.....	109
4.2.6.3. Análise conjunta dos resultados de falha do resíduo cultural ou de existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo: critério da observação visual a campo versus critério das relações teóricas de erosão.....	111
5. CONCLUSÕES.....	114
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	116
6.1. Do ponto de vista metodológico.....	116
6.2. Do ponto de vista de aplicação prática dos resultados.....	117
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120
8. APÊNDICES.....	130

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Valores de alguns atributos físicos internos em três camadas do solo, avaliados ao final do ciclo das culturas de aveia e milho, antes da implantação dos tratamentos e da realização dos testes de chuva simulada.....	52
2. Massa de matéria seca da parte aérea, cobertura do solo por resíduos culturais e massa de matéria seca de raízes, avaliadas ao final do ciclo das culturas de aveia e milho, antes e após a implantação dos tratamentos, antes da realização dos testes de chuva simulada.....	53
3. Valores de alguns atributos físicos externos e de teor de água do solo em duas camadas do solo, avaliados logo após a implantação dos tratamentos, antes da realização dos testes de chuva simulada.....	57
4. Valores de alguns atributos de erosão hídrica, avaliados durante a aplicação das chuvas simuladas, na situação com o resíduo cultural de aveia preta, nos tratamentos estudados.....	66
5. Valores de alguns atributos de erosão hídrica, avaliados durante a aplicação das chuvas simuladas, na situação com o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.....	66
6. Níveis e taxas de fluxo extra de água em que foram observadas a movimentação e remoção do resíduo cultural de milho, e equivalentes limites críticos calculados de comprimento de declive, nos tratamentos estudados.....	102

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Vista da trincheira aberta no solo (a) da área experimental (b), em dada época de condução de um dos seus experimentos, no caso com a cultura da aveia preta em estágio avançado de desenvolvimento vegetativo.....	36
2. Vista do aparelho simulador de chuva aspergindo água concomitantemente em duas unidades experimentais (a) e de uma delas com o resíduo cultural de aveia preta uniformemente espalhado na superfície do solo antes da aplicação da chuva (b).....	38
3. Vista de alguns detalhes na operacionalização dos testes de erosão da parte 2 do estudo: (a) pluviômetros sob a área de projeção de água do aparelho simulador de chuva, para verificação da intensidade da mesma, e do equipamento utilizado na adição dos fluxos extras de água - canos plásticos, registros de entrada e saída de água e manômetros -, e (b) entrada de água na cabeceira de uma unidade experimental da pesquisa, em um dos níveis de fluxo extra de água adicionado.....	40
4. Vista do rugosímetro ou perfilômetro utilizado na medição da rugosidade superficial do solo (a), em operação sobre uma unidade experimental do estudo (b).....	44
5. Vista da superfície do solo nas parcelas experimentais logo após a implantação dos tratamentos, na situação com o resíduo cultural de aveia preta, antes da realização do correspondente teste de erosão com chuva simulada (a, b, c - sem hastes sulcadoras; d, e, f - com hastes sulcadoras; 1/1=tudo o resíduo produzido ou 5,3 Mg ha ⁻¹ ; 1/2=metade do resíduo produzido ou 2,65 Mg ha ⁻¹ ; 1/4=um quarto do resíduo produzido ou 1,32 Mg ha ⁻¹).....	56
6. Vista da superfície do solo nas parcelas experimentais logo após a implantação dos tratamentos, na situação com o resíduo cultural de milho, antes da realização do correspondente teste de erosão com chuva simulada (a, b=sem hastes sulcadoras; c, d=com hastes sulcadoras; 1/1=tudo o resíduo produzido ou 8,0 Mg ha ⁻¹ ; 1/4=um quarto do resíduo produzido ou 2,0 Mg ha ⁻¹ ; <u>obs</u> : a ausência das imagens com a dose de 1/2=metade do resíduo produzido ou 4,0 Mg ha ⁻¹ se deveu a que as mesmas não resultaram boas).....	56
7. Distribuição temporal da taxa de descarga da enxurrada (TDE) e correspondente perda total de água (PTA) em relação às quantidades totais de chuva aplicadas, sob as intensidades e durações reais das chuvas simuladas, com os resíduos culturais de aveia preta e de milho, nos tratamentos estudados.....	60

8. Distribuição temporal da concentração de sedimento na enxurrada (CSE), sob as intensidades e durações reais das chuvas simuladas, com os resíduos culturais de aveia preta e de milho, nos tratamentos estudados.....	62
9. Distribuição temporal das taxas de perda de solo (TPS) e correspondentes perdas totais da mesma (PTS), sob as intensidades e durações observadas das chuvas aplicadas, nas condições com o resíduo cultural de aveia-preta e de milho, nos tratamentos estudados.....	64
10. Perda total de água (PTA - a) e perda total de solo (PTS - b) na condição com o resíduo cultural de aveia preta, nos tratamentos estudados.....	70
11. Perda total de água (PTA - a) e perda total de solo (PTS - b) na condição com o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.....	70
12. Taxas dos fluxos extras de água adicionados nas parcelas experimentais (Ia), em cada um dos seus níveis, sobre o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.....	76
13. Comprimentos equivalentes de declive simulados na pesquisa (Le), em função das taxas de fluxo extra de água que foram adicionadas nas parcelas experimentais (Ia), sobre o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.....	78
14. Distribuição temporal das taxas de descarga da enxurrada (q_t) a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água nas parcelas experimentais, sobre o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.....	81
15. Distribuição temporal das concentrações de sedimento na enxurrada (CSE) a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água nas parcelas experimentais, sobre o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.....	85
16. Distribuição temporal das taxas de erosão ou perda de solo (Dp) a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água nas parcelas experimentais, sobre o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.....	87
17. Concentração de sedimento na enxurrada (CSE) em função dos comprimentos equivalentes de declive simulados na pesquisa (Le), nos tratamentos estudados.....	89
18. Taxas de erosão ou perda de solo (Dp) em função dos comprimentos equivalentes de declive simulados na pesquisa (Le), nos tratamentos estudados.....	90

19. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras e dose integral do resíduo cultural de milho (SD s/hastes, 1/1 dose ou 8,0 Mg ha⁻¹), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do terceiro nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, (c) durante a adição do quarto nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, no modo em massa, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural..... 96
20. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras e metade da dose integral do resíduo cultural de milho (SD s/hastes, 1/2 dose ou 4,0 Mg ha⁻¹), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do terceiro nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, (c) durante a adição do quarto nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, predominantemente no modo em massa, mas com alguma remoção no modo de peça por peça, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural..... 97
21. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras e um quarto da dose integral do resíduo cultural de milho (SD s/hastes, 1/4 dose ou 2,0 Mg ha⁻¹), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do segundo nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, (c) durante a adição do terceiro nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, nos modos de peça por peça e em massa, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural..... 98
22. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras e dose integral do resíduo cultural de milho (SD c/hastes, 1/1 dose ou 8,0 Mg ha⁻¹), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do quarto nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, (c) durante a adição do quinto nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, no modo em massa, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a

remoção do resíduo cultural.....	99
23. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras e metade da dose integral do resíduo cultural (SD c/hastes, 1/2 dose ou 4,0 Mg ha ⁻¹), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a aplicação do quarto nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, (c) durante a adição do quinto nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, nos modos de peça por peça e em massa, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural.....	100
24. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras e um quarto da dose integral do resíduo cultural de milho (SD c/hastes, 1/4 dose ou 2,0 Mg ha ⁻¹), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do quinto nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, e (c) durante a adição do sexto nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, nos modos de peça por peça e em massa, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural.....	101
25. Distribuição temporal das taxas de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais (q _m), a partir da adição dos fluxos extras de água, nos tratamentos estudados.....	105
26. Relação da concentração de sedimentos na enxurrada (CSE) com a sua taxa de descarga no ponto médio das parcelas experimentais (q _m), nos tratamentos estudados.....	107
27. Relação da taxa de erosão ou perda de solo (Dp) com a taxa de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais (q _m), nos tratamentos estudados.....	110

RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
1. Valores de alguns atributos físicos e químicos do solo usado na pesquisa (Nitossolo Bruno Aluminoférrico húmico), localizado na região do Planalto Sul-Catarinense (SC), em diferentes horizontes e camadas do seu perfil - continua.....	131
2. Declividade e valor do fator S (fator inclinação do declive nos modelos USLE e RUSLE) nas unidades experimentais onde foram alocados os tratamentos estudados.....	133
3. Intensidade média e duração (valores observados) das chuvas simuladas aplicadas, medidas antes da adição dos níveis de fluxo extra de água nas parcelas experimentais, nos tratamentos estudados.....	133
4. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, dose integral ($1/1 - 8 \text{ Mg ha}^{-1}$) do resíduo cultural de milho.....	134
5. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, metade ($1/2 - 4 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho.....	135
6. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, um quarto ($1/4 - 2 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho.....	136
7. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, dose integral ($1/1 - 8 \text{ Mg ha}^{-1}$) do resíduo cultural de milho.....	137
8. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, metade ($1/2 - 4 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho.....	138
9. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, um quarto ($1/4 - 2 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho.....	139
10. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na	

enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, dose integral ($1/1 - 8 \text{ Mg ha}^{-1}$) do resíduo cultural de milho.....	140
11. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, metade ($1/2 - 4 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho.....	141
12. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, um quarto ($1/4 - 2 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho.....	142
13. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, dose integral ($1/1 - 8 \text{ Mg ha}^{-1}$) do resíduo cultural de milho.....	143
14. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, metade ($1/2 - 4 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho.....	144
15. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, um quarto ($1/4 - 2 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho.....	145

1. INTRODUÇÃO

O processo de erosão do solo pode ser dividido nas fases básicas de desagregação, transporte e deposição, as quais às vezes não são muito distintas uma das outras porque podem ocorrer concomitantemente durante a vigência de um evento erosivo (Ellison, 1947). Segundo Eswaran et al. (1992), o referido processo é o que, em maior proporção (84%, sendo 56% pela erosão hídrica e 28% pela erosão eólica), degrada as terras agrícolas do Mundo, causando danos classificados como diretos ou na lavoura e indiretos ou fora da lavoura. Esses danos resultam em sérias e onerosas conseqüências, tanto do ponto de vista de uso do solo, quanto de preservação do ambiente. Dentre os primeiros (danos na lavoura), destaca-se a redução da capacidade produtiva do solo para o crescimento inicial e desenvolvimento posterior das plantas, o que irá diminuir o rendimento das culturas e a produção total de alimentos. Dentre os segundos (danos fora da lavoura), destacam-se o assoreamento e a poluição das fontes superficiais de água, que irão se refletir no ambiente e, sob determinado aspecto, também na produção de alimentos. Dentre os danos que se relacionam com a poluição dos corpos hídricos superficiais, merece ser destacado o processo de eutrofização, o qual ocorre pela transferência para as águas de componentes do solo de baixa mobilidade, como o fósforo, o qual é removido da camada superficial do solo junto às partículas erodidas, ou por elementos dissolvidos e facilmente transportados na água de enxurrada, como os nitratos (Sharpley et al., 2001; Daverede et al., 2003; Bertol et al., 2007a).

As condições físicas externas ou superficiais do solo são as que primeiro e em maior grau influenciam o processo de erosão hídrica pluvial sobre as terras agrícolas, facilitando ou dificultando sua ocorrência. Neste sentido, a

operação de preparo do solo destaca-se como uma das mais importantes no processo de produção vegetal, tendo em vista que pode criar condições físicas na sua superfície as mais variadas possíveis, com destaque para a rugosidade ou o microrelevo e a cobertura por resíduos culturais (Allmaras et al., 1966; Burwell et al., 1966; Cogo, 1981; Schick et al., 2000; Bertol et al., 2006, Castro et al., 2006). Assim, os métodos de preparo do solo de caráter conservacionista são os mais recomendados e utilizados para reduzir a erosão (hídrica e eólica) que nele poderá vir a ocorrer, dentro dos níveis considerados aceitáveis, tendo em vista manterem, parcial ou totalmente, os resíduos culturais em superfície e, em geral, criarem de média a alta rugosidade superficial ou microrelevo (Cogo, 1981; Bertol et al., 2006). Estas duas condições irão ser decisivas na determinação da quantidade final de erosão e de escoamento superficial em dada área, principalmente quando se pratica uma agricultura intensiva e, especialmente, altamente moto-mecanizada.

Dentre os métodos de preparo do solo de caráter conservacionista, merece ser destacado o denominado de sem preparo ou técnica de semeadura direta ou plantio direto, o qual, quando bem estabelecido e bem conduzido, irá manter os resíduos culturais praticamente todos em superfície e, por esta razão, irá apresentar alta eficácia de redução da perda de solo por erosão, seja ela a hídrica ou a eólica (Mannering & Meyer, 1963; Cogo, 1981; Bertol et al., 1997; Schick et al., 2000; Amaral et al., 2008). Entretanto, o uso contínuo (e descuidado) dessa técnica, principalmente quando são aplicadas ao solo grandes cargas ou tensões, sejam elas oriundas do tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas e/ou do caminhar de animais, e o solo se encontrar com seu teor de água alto, geralmente deixa a sua superfície consolidada e com muito pouca ou, praticamente, nenhuma rugosidade ou microrelevo, o que irá restringir a retenção e a infiltração superficiais da água da chuva e, em decorrência, favorecer a enxurrada (Dissmeyer & Foster, 1981; Cogo, 1981; Streck & Cogo, 2003; Schick et al., 2000; Volk et al., 2004; Castro et al., 2006; Amaral et al., 2008).

Nos dias atuais, devido ao maior conhecimento e aprimoramento da técnica de semeadura direta ou plantio direto, inclusive no Brasil (Cassol et al., 2007), é bem possível executá-la de modo a permitir maior retenção e maior infiltração superficiais da água da chuva no solo, o que pode ser conseguido

por meio do uso de hastes sulcadoras ou facões (termo popular) atrelados à máquina semeadora-adubadora utilizada para tal, com o propósito de colocar o adubo em profundidade no solo (0,06 a 0,12 m). Com isso, a superfície do solo ficará parcialmente mobilizada e rugosa e, automaticamente, também com maior porosidade total na camada de solo que foi preparada, aumentando a retenção e a infiltração da água da chuva e diminuindo a enxurrada, sem perda da alta eficácia de redução da perda de solo por erosão da referida técnica.

Não obstante o exposto, que são fatos comprovados, é essencial ter em mente que a erosão hídrica pluvial do solo depende de um conjunto de fatores, e não apenas de um e/ou outro deles, como, alguns, erroneamente pensam e agem para tal. Os principais desse conjunto de fatores são: chuva, solo, topografia (comprimento, inclinação e formato ou curvatura do declive), combinação cobertura-manejo do solo e prática conservacionista de suporte ou prática complementar de controle da erosão. Assim, poderá haver situações no campo em que a quantidade de enxurrada é muito grande e, não com rara frequência, mesmo nas lavouras conduzidas sob a técnica de semeadura direta, que, indiscutivelmente, é a técnica mais recomendada para reduzir a perda de solo por erosão, mas, mesmo assim, sem nenhuma garantia de que esta última irá chegar aos níveis toleráveis. Por exemplo, na região sul do Brasil (também em outras regiões do mesmo, é claro), é comum a existência de lavouras com condições topográficas bastante favoráveis à erosão hídrica pluvial, as quais são caracterizadas por longos comprimentos e/ou fortes inclinações do declive. Nessas condições, a enxurrada poderá adquirir volume e velocidade, portanto, energia erosiva, o suficiente para superar a tensão crítica de cisalhamento, tanto do solo, quanto dos resíduos culturais que se encontram sobre ele, removendo-os e/ou, então, erodindo o solo por baixo deles (pequenos sulcos), sem que, necessariamente, haja remoção dos mesmos da lavoura, o que, em qualquer dos casos, irá aumentar a taxa de erosão a partir do ponto ou distância no declive onde ocorre um e/ou outro desses acontecimentos. Tal ponto é denominado de ponto de falha dos resíduos culturais ou comprimento crítico de declive para a eficácia máxima de redução da erosão hídrica por meio deles (Foster et al., 1982a,b). Informações sobre comprimentos críticos de declive, em lavouras conduzidas sob a técnica de semeadura direta ou plantio direto, no Brasil, até mesmo no Mundo, são

muito escassas até o presente momento, estando limitadas aos trabalhos realizados por Bertol (1995) e Moraes (1999), em solo Argissolo Vermelho Distrófico típico, na região da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul.

Atualmente, no Brasil, cerca de 25 milhões de hectares de lavoura com culturas anuais são explorados usando a técnica de semeadura direta. Entretanto, em função da, na maioria das vezes, má implantação e má condução dessa técnica, a referida extensão de lavouras, efetivamente, ainda sofre, e em alguns casos muito, do processo de erosão hídrica pluvial do solo. Fundamentalmente, isso se deve ao fato de agricultores, também técnicos, considerarem que a presença de resíduos culturais na lavoura, independentemente da sua quantidade, por si só, é suficiente para, integralmente (erosão propriamente dita e enxurrada a ela associada), controlar tal fenômeno, o que é um grande, e potencialmente perigoso, equívoco.

Considerando o exposto, duas hipóteses principais foram formuladas na presente pesquisa, da seguinte forma: a) quantidades maiores de um dado tipo de resíduo cultural, solto ou parcialmente ancorado na superfície do solo, por resultarem em maior percentagem de cobertura do mesmo, bem como em maior tensão crítica de cisalhamento dele e do próprio resíduo cultural, irão ser mais efetivas na redução da energia erosiva da chuva e da enxurrada a ela associada, por conseguinte, irão favorecer melhor a retenção e a infiltração superficiais de água e diminuir mais a enxurrada e a erosão; por estas mesmas razões, as taxas críticas de descarga da enxurrada para provocar falha dos resíduos culturais ou impor limites críticos de comprimento de declive para o efetivo controle da erosão hídrica por meio deles, irão ser maiores sob quantidades maiores de resíduo cultural, e b) a operação de semeadura direta realizada com hastes sulcadoras ou facões irá mobilizar um pouco a superfície do solo e, em decorrência, irá causar certa rugosidade ou certo microrelevo no mesmo; com isso, irá haver favorecimento da retenção e infiltração da água da chuva no solo e aprisionamento das partículas erodidas nas microdepressões ou cavidades formadas, o que irá aumentar o tempo de início da enxurrada e a altura da lâmina de água da chuva retida no sistema (solo e feições morfológicas da sua superfície) no período que o antecedeu, diminuindo a perda total de água e a perda total de solo; ao mesmo tempo, a rugosidade

superficial ou o microrelevo, por aumentar a tensão crítica de cisalhamento do solo e dos resíduos culturais, irá aumentar a taxa crítica de descarga da enxurrada para provocar falha destes últimos ou para impor limites críticos de comprimento de declive para o efetivo controle da erosão hídrica por meio deles.

Para verificar a veracidade das hipóteses acima, delinearam-se três objetivos principais na pesquisa em pauta, a qual foi realizada por meio do uso de chuva simulada, fluxos extras de água e um Nitossolo Bruno Aluminoférrico húmico muito argiloso e com declividade média de $0,16 \text{ m m}^{-1}$, na região do Planalto Sul-Catarinense (SC). Os referidos objetivos foram: a) quantificar a erosão hídrica pluvial e o escoamento superficial a ela associado em diferentes condições físicas da superfície do solo, determinadas pela combinação de tipos e quantidades de resíduo cultural (restos vegetais frescos ou recém-colhidos de aveia preta e de milho) com modos de execução da operação de semeadura da técnica de semeadura direta (sem e com hastes sulcadoras ou “facões” atrelados à máquina utilizada para tal); b) sob as mesmas condições especificadas acima, averiguar o processo de falha do resíduo cultural e, com base na sua ocorrência, estabelecer limites críticos de comprimento de declive para a eficácia máxima de redução da erosão hídrica por meio de resíduos culturais, na técnica de semeadura direta, e c) de posse dos resultados obtidos, contribuir para a seleção mais apropriada de valores do fator C – cobertura e manejo do solo dos modelos “USLE” e “RUSLE” de predição da erosão hídrica, para uso na técnica de semeadura direta, bem como subsidiar o cálculo de espaçamento entre terraços nas lavouras conduzidas sob essa técnica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mecanismos básicos de erosão hídrica pluvial do solo

O processo de erosão hídrica pluvial do solo é um fenômeno físico de superfície, o qual ocorre naturalmente, porém sob forte influência da ação do homem. Ele compreende as fases básicas de desagregação, transporte e deposição das partículas do solo, primárias ou individuais e secundárias ou agregados, pela ação da água da chuva e da enxurrada a ela associada. Fundamentalmente, trata-se de um confronto de forças, de ação ou ataque e de reação ou resistência, que ocorre na superfície do solo. As principais forças de ataque são representadas pela energia cinética contida no processo de queda das gotas da chuva da atmosfera para a terra e no movimento da enxurrada sobre a superfície do solo, enquanto que as de resistência, responsáveis pela dissipação e/ou redução dessas energias referidas, basicamente são devidas ao tipo de solo em si, tipo de uso da terra e forma de manejo do solo e da cultura. O balanço entre esses dois tipos de força pode resultar em um valor nulo ou desprezível (não preocupante), médio (indicador de alerta) ou grande (preocupante) de perda de solo, dependendo da presença e magnitude das variáveis envolvidas (Foster & Meyer, 1972 e 1977; Wischmeier & Smith, 1978; Hudson, 1995).

As considerações efetuadas acima, contudo, apesar de corretas e verdadeiras, devem ser tidas em mente sem esquecer do fato que o principal responsável pela erosão hídrica pluvial sobre as terras de cultivo é o impacto das gotas da chuva diretamente na superfície do solo, não a ação abrasiva ou

cisalhante da enxurrada, como até relativamente pouco tempo praticamente em todo o Mundo se pensava, e o que se constituiu na grande descoberta do século passado (referindo-se ao processo de erosão do solo), por Ellison (Ellison, 1947), nos Estados Unidos da América. Com base na sua descoberta, o autor referido efetuou a divisão clássica do processo erosivo do solo, separando-o em três fases básicas, às vezes não muito distintas uma das outras porque podem ocorrer concomitantemente durante a vigência de um evento de erosão. Essas fases usualmente são expostas e descritas da seguinte forma: 1) desagregação - desprendimento, separação ou desalojamento das partículas do solo da massa original que as contém, sejam elas partículas primárias ou individuais (grânulos das frações areia, silte e argila), sejam elas partículas secundárias ou agregados (aglomerados de partículas primárias ou conglomerados do solo); 2) transporte - movimento ou deslocamento das partículas desagregadas do solo sobre a superfície do terreno; e 3) deposição ou sedimentação - fim do transporte, ou seja, parada ou assentamento das partículas desagregadas do solo que se encontravam em suspensão na enxurrada, em algum ponto sobre a superfície do terreno. Em se tratando do processo de erosão hídrica pluvial, é importante dizer que a desagregação e o transporte de solo ocorrem pela ação isolada ou individual tanto da chuva quanto da enxurrada a ela associada. Com base nisso, quatro mecanismos básicos de erosão hídrica pluvial do solo podem ser enumerados como normalmente se desenvolvendo sobre as áreas de cultivo, a saber: desagregação e transporte de solo (curtas distâncias no terreno) pela ação de impacto das gotas da chuva - força aplicada na superfície do solo no modo normal, e desagregação e transporte de solo (curtas a longas distâncias no terreno) pela ação de cisalhamento e movimento da enxurrada - força aplicada na superfície do solo no modo tangencial (Foster & Meyer, 1972 e 1977). Com base nesses fatos, percebe-se que os dois agentes ativos de erosão hídrica pluvial do solo, chuva e enxurrada, são, cada um por si, agentes completos de erosão, tendo em vista que ambos, isoladamente, desagregam e movimentam solo, apesar de a chuva normalmente ser o notável agente de desagregação e a enxurrada o notável agente de transporte de partículas do solo sobre as terras inclinadas, durante a vigência de um evento erosão dessa natureza.

Outro avanço importante do ponto de vista de melhor entendimento do processo erosivo do solo pela água da chuva e da enxurrada a ela associada sobre as terras de cultivo, diz respeito à comprovação, também efetuada por Ellison (Ellison, 1947), três anos após a sua primeira e mais importante descoberta, mencionada no parágrafo anterior, de que diferentes solos comportam-se de modo completamente diferente em cada uma das três fases básicas do processo erosivo, e que, se a primeira fase (desagregação) não ocorrer, não ocorrerão as demais (transporte e deposição) e, então, pode-se dizer que não houve erosão ou que a perda líquida de solo na lavoura foi nula, praticamente não havendo prejuízo (do ponto de vista de dano físico causado à massa original do solo, tendo em vista que a enxurrada, mesmo estando isenta de partículas sólidas, poderá causar severa poluição química das fontes superficiais de água, devido às substâncias químicas e orgânicas dissolvidas e transportadas junto com a mesma). Desta forma, verifica-se a importância de se impedir ou, então, procurar reduzir ao máximo a primeira fase do processo erosivo do solo (desagregação), a qual, por sua natureza e ordem de ocorrência, se sobressai sobre as demais fases (transporte e deposição).

2.2. Fatores principais que afetam o processo de erosão hídrica pluvial do solo

Em prosseguimento e relacionado com os aspectos básicos abordados no item anterior, o processo de erosão hídrica pluvial do solo depende de um conjunto de fatores, naturais e induzidos pelo homem, os quais, em última análise, são os que irão determinar a quantidade total final de erosão em um dado local ou dada situação (Wischmeier & Smith, 1978; Hudson, 1995; Toy et al., 2002). Os principais desses fatores são: chuva, solo, comprimento e inclinação do declive, combinação cobertura-manejo do solo e práticas conservacionistas de suporte (práticas complementares de controle da erosão – caráter mecânico ou estrutural). Para entender melhor como esses fatores afetam o processo erosivo do solo pela água da chuva e da enxurrada a ela associada, será feita a seguir uma breve explanação sobre cada um deles, seguindo a ordem tal e qual são apresentados e discutidos em ambas, a tradicional Equação Universal de Perda de Solo - EUPS (“Universal Soil Loss

Equation – USLE”), desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978), e a sua versão mais recente Equação Universal de Perda de Solo Revisada - EUPSR (“Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE”), desenvolvida por Renard et al. (1997). Ambos esses modelos de predição da erosão hídrica são empíricos, sendo utilizados em várias partes do Mundo (principalmente a primeira versão), com a finalidade de predizer a perda média anual de solo de longo prazo (20 a 25 anos) que irá ocorrer em determinada área (normalmente uma lavoura agrícola), em função de características locais de chuva, solo, topografia, vegetação e uso da terra.

- Chuva

A erosão do solo é um processo físico que requer energia para sua realização. Como já mencionado, a maior parte dessa energia provém do processo de queda das gotas da chuva da atmosfera para a terra, portanto energia mecânica, a qual realiza trabalho erosivo no solo predominantemente na forma de energia cinética ou energia de movimento (Wischmeier, 1959; Wischmeier & Smith, 1978; Hudson, 1995; Toy et al., 2002). Assim, o tamanho, a forma e a distribuição de tamanho das gotas da chuva (principais determinantes da velocidade terminal de queda destas últimas), constituem suas características físicas primárias ou fundamentais, enquanto que a quantidade total e a intensidade (baseadas em uma dada duração), constituem suas características físicas secundárias ou derivadas, tendo em vista que são funções das primeiras.

A influência da chuva na erosão hídrica pluvial do solo é representada nos modelos de predição EUPS/“USLE” e EUPSR/“RUSLE” pelo fator R - erosividade da chuva. Conceitualmente falando, o termo erosividade aqui sendo usado se refere à habilidade potencial da chuva de causar erosão no solo (Wischmeier, 1959 e 1962; Wischmeier & Smith, 1978; Hudson, 1995), variando conforme as características físicas da mesma que há pouco foram mencionadas. Para tanto, nos modelos de predição da erosão referidos, usa-se como indicador da erosividade das chuvas um índice denominado de EI_{30} , também conhecido como índice de Wischmeier (Wischmeier, 1959), o qual denota o produto da energia cinética total da chuva pela sua intensidade

máxima num período consecutivo de 30 minutos. Esse índice foi o que apresentou a melhor correlação com as perdas de solo por erosão hídrica pluvial, segundo o autor referido, dentre vários, de mesma natureza, por ele testado. No Brasil, escassas observações a respeito, evidenciaram que esse índice também apresentou boa correlação com as perdas de solo por erosão hídrica pluvial, especialmente nas condições edafoclimáticas da região sul do País (Morais et al., 1988a, b; Bertol et al., 2002). Para a obtenção do fator R são necessárias observações individuais (a campo) de dados de chuva e perda de solo sobre um relativamente longo período de tempo (20 a 25 anos), de modo a contemplar a maior parte da variação possível das chuvas em dado local, e então posteriormente calcular o valor médio anual do fator R, para, com a necessária confiabilidade, se poder usá-lo nos modelos de predição da erosão hídrica que vêm sendo referidos.

- Solo

A influência do tipo de solo na sua perda por erosão hídrica pluvial é representada nos modelos de predição EUPS/"USLE" e EUPSR/"RUSLE" pelo fator K - erodibilidade do solo. Conceitualmente falando-se, erodibilidade como aqui sendo usada refere-se à vulnerabilidade ou susceptibilidade do solo à erosão (no caso à ação da chuva e da enxurrada a ela associada), variando conforme suas características (e propriedades associadas) inerentes ou intrínsecas (químicas, físicas, biológicas e mineralógicas), as quais irão determinar se um dado solo resistirá mais ou menos à erosão (Wischmeier & Smith, 1978; Renard et al., 1997; Hudson, 1995). Conforme foi mencionado no primeiro item desta revisão bibliográfica, a erosão do solo é um fenômeno físico de superfície, resultante do confronto de forças de ataque ou ação com forças de resistência ou reação. Nesse contexto, o solo é o principal agente passivo no processo, ou seja, o que irá sofrer a ação da chuva (também da enxurrada associada a ela), o principal agente ativo no mesmo processo. Assim, a resultante desse confronto fundamentalmente vai depender das características intrínsecas ou inerentes do solo (físicas, químicas, biológicas e mineralógicas, como mencionado), dentre elas se destacando a sua classe textural ou composição granulométrica (Toy et al., 2002).

Considerando que a desagregação e o transporte de partículas do solo pela ação da chuva e da enxurrada a ela associada constituem os componentes essenciais da erosão, atributos do mesmo, tais como teor e tipo de argila, quantidade de óxidos de ferro e de alumínio, teor de matéria orgânica, tipo de cátions, dentre outros, contribuem para uma alta estabilidade dos seus agregados e, em decorrência, uma maior resistência à desagregação de suas partículas pelos agentes erosivos. Resultante dessa maior estabilidade da estrutura do solo aumenta muito a infiltração da água da chuva na sua superfície, o que irá se refletir em menor enxurrada e, em decorrência, menor energia erosiva para causar erosão do solo. Por outro lado, as características de solo que influenciam sua transportabilidade em água estão ligadas mais ao diâmetro e à densidade (específica ou mineral) de suas partículas do que qualquer outro fator. Assim, em geral, os solos argilosos são bem mais facilmente transportados do que os arenosos, mas, por outro lado, eles resistem bem mais à desagregação. Há também que se considerar, entretanto, o conteúdo de matéria orgânica em dado solo, tendo em vista que esse componente pode consideravelmente baixar a densidade dos seus agregados. Assim, um dado agregado de solo poderá ser transportado a maiores distâncias do que um grânulo de areia do mesmo tamanho, devido sua menor densidade, causada pela presença de alto teor de matéria orgânica.

Diante do exposto, pode-se deduzir que, para um solo resistir melhor à ação dos agentes erosivos, ele deve apresentar alta estabilidade dos seus agregados e condições de superfície favoráveis à rápida infiltração de água, o que poderá ser conseguido por meio da criação de uma estrutura de solo porosa e estável, com alto conteúdo de matéria orgânica. Assim, as ações de manejo do solo devem ser dirigidas no sentido de poder alcançar esses objetivos, de modo a deixá-lo com o menor grau de erodibilidade possível.

- Topografia (comprimento e inclinação do declive)

Esse fator está relacionado com a configuração geográfica ou relevo do terreno propriamente dito, sobre o qual se desenvolve o processo de erosão hídrica pluvial do solo. Os dois componentes principais desse fator são o comprimento e a inclinação do declive, em que pese a curvatura ou o formato

do mesmo também influenciar o processo, às vezes de modo até muito significativo. Nos modelos de predição da erosão hídrica EUPS/"USLE" e EUPSR/"RUSLE", o fator em consideração é representado pelo fator topográfico combinado LS – comprimento e grau de inclinação do declive.

A influência do comprimento e da inclinação do declive na erosão hídrica pluvial do solo se faz sentir por meio da adição de energia ao processo, originada da quantidade e da velocidade da enxurrada, as quais são muito afetadas pelos componentes de topografia referidos. A perda de solo por erosão hídrica pluvial por unidade de área aumenta com a potência 0,5-0,6 do comprimento do declive (crescimento potencial) e com a potência 1,5 ou 1,6 da inclinação do declive (crescimento exponencial). É necessário também considerar que, em adição ao aumento regular da perda de solo por erosão hídrica pluvial com o aumento do comprimento do declive, a enxurrada poderá se concentrar em determinados pontos sobre o terreno e adquirir energia suficiente para movimentar e, até, remover os resíduos culturais para fora da área de ocorrência do fenômeno, principalmente se eles estiverem soltos na superfície do solo. Ainda nesse contexto, a enxurrada (concentrada) poderá erodir (sulcar) o solo por baixo dos resíduos culturais, então aumentando a taxa da erosão em sulcos a partir daquela distância ou daquele ponto no terreno, processo esse denominado de falha dos resíduos culturais ou comprimento crítico de declive para redução da erosão hídrica por meio dos mesmos nos preparos conservacionistas de solo (Wischmeier, 1973; Cogo, 1981; Bertol, 1995; Morais & Cogo, 2001). Essa ocorrência leva à necessidade de se alterar (para maior) o valor do fator C – cobertura e manejo do solo das equações de predição da erosão hídrica que vêm sendo referidas, para apropriadamente se predizer a perda de solo na lavoura a partir do ponto de falha dos resíduos culturais ou do comprimento crítico de declive no terreno.

- Cobertura e manejo do solo

A influência da cobertura vegetal por si só, do tipo de uso da terra e da forma de manejo do solo e da cultura na erosão hídrica pluvial é representada nos modelos EUPS/"USLE" e EUPSR/"RUSLE" pelo fator C – cobertura e manejo do solo. Segundo Wischmeier (1975) e Renard et al. (1997), os principais componentes que determinam o valor do fator C são a cobertura do

solo pela vegetação viva (copa das plantas ou dossel) e pela vegetação morta (resíduos culturais remanescentes), e as variáveis resultantes da perturbação mecânica causada no solo quando a ele se destina ao uso para fins de crescimento vegetal. Algumas considerações a respeito desses componentes serão feitas a seguir.

As plantas em crescimento influenciam a erosão hídrica pluvial do solo porque seu dossel protege a sua superfície da ação desagregadora do impacto das gotas da chuva e porque suas raízes causam melhoria geral na sua estrutura, o que irá facilitar a entrada de água no seu perfil e conferir resistência a sua massa quanto à ação erosiva. A capacidade do dossel das plantas de interceptar gotas de água da chuva irá variar com sua arquitetura e sua morfologia, as quais são peculiares a cada tipo de planta (Armstrong & Mitchell, 1988; Gonzalez Hidalgo et al., 1996), bem como com seu estágio de desenvolvimento ou grau de crescimento vegetal (Wischmeier & Smith, 1978; Toy et al., 2002). Por sua vez, a cobertura do solo por resíduos culturais é mais eficaz na redução da perda de solo por erosão pluvial do que a equivalente cobertura formada pelo dossel das plantas (Wischmeier & Smith, 1978). Isso é explicado pelo fato de os resíduos culturais dissiparem a energia cinética das gotas da chuva no ponto de impacto sobre eles, junto à superfície do solo, não permitindo reaquisição de energia no processo, o que irá evitar ou minimizar ao máximo a desagregação inicial de suas partículas, ao mesmo tempo em que irão servir de barreira física contra a ação cisalhante e transportadora da enxurrada, resultando em quantidades bem menores de perda de solo e de água pelo fenômeno (Wischmeier & Smith, 1978; Cogo, 1981; Bertol, 1986; Lopes et al., 1987; Levien, 1988; Bertol et al., 1989).

Os métodos de preparo do solo e semeadura/plantio das culturas também têm atuação de destaque no que se refere a sua influência na erosão hídrica pluvial, tendo em vista que são os principais responsáveis pela criação no mesmo de determinadas condições físicas importantes em relação a ela, tanto superficiais quanto subsuperficiais. O ponto importante nesse aspecto é que essas condições físicas podem ser planejadas com antecedência pelo usuário da terra, de modo tal a poder fornecer suficiente proteção à superfície do solo contra a ação desagregadora do impacto das gotas da chuva, bem

como favorecer a retenção e a infiltração da água da chuva na sua superfície e facilitar o movimento da mesma no seu interior.

Quanto à perturbação mecânica causada no solo quando a ele é destinado o uso para fins de crescimento vegetal, a principal decorre do seu preparo ou da sua mobilização, tendo em vista que tal ação irá se refletir na percentagem de cobertura por resíduos culturais, na rugosidade (e decorrente porosidade total da camada preparada) e na consolidação superficiais do solo. Essas condições, em última análise, são as que irão determinar a quantidade total final de erosão hídrica pluvial sobre as terras de cultivo, uma vez que elas afetam as três fases básicas do processo erosivo - desagregação, transporte e deposição -, bem como a quantidade total final de retenção e de infiltração superficial de água na superfície do solo (Wischmeier, 1973; Wischmeier & Smith, 1978; Cogo 1981; Cogo et al., 1983 e 1984; Norton et al., 1985; Bertol, 1986 e 1995; Renard et al., 1997; Darboux & Huang, 2005; Castro et al., 2006). Por oportuno, informa-se que tudo o que esteve envolvido no primeiro estudo da presente pesquisa (tipos e quantidades de resíduo cultural e formas de execução da operação de semeadura na técnica de semeadura direta versus perda de solo e água por erosão hídrica pluvial), essencialmente esteve relacionado com variáveis de manejo do solo, como as que vêm sendo comentadas e discutidas, especificamente associadas ao fator C – cobertura e manejo dos modelos EUPS/”USLE” e EUPSR/”RUSLE” de predição da erosão, tendo em vista que os demais fatores - R, K, L, S e P – todos foram mantidos constantes (no segundo estudo da pesquisa, entretanto, além das variáveis de manejo do solo mencionadas, também esteve envolvido o fator comprimento do declive, tratado no item anterior desta seção da revisão bibliográfica).

- Prática conservacionista de suporte (prática complementar de controle da erosão)

A influência das práticas mecânicas ou estruturais (as que envolvem medidas de movimentação e/ou sistematização da terra) na erosão hídrica pluvial do solo é representada nos modelos EUPS/”USLE” e EUPSR/”RUSLE” pelo fator P – prática conservacionista de suporte. A influência desse fator no processo em pauta essencialmente se faz sentir sobre a enxurrada, diminuindo seu volume e sua velocidade, por conseguinte diminuindo sua capacidade de

desagregar e de transportar solo. As principais práticas conservacionistas de suporte normalmente recomendadas nas lavouras agrícolas, são o preparo do solo e a semeadura/plantio das culturas em contorno, o cultivo em faixas em contorno e os terraços agrícolas, as quais, isoladamente, comparadas a sua ausência, reduzem a perda de solo por erosão hídrica pluvial em torno de 50%, 75% e 50%, respectivamente. O efeito dos terraços na redução da erosão hídrica pluvial do solo se dá por meio da segmentação do comprimento de rampa na lavoura, substancialmente diminuindo o valor do fator topográfico combinado LS, devido reduzir o valor do fator L – comprimento do declive. Verifica-se, pois, que o efeito dos terraços na redução da erosão hídrica pluvial não é considerado no fator P em si dos referidos modelos, mas sim no fator L. Assim, os terraços disciplinam o movimento da enxurrada na lavoura, efetivamente interceptando-a e reduzindo sua velocidade e seu volume, ao mesmo tempo em que induzindo a deposição das partículas erodidas nos seus canais (Wischmeier & Smith, 1978; Hudson, 1995; Renard et al., 1997). Ainda, os terraços impõem a execução das operações de preparo do solo e semeadura das culturas em contorno, o que irá garantir melhor a sustentação ou o prolongamento do efeito de redução da erosão das práticas de caráter não-mecânico ou vegetativo, integralizadas e consideradas no fator C – cobertura e manejo do solo dos modelos de predição da erosão em consideração, o que é muito positivo no que se refere ao controle efetivo da erosão hídrica. Isto porque existe a possibilidade concreta de ocorrer falha ou movimentação (até remoção) dos resíduos culturais nas lavouras na ausência de práticas conservacionistas de suporte, refletindo-se em perda de sua eficácia relativa de redução da perda de solo por erosão a partir do ponto de falha.

Com base no exposto, realmente verifica-se que a erosão hídrica pluvial do solo é um fenômeno físico essencialmente de superfície, resultante de um confronto de forças, de ação ou ataque e de reação ou resistência, porém com um universo de fatores a afetar o processo, e na maior parte das vezes de modo bastante intrincado. Dentre esses fatores, aquele ao qual a ação do homem exerce maior influência é determinado pela combinação da cobertura vegetal com o manejo do solo em si. Assim, torna-se claro que o princípio fundamental a ser seguido no processo de controle da erosão hídrica pluvial do

solo é limitar energia dos agentes erosivos chuva e enxurrada associada, ao mesmo tempo em que procurando conferir resistência a ele à ação destes últimos. Para se conseguir isso no grau máximo, entretanto, é fundamental que sejam adotadas práticas integradas de manejo da terra e de manejo do solo e da cultura nas lavouras agrícolas. Em se fazendo isto, efetivamente se estará contribuindo para a manutenção da qualidade dos recursos naturais solo e água, bem como para a sustentabilidade dos vários sistemas de produção vegetal, com benefícios para todos, homem e animais, no que se refere tanto aos aspectos ambientais quanto econômicos e sociais.

2.3. Influência do preparo do solo na erosão hídrica pluvial

O preparo do solo se destaca como uma das operações agrícolas mais importantes no processo de produção vegetal. Segundo Raney & Zingg (1957), ele tem como propósito principal modificar a estrutura do solo, de modo a criar condições mais favoráveis para a semeadura e germinação das sementes, bem como para o crescimento inicial e desenvolvimento posterior das plantas, dentre algumas outras finalidades. Nas várias classificações de métodos de preparo do solo existentes no Mundo, invariavelmente é considerado não-conservacionista aquele em que é usado o arado e/ou a grade (especialmente a do tipo aradora ou grade pesada) para preparar a terra para o cultivo (usualmente referido como preparo convencional), completamente mobilizando a camada superficial do solo e deixando-o bastante fragmentado e diretamente exposto à ação dos agentes erosivos, o que irá facilitar a desagregação de suas partículas pelo impacto das gotas da chuva, bem como o posterior transporte das mesmas pela ação da enxurrada (Hudson, 1995; Lindstrom et al., 1998; Zhang et al., 2007). Em adição a isso, o uso do arado e/ou da grade induz a incorporação praticamente de todos os resíduos culturais na camada superior do solo, deixando sua superfície totalmente vulnerável ao fenômeno do selamento e/ou encrostamento superficiais, o que drasticamente irá reduzir a taxa de infiltração de água no mesmo (Duley, 1939; Mannering & Meyer, 1963; Li et al., 2007; Zhang et al., 2007). Decorrente disso, a rugosidade superficial do solo, a qual normalmente é grande logo após o seu preparo com os equipamentos referidos, é rápida e substancialmente diminuída pela ação

da chuva e da enxurrada, favorecendo a ocorrência de grandes perdas de solo, água, matéria orgânica e nutriente por erosão hídrica pluvial (Burwell & Larson, 1969; Cogo, 1981; Lindstrom et al., 1998; Bertol et al., 2006; Castro et al., 2006; Bertol et al., 2007b). Por outro lado, os métodos de preparo do solo denominados de conservacionistas, como aquele em que é usado o escarificador (dentre outros tipos de equipamento de mesma natureza), seguido ou não da passagem de grade (usualmente referido como preparo reduzido ou, ocasionalmente e de modo errôneo, preparo mínimo), em geral se caracterizam por mobilizarem o solo bem menos do que no preparo convencional, em que usado arado e/ou grade. Essa forma de preparar a terra resultará em média a grande rugosidade superficial do solo, automaticamente também média a grande porosidade total da sua camada preparada, ficando ainda boa quantidade de resíduos culturais em superfície (Cogo, 1981; Cogo et al., 1983; Schick et al., 2000; Bertol et al., 2006; Amaral et al., 2008), o que irá favorecer a retenção e a infiltração superficiais da água da chuva, diminuindo a enxurrada e a erosão. No extremo dos métodos de preparo do solo de caráter conservacionista, encontra-se aquele denominado de sem preparo ou técnica de semeadura direta/plantio direto, cuja operação de semeadura é efetuada sem o preparo prévio usual do solo, resultando na menor mobilização possível deste último dentre todos os métodos de preparo existentes e, em decorrência, na maior quantidade de resíduos culturais deixada em superfície. Essa forma de se implantar culturas é a que apresenta o menor e os maiores graus de, respectivamente, rugosidade e consolidação e cobertura superficiais do solo (Cogo, 1981; Cogo et al., 1983, Bertol, 1995), fazendo com que a referida técnica seja considerada a mais eficaz para se reduzir a perda de solo por erosão, mas não com rara freqüência ela permite maior perda de água da chuva na forma de enxurrada. Fundamentalmente, isso se deve ao não-revolvimento do solo na mesma (Carvalho et al., 1990; Cogo et al, 2003; Zhang et al., 2007; Dissmeyer & Foster, 1981, Schick et al., 2000; Knapen et al., 2007), embora ela apresente maior continuidade de poros (Lindstrom et al., 1998), menor taxa de decomposição de materiais orgânicos (Beare et al., 1994) e maior estabilidade de agregados, comparado ao solo preparado com os equipamentos tradicionais (Bertol et al., 2004).

Embora o efeito do preparo do solo na redução da perda de água da chuva na forma de enxurrada seja, de modo geral, menor do que o da redução na perda de solo, alguns estudos têm demonstrado que determinados tipos de preparo também são eficazes na redução da primeira variável referida, ao contrário de outros (Johnson & Moldenhauer, 1979; Ghidry & Alberts, 1998; Shick et al., 2000, Amaral et al., 2008). Fundamentalmente, isso vai depender do tipo de equipamento utilizado na operação de preparo e do tipo de solo em si, bem como da história de uso e manejo deste último. A relativamente menor influência do preparo do solo na redução da perda de água da chuva na forma de enxurrada, comparada à perda de solo, é explicada pelo fato de que todos os solos possuem um limite de capacidade de absorção e armazenamento de água. Ultrapassado tal limite, o excesso de água irá escoar sobre o terreno inclinado, praticamente igualando o efeito dos diferentes métodos de preparo do solo no que se refere a sua eficácia de controle da perda de água no processo de erosão hídrica pluvial (Kohnke, 1968). Nesse mesmo sentido, Denardin et al. (2008) relatam que, para as condições climáticas da região sul-brasileira, as características fundamentais das chuvas apresentam potencial para superar a taxa de infiltração de água no solo e gerar enxurrada em qualquer época do ano, independentemente do uso e do manejo de solo adotado.

2.4. Influência das condições físicas de superfície e subsuperfície do solo na erosão hídrica pluvial

As alterações mais visíveis na superfície do solo, decorrentes do seu preparo, estão relacionadas com a rugosidade ou microrelevo e com a cobertura por resíduos culturais ou cobertura vegetal morta (Allmaras et al., 1966; Burwell et al., 1966), as quais irão variar com o método específico de preparo empregado no sistema de uso e manejo do mesmo. Pelo fato de a erosão hídrica pluvial ser um fenômeno físico de superfície, as alterações nas condições físicas do solo, causadas pelo preparo, são as principais responsáveis pelas taxas e perdas totais finais de água e solo por erosão sobre as terras de cultivo.

A rugosidade superficial ou microrelevo do solo se refere à criação no mesmo de microelevações e microdepressões espacialmente distribuídas, cujo

grau de grandeza vai depender do método específico usado na operação de preparo (Bertol et al., 2006; Castro et al., 2006; Bertol et al., 2007b) e apresentando grande influência no processo de erosão hídrica pluvial, devido afetar a retenção e a infiltração superficiais de água, a velocidade e o volume de enxurrada, a retenção superficial de sedimentos e, em decorrência, as perdas de água e solo pelo fenômeno (Onstad, 1984; Darboux & Huang, 2005; Kamphorst et al., 2000; Bertol et al., 2006; Bertol et al., 2007b). Em adição ao tipo e à intensidade de preparo, a rugosidade superficial do solo é influenciada pelo teor de água presente no mesmo por ocasião de seu preparo, pela quantidade, tipo e forma de manejo dos resíduos culturais presentes na sua superfície e pelo tipo de solo em si (Kamphorst et al., 2000; Bertol et al., 2006; Castro et al., 2006; Zoldan Jr. et al., 2008). O decaimento no grau de rugosidade superficial do solo é ainda influenciado pelo volume e pela intensidade da chuva e da enxurrada a ela associada (Eltz & Norton, 1997; Bertol et al., 2006; Castro et al., 2006). A excessiva e/ou contínua mobilização do solo pelo preparo, entretanto, substancialmente reduz a sua rugosidade superficial, fragmentando os seus agregados em demasia e deixando sobre a sua superfície uma maior quantidade de partículas desagregadas prontamente disponíveis para o processo de transporte. Esses fatos irão contribuir para a diminuição da retenção e infiltração superficiais de água e para o aumento da enxurrada e da erosão (Burwell et al., 1966; Allmaras et al., 1966; Cogo, 1981; Castro et al., 2006). O aumento na intensidade de preparo do solo também reduz a cobertura pelos resíduos culturais, motivada pela sua incorporação (parcial ou total) ao mesmo, deixando-o mais exposto à ação erosiva da chuva e da enxurrada e favorecendo a erosão hídrica pluvial (Wischmeier, 1973; Cogo, 1981).

Os solos que apresentam grande rugosidade superficial irão manter por mais tempo e melhor as suas capacidades de retenção e infiltração superficiais de água, comparados aos solos com pouca ou mínima rugosidade (superfície praticamente lisa). Isto acontece porque o fenômeno do selamento superficial predominantemente ocorre nas microdepressões das superfícies rugosas e em praticamente toda a extensão das superfícies lisas (Larson, 1973). Por esta razão é que a cobertura por resíduos culturais tem grande importância junto ao papel desempenhado pela rugosidade superficial no que se refere à redução

da erosão hídrica pluvial, pois ao mesmo tempo em que ela protege a superfície do solo contra a ação direta do impacto das gotas da chuva, mantém melhor e prolonga por mais tempo a rugosidade superficial. Esses fatos irão reduzir tanto a desagregação inicial das partículas do solo pela ação da chuva quanto o transporte das partículas desagregadas pela ação da enxurrada, o que vai se refletir em aumento da retenção e infiltração superficiais de água, diminuição do escoamento superficial e deposição dos sedimentos da erosão (Wischmeier, 1973; Cogo, 1981; Lopes et al., 1987; Bertol et al., 1989). A interação rugosidade superficial do solo-cobertura por resíduos culturais na diminuição das perdas de solo e água por erosão hídrica pluvial também tem sido examinada (Burwell et al., 1966; Cogo, 1981; Norton et al., 1985; Bertol et al., 1987). Esses autores observaram maior efeito da rugosidade superficial do solo na redução da erosão hídrica pluvial em condições de pouca cobertura por resíduos culturais, argumentando que, em condições de muita cobertura, o referido efeito é substancialmente ocultado. Não obstante isso, a presença de rugosidade na superfície do solo deve ser um quesito a ser tentado alcançar sempre nas lavouras agrícolas, tendo em vista a eficaz redução de ambas, perda de água e perda de solo por erosão hídrica pluvial pela mesma. Assim, torna-se um desafio constante para os pesquisadores de erosão e conservação do solo e da água investigar formas de preparo do solo que combinem em grau adequado a presença tanto de rugosidade quanto de cobertura por resíduo cultural na superfície do solo, dado o grande efeito de ambas na redução da erosão hídrica pluvial nas áreas agrícolas.

No que se refere às condições físicas internas ou subsuperficiais do solo e sua influência no processo de erosão hídrica pluvial, as que mais se destacam são a quantidade total, o tamanho e a distribuição de tamanho de poros e a estabilidade dos seus agregados em água. Essas propriedades, entretanto, são muito influenciadas pela atividade microbiana do solo e pela biomassa subterrânea ou raízes (vivas e mortas) das plantas que nele estão crescendo, de modo que, no conjunto, todas causam melhoria na estrutura do solo, como o favorecimento tanto da retenção e infiltração superficiais de água quanto do movimento desta no seu interior e o aumento da sua resistência à ação erosiva, o que irá repercutir em menor escoamento superficial e menor erosão (Zhang et al., 2007; Volk et al., 2004; Volk & Cogo, 2008; Portela,

2009). O grau com que essas condições físicas internas ou subsuperficiais do solo afetam a sua erosão hídrica pluvial, entretanto, é dependente do tempo e história de uso e manejo do mesmo, mas principalmente do método empregado no seu preparo a cada ciclo cultural. Métodos de preparo intensos, tais como aração seguida de gradagem (uma ou mais operações), especialmente se realizados com frequência e sob condições de alta umidade, poderão compactar o solo e formar camadas restritivas ao movimento de água. Além disso, a incorporação dos resíduos culturais ao solo acelera a decomposição da matéria orgânica e a excessiva mobilização do solo por demais fragmenta seus agregados, tornando-os menos estáveis à ação da água e, por conseguinte, criando uma condição mais favorável para a desagregação e o transporte do solo no processo erosivo, podendo levar o mesmo à severa degradação física e, em consequência, perda expressiva da sua capacidade produtiva. Por sua vez, os métodos de preparo que recorrem ao uso de equipamentos como o escarificador, associado ou não à passagem de grade após a operação com o mesmo ter sido realizada, ou mesmo a ausência de preparo, como ocorre quando se usa a técnica de semeadura direta, favorecem o aporte de matéria orgânica ao solo, o que é muito positivo do ponto de vista de agregação e de desenvolvimento global da sua estrutura, tornando os agregados mais resistentes à ação da água e, por conseguinte, mantendo melhor a conectividade dos poros, o que irá favorecer a infiltração superficial de água e o seu movimento no perfil do solo (Li et al., 2007; Zhang et al., 2007). É importante ainda dizer que as condições físicas de subsuperfície do solo que vão ao encontro da diminuição do escoamento superficial, por conseguinte da erosão, vão ao encontro também do melhor crescimento inicial e desenvolvimento posterior das plantas.

Em função do exposto, verifica-se que a busca de métodos de preparo do solo e de sistemas de cultivo que visem construir um meio poroso estável ou uma estrutura de solo bem formada, para permitir a livre passagem da água da chuva e, ao mesmo tempo, resistir mais e melhor à ação dos agentes de erosão hídrica pluvial, constitui o principal objetivo dos sistemas de produção agrícola que visam o uso sustentável da água e do solo.

2.5. Influência do tipo, quantidade e forma de manejo dos resíduos culturais na erosão hídrica pluvial do solo

A influência do tipo, quantidade e forma de manejo dos resíduos culturais na erosão hídrica pluvial do solo é primeiramente sentida na quantidade de energia cinética da chuva que pode ser dissipada ou diminuída no processo, o que irá se refletir em maior ou menor desagregação das suas partículas e na formação ou não de selos e/ou crostas superficiais. Num segundo momento, a influência referida é sentida na velocidade da enxurrada, tendo em vista que os resíduos culturais superficiais agem como barreira física ao livre movimento da mesma, o que irá reduzir sua tensão cisalhante e, ao mesmo tempo, induzir deposição dos sedimentos da erosão no local de ocorrência do fenômeno (Alberts & Neibling, 1994; Unger, 1996). Quando os resíduos culturais são parciais ou totalmente incorporados ao solo, como acontece quando são usados, respectivamente, o preparo reduzido e o preparo convencional, seu efeito na redução da erosão hídrica se faz sentir por meio das condições físicas internas ou subsuperficiais do solo modificadas por eles, conforme visto anteriormente. Cabe ressaltar aqui que expressiva parte do efeito dos resíduos culturais na redução da erosão se faz sentir também por meio da melhor agregação do solo (Tisdall & Oades, 1984), aumentando a estabilidade dos seus agregados e o valor da relação macroporos/microporos.

O grau de agregação do solo irá depender de vários fatores, um deles de grande importância sendo a relação C:N do resíduo cultural. Assim, as gramíneas, de modo geral, apresentam valor da relação C:N maior do que as leguminosas, o que irá influenciar de modo diferente a taxa de decomposição dos seus resíduos culturais. Além disso, o sistema radicular das plantas também exerce forte influência na agregação e na estrutura global do solo, por conseguinte na erosão hídrica pluvial, por afetar ambas, a capacidade de infiltração de água do solo e a sua resistência ao processo erosivo. As espécies de leguminosas favorecem a infiltração de água no solo por apresentarem sistema radicular pivotante, enquanto que as gramíneas aumentam a resistência do solo à ação desagregadora de suas partículas pelos agentes erosivos em função da sua alta densidade radicular, embora com raízes mais finas do que as das leguminosas (Silva, 1993; Campos et al., 1999). Diante disso, verifica-se a importância de se usar no processo de

produção vegetal seqüências e/ou rotações culturais que contemplem espécies de gramíneas e leguminosas, de modo a se poder beneficiar de ambas no que se refere à melhoria da estrutura do solo, criando condições favoráveis tanto ao crescimento inicial e posterior desenvolvimento das plantas quanto ao controle do processo de erosão hídrica pluvial.

No que se refere à forma de manejo dos resíduos culturais, quando deixados na superfície do solo eles diretamente interceptarão a água da chuva. Assim, sob condições de baixa quantidade e intensidade de chuva, os resíduos culturais podem, por si só, substancialmente reduzir o escoamento superficial e a erosão. A quantidade total de chuva interceptada irá depender da morfologia ou tipo de resíduo cultural, especialmente sua densidade e o diâmetro dos colmos (Mohamoud & Ewing, 1990). Além disso, a presença de resíduos culturais na superfície do solo se reveste de importância por evitar ou reduzir a formação de selos e/ou crostas superficiais, favorecendo a infiltração de água no solo (Duley, 1939), sendo que esse efeito também é influenciado pela quantidade e equivalente percentagem de cobertura dos referidos materiais (Alberts & Neibling, 1994). Em adição a esses efeitos, os resíduos culturais formam rugosidade hidráulica, a qual é somada à da superfície do solo, devido ao seu microrelevo, e dessa forma também influenciam a velocidade, a espessura e a taxa de descarga da enxurrada (Gilley et. al., 1986 e 1987). Em geral, ocorre redução nos valores de velocidade e de taxa de descarga da enxurrada quando a quantidade de resíduos culturais na superfície do solo aumenta. Esse mesmo efeito também é observado no que se refere à deposição dos sedimentos da erosão, em função da redução da capacidade de transporte do escoamento superficial. Em relação à distribuição de tamanho dos sedimentos erodidos, verifica-se redução dos mesmos à medida que a quantidade de resíduos culturais na superfície do solo aumenta (Alberts & Neibling, 1994; Cogo et al., 1983). Assim, pode-se dizer que, de modo geral, as perdas totais de água e solo serão diminuídas com o aumento da quantidade de resíduos culturais deixada na superfície do solo. Entretanto, a redução da perda total de água da chuva na forma de enxurrada está condicionada também à presença de rugosidade superficial no solo, conforme discutido anteriormente em outro item desta revisão bibliográfica.

2.6. Perda de eficácia relativa de redução da erosão hídrica pluvial pelos resíduos culturais nos métodos conservacionistas de preparo do solo

Existem limites de comprimento de declive nas lavouras além dos quais os danos causados pelo rompimento cumulativo dos sulcos e camalhões em contorno, resultantes das operações de preparo do solo e/ou semeadura das culturas, ultrapassam os benefícios dessa prática no que se refere ao controle da erosão hídrica pluvial do solo. De modo análogo, Wischmeier (1973) chamou a atenção para o fato de que existem limites de comprimento de declive no terreno além dos quais a eficácia da cobertura do solo por resíduos culturais na redução da erosão hídrica pluvial nos preparos conservacionistas diminui, até um ponto onde os valores do Fator C - cobertura e manejo do solo da Equação Universal de Perda de Solo – EUPS (“Universal Soil Loss Equation - USLE” – Wischmeier & Smith, 1978), derivados com base na tradicional razão de perda de solo, não mais são aplicáveis. E, nesse contexto, sabe-se que o aumento no comprimento do declive, cujo efeito na erosão é refletido na equação recém-referida por um valor do fator L mais elevado, irá se refletir em aumento do escoamento superficial ou enxurrada, que é o alvo principal no cálculo de espaçamento entre terraços nas lavouras agrícolas. Quando o escoamento superficial atinge uma tensão cisalhante crítica capaz de superar a tensão crítica de cisalhamento do solo e/ou do resíduo cultural que se encontra na sua superfície, irá ocorrer aumento na erosão, devido ao movimento ou, mesmo, deslocamento distante do resíduo cultural, estabelecendo-se, então, um comprimento crítico de declive no terreno, no que se refere à redução da perda de solo por erosão hídrica pluvial nos preparos conservacionistas de solo (Cogo, 1981; Foster et al, 1982a, b; Bertol, 1995; Bertol et al., 1997; Morais, 1999; Morais & Cogo, 2001). O critério de constatação da falha do resíduo cultural, entretanto, para se poder determinar o aludido comprimento crítico de declive no terreno, não leva em consideração o conceito de tolerância de perda de solo por erosão para fins de manutenção da capacidade produtiva do solo para as culturas, vinculado à equação de predição da erosão que vem sendo referida (EUPS/“USLE”). Assim, a perda de solo a partir da distância ou do ponto no terreno onde foi constatada falha do resíduo cultural, poderá ser maior ou menor do que a perda de solo definida pelo conceito de tolerância recém-

exposto. Essa falha apenas indica que houve perda (em algum grau, não totalmente ou completa) da eficácia relativa dos resíduos culturais na redução da erosão, com conseqüente aumento na taxa de perda de solo a partir do ponto de falha (Foster et al., 1982a, b). Devido a essa ocorrência, os valores usuais do Fator C - cobertura e manejo do solo do modelo EUPS/"USLE", derivados com base na tradicional razão de perda de solo, em princípio devem ser aumentados, para adequadamente se predizer a perda de solo sobre a extensão de terreno situada abaixo do ponto de falha dos resíduos culturais, nos preparos conservacionistas de solo.

Métodos conservacionistas de preparo do solo de modo geral apresentam grandes índices de rugosidade e/ou cobertura superficiais, entretanto o resultado final vai depender do método específico de preparo. Por exemplo, a técnica de semeadura direta/plantio direto, quando estabelecida e conduzida conforme os quesitos que a determinaram e recomendaram, sempre irá apresentar grande cobertura por resíduos culturais, porém pequena rugosidade superficial. Desta forma, nos métodos conservacionistas de preparo do solo o comprimento crítico de declive em consideração aumentará na medida em que a sua cobertura e rugosidade superficiais aumentarem. Existe ainda uma relação bastante estreita entre o aumento da rugosidade superficial do solo induzida pelas operações de seu preparo e/ou de semeadura das culturas e a redução da erosão hídrica e do escoamento superficial a ela associado, implicando menor falha ou movimentação/deslocamento dos resíduos superficiais em tais situações (Cogo, 1981). Resíduos ancorados (semi-incorporados ao solo) controlam a erosão hídrica pluvial melhor do que resíduos não-ancorados (não-incorporados ou soltos sobre a superfície do solo), para a mesma quantidade e equivalente percentagem de cobertura do solo pelos mesmos. Resíduos semi-incorporados e superfícies rugosas diminuem a possibilidade do resíduo flutuar no fluxo de enxurrada, aumentando a tensão cisalhante desta última necessária para movimentar ou deslocar os resíduos (Foster, 1982a). O aumento na susceptibilidade do solo à erosão em sulcos, normalmente vinculado ao seu preparo (além da influência do tipo de solo em si), poderá parcial ou totalmente anular os benefícios proporcionados pela incorporação parcial dos resíduos culturais ao mesmo, facilitando sua movimentação e deslocamento pela enxurrada.

2.7. Indicadores do ponto de falha ou movimentação e deslocamento dos resíduos culturais

Segundo Foster et al. (1982a), existem duas formas principais as quais podem ser lançadas mãos para se detectar o processo de falha ou movimentação e deslocamento dos resíduos culturais nas lavouras agrícolas conduzidas sob preparos conservacionistas de solo, assim caracterizadas: observação visual a campo e emprego de relações teóricas de erosão.

2.7.1. Observação visual a campo

Esse critério para se detectar o ponto de falha dos resíduos culturais nos métodos conservacionistas de preparo do solo essencialmente baseia-se na observação visual feita a campo, sob as condições reais de estabelecimento e condução das lavouras agrícolas. Assim, Foster et al. (1982a) reportam três modos principais de falha dos resíduos culturais sob esse critério, observando colmos de milho picados e não-ancorados (soltos sobre a superfície do solo), como segue:

a) remoção peça por peça – observado para baixas doses do resíduo cultural (até 2.000 kg ha^{-1});

b) remoção em massa – o resíduo flutua na enxurrada, deslocando-se em massa (seção de 1 m ou mais de largura) no sentido da pendente do terreno (observado para doses do resíduo maiores do que 4.000 kg ha^{-1}), e

c) entalhamento ou sulcamento do solo (erosão em sulco) por baixo do resíduo cultural (vai depender da susceptibilidade do solo à erosão em sulco e do tempo transcorrido desde o último preparo do solo).

O critério para se detectar falha dos resíduos culturais como particularizado acima, entretanto, é um tanto quanto subjetivo. Por esta razão, para se lograr maior segurança no assunto, os dados de perda de solo e taxa de descarga da enxurrada podem ser adicionalmente examinados para o propósito em questão, por meio do emprego de relações teóricas, estabelecidas com base em teorias e conceitos desenvolvidos em estudos de mecânica da erosão hídrica pluvial do solo, conforme será abordado a seguir.

2.7.2. Relações teóricas de erosão

Paralelamente à observação visual de campo, apresentada e discutida no item anterior, teorias de erosão também devem ser utilizadas na análise dos dados de perda de solo e taxa de descarga da enxurrada para confirmar ou não a detecção da falha dos resíduos culturais nas lavouras agrícolas estabelecidas e conduzidas utilizando métodos conservacionistas de preparo do solo. Assim, Foster et al. (1982a, b) desenvolveram equações básicas e teorias no assunto, as quais serão apresentadas e discutidas a seguir.

2.7.2.1. Taxa de erosão versus taxa de descarga da enxurrada

A taxa de erosão em um dado ponto no terreno está relacionada com os coeficientes de erodibilidade do solo nos sulcos e nos entressulcos, os quais dependem do tipo de solo e da inclinação do declive, com os fatores cobertura e manejo do solo nos sulcos e nos entressulcos, com a taxa de enxurrada, com o comprimento do declive e com a intensidade da chuva, da seguinte forma:

$$D = (K_r \cdot C_r \cdot q \cdot x) + (K_i \cdot C_i \cdot i^2) \quad [1]$$

onde:

D=taxa de erosão em um dado ponto no terreno ($M L^{-2} T^{-1}$);

K_r e K_i = coeficientes de erodibilidade que dependem do tipo de solo e do grau de declividade, respectivamente para as áreas de sulcos e entressulcos;

q =taxa do excesso de precipitação (intensidade da chuva menos taxa de infiltração de água no solo) ($L T^{-1}$);

x =comprimento do declive (L);

i =intensidade da chuva ($L T^{-1}$), e

C_r e C_i =fatores cobertura e manejo do solo para a erosão em sulcos e em entressulcos, respectivamente.

O primeiro termo da equação acima representa a forma ou área da erosão em sulcos, e o segundo a forma ou área da erosão em entressulcos, que são calculadas de forma independente. Os fatores C_r e C_i primariamente dependem da cobertura superficial do solo.

A equação da continuidade para erosão no estado de equilíbrio da enxurrada, de acordo com Foster & Meyer (1972), é representada da seguinte

forma:

$$G = \int D dx \quad [2]$$

onde, G=carga de sedimentos ($M L^{-1} T^{-1}$).

A equação [2] é apresentada como a equação que governa o processo de erosão. Pelas equações [1] e [2] obtém-se a produção de sedimentos numa dada parcela (G_p), considerando o comprimento de declive simulado entre as extremidades superior (X_s) e inferior (X_i) da parcela representada pela seguinte equação:

$$G_p = K_r C_r q (X_i^2 - X_s^2)/2 + K_i C_i i^2 (X_i - X_s) \quad [3]$$

Como a taxa de descarga no ponto médio da parcela (q_m) é $q (X_i + X_s)/2$, e $X_i^2 - X_s^2 = (X_i + X_s) \cdot (X_i - X_s)$, a equação [3] pode ser reescrita da seguinte forma:

$$G_p = \Delta X \cdot (K_r C_r q_m + K_i C_i i^2) \quad [4]$$

onde: ΔX é o comprimento da parcela experimental ($X_i - X_s$), dentro do qual é simulado o comprimento do declive.

A taxa média de erosão da parcela (D_p) é obtida dividindo-se a carga de sedimentos da parcela (G_p) pelo seu comprimento (ΔX), resultando em:

$$D_p = (K_r \cdot C_r \cdot q_m) + (K_i \cdot C_i \cdot i^2) \quad [5]$$

Assumindo que K_r , K_i , C_r , C_i e i são independentes de q_m , a taxa média de erosão da parcela (D_p) irá variar linearmente com a taxa de descarga no ponto médio da parcela (q_m), enquanto não ocorrer falha do resíduo, ou seja:

$$D_p = K_r \cdot C_r \cdot q_m + C_2 \quad [6]$$

onde C_2 representa a erosão em entressulcos (K_i , C_i , i). Experimentalmente, a taxa média de erosão (D_p) da parcela representa a erosão do último segmento de um declive mais longo, simulado. A constante C_2 parte da suposição de que os coeficientes K_r , K_i , C_r e C_i e a intensidade i são independentes de q_m . Desta forma, D_p varia linearmente com q_m , sendo C_2 o coeficiente linear e o termo $K_r C_r$ o coeficiente angular, da relação. Fisicamente, isto representa que a erosão em entressulcos (C_2) permanece praticamente constante mesmo

após a falha dos resíduos culturais, pois a cobertura superficial não é removida neste local e sim na região de sulcos onde o fluxo se concentra, conseqüentemente aumentando a erosão em sulcos.

A partir destas equações básicas, os mesmos autores desenvolveram critérios teóricos para confirmar ou não a falha do resíduo, baseados no ponto de inflexão da reta que relaciona as variáveis, mais especificamente, taxa de erosão, concentração de sedimentos e velocidade da enxurrada com a taxa de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela.

A relação entre taxa de erosão e taxa de descarga da enxurrada é expressa da seguinte forma (Foster et al., 1982a):

$$dD_p/dq_m = K_r C_r \quad [7]$$

onde:

dD_p = taxa de erosão ($M L^{-2} T^{-1}$);

dq_m = taxa de descarga no ponto médio da parcela ($L^3 T^{-1} L^{-1}$);

K_r = fator erodibilidade do solo na região em sulcos;

C_r = fator cobertura e manejo do solo na região em sulcos.

Quando ocorre falha do resíduo cultural, ocorre aumento em C_r , o que irá alterar a declividade da reta $D_p \times q_m$ (coeficiente angular da relação), pois, aumenta a erosão em sulcos. A falha abrupta e completa do resíduo é rara, entretanto, e o aumento na taxa de erosão vai depender da magnitude da erosão em sulco que está ocorrendo na superfície do solo naquele momento, a partir do ponto de falha. Em tal situação, pode também ocorrer aprisionamento dos sedimentos da erosão na palha que ficou ancorada ou presa na superfície do solo, o que, adicionalmente, irá influenciar a relação em consideração.

2.7.2.2. Concentração de sedimentos na enxurrada versus taxa de descarga da enxurrada

A segunda indicação de falha do resíduo pode ser dada pela relação entre concentração de sedimentos na enxurrada e taxa de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela, da seguinte forma:

$$c = K_r C_r + C_2 / q_m \quad [8]$$

onde:

c = concentração de sedimentos na enxurrada ($M M^{-1}$),

$K_r C_r$ = erodibilidade e fator cobertura e manejo do solo na região em sulcos;

C_2 = forma de erosão na região em entressulcos;

q_m = taxa de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela ($L^3 L^{-1} T^{-1}$).

Enquanto não ocorrer falha do resíduo cultural, a concentração de sedimentos na enxurrada (c) diminui com o aumento da taxa de descarga da mesma (q_m); após a ocorrência da falha, entretanto, C_r e c aumentam, invalidando a relação apresentada pela equação [8].

2.7.2.3. Velocidade da enxurrada versus sua taxa de descarga

A relação entre velocidade da enxurrada e taxa de descarga da mesma (baseada em equação utilizada para a maior parte dos canais fixos, também segundo Foster et al., 1982), é da seguinte forma:

$$v = a q_m^b s^d \quad [9]$$

onde:

v = velocidade da enxurrada ($L T^{-1}$);

s = seno do ângulo do declive longitudinal ao canal (L);

q_m = taxa de descarga no ponto médio da parcela ($L^3 L^{-1} T^{-1}$)

a, b, d = coeficientes de ajuste, provindos da análise de regressão (adimensionais).

A relação acima é válida para a maioria dos canais fixos, com o gráfico log-log da mesma resultando em uma reta, com declividade igual ao expoente b . Após a ocorrência da falha do resíduo cultural, ocorre aumento na declividade da reta (valor de b) ou ela sofre uma mudança ou um salto brusco, devido à mudança de valor do coeficiente a , ou ambos os efeitos. O expoente d

representa a inclinação da linha da água, notadamente sendo fonte de energia no processo, em função da declividade do terreno. Entretanto, apesar de também ser um indicativo válido de ocorrência de falha do resíduo cultural, essa relação não foi utilizada, tendo em vista à dificuldade de se medir a velocidade da enxurrada nas condições de realização da presente pesquisa, especialmente devido à presença de resíduos culturais na superfície do solo nos tratamentos estudados.

2.8. Limites críticos de comprimento de declive observados a campo para a eficácia máxima de redução da erosão hídrica pelos resíduos culturais nos preparos conservacionistas de solo

A metodologia comumente utilizada na determinação de limites críticos de comprimento de declive para manutenção da eficácia máxima de redução da erosão hídrica pluvial por meio dos resíduos culturais nos preparos conservacionistas de solo consiste no estabelecimento de parcelas experimentais a campo, sobre as quais são aplicadas chuvas simuladas de intensidade constante, concomitantemente à adição de níveis crescentes de fluxo extra (água limpa) nas suas cabeceiras, com o propósito de simular comprimentos de declive também crescentes. Com base em observações de campo e escassos dados de pesquisa, Meyer & Ports (1976) sugeriram comprimentos críticos de declive para locais de construção civil, em declividades de solo variando de 0,01 a 0,5 m m⁻¹, incluindo palha de trigo e alguns outros tipos de material de cobertura superficial. Os autores mencionados encontraram que, na condição com a palha de trigo (doses de 2,2 a 4,5 t ha⁻¹), tais comprimentos críticos de declive variaram de 11 a 122 m. Já Laflen et al. (1978) observaram falha do resíduo cultural apenas no preparo de solo (caráter conservacionista) denominado de “till plant”, entre alguns outros tipos de preparo investigados, para o resíduo cultural de milho, porém os autores não estabeleceram um comprimento crítico de declive, pois a falha do resíduo observada no campo, não foi suficiente para alterar a relação entre taxa de erosão e a taxa de descarga. Deve-se ressaltar, entretanto, que o comprimento máximo de declive simulado pelos últimos autores foi de 50 m,

distância esta relativamente curta quando comparada com as extensões de declive existentes nas lavouras.

Em trabalho realizado nos Estados Unidos da América, Foster et al. (1982a) utilizaram colmos de milho em solo não-preparado e palha normal de trigo em solo preparado, ambos soltos ou não-ancorados, observando comprimentos críticos de declive variando de 45 a 200 m nos solos não suscetíveis à erosão em sulco e de 40 a 150 m nos solos suscetíveis à mesma, dependendo da taxa do resíduo cultural (0,22 a 0,90 kg m⁻²) e do gradiente do declive (0,06 a 0,092 m m⁻¹). Já Cogo (1981) simulou comprimentos de declive de, até, 135 m, nos preparos de solo escarificação (“chisel plow” com ponteiros do tipo “sweep” ou asa-de-andorinha) e sem preparo ou semeadura direta, não tendo observado comprimento crítico de declive com o tipo de resíduo cultural utilizado (palha normal de trigo), trabalho este também desenvolvido nos Estados Unidos da América, em solo com declividade de 0,065 m m⁻¹. No Brasil, Bertol (1995) realizou um estudo semelhante ao do último autor referido, em Eldorado do Sul (RS), em um Argissolo Vermelho Amarelo com declividade média de 0,066 m m⁻¹, utilizando resíduos culturais de milho e trigo não-ancorados e os métodos de preparo do solo escarificação e sem preparo ou semeadura direta. O autor mencionado encontrou comprimentos críticos de declive variando de 106 a 483 m na semeadura direta e de 143 a 267 m na escarificação. No mesmo local e utilizando o mesmo tipo de solo como os do último autor, Morais (1999) também observou ocorrência de falha dos resíduos culturais de milho, soja e aveia-preta no método de semeadura direta, destacando que o ponto da mesma (comprimento crítico de declive) variou com o tipo, quantidade e forma de manejo dos resíduos culturais. Os comprimentos críticos de declive encontrados por esse autor, sob semeadura direta, foram de 107 a 138 m para o resíduo cultural de milho, 91 a 109 m para o resíduo cultural de soja e de 99 a 110 m, para o resíduo cultural de aveia-preta. Ainda neste trabalho, foram encontrados comprimentos críticos de 29 a 58 m e de 33 a 63 m, para o resíduo cultural de soja, semi-decomposto solto e parcialmente ancorado na superfície do solo, respectivamente. Segundo o autor em pauta, o critério da observação visual a campo e o da relação teórica da taxa de erosão com a taxa de descarga da enxurrada foram os melhores indicadores no que

se refere à identificação do ponto de falha dos resíduos culturais no seu estudo.

Não obstante os dados importantes relatados acima, eles são por demais escassos para serem usados com segurança, principalmente em se tratando da sua extrapolação para outros locais e outros tipos de solo, tendo em vista a complexidade das inter-relações envolvidas. Por esta razão, planejou-se e realizou-se esta pesquisa em outro local (Lages, SC) e em outro tipo de solo (Nitossolo Bruno Aluminoférrico húmico), com o propósito de obter mais e melhores informações sobre o assunto e, assim, poder enriquecer o mesmo, para, num futuro próximo, se poder planejar melhor as lavouras agrícolas intencionadas de serem estabelecidas e conduzidas sob métodos conservacionistas de preparo do solo. Certamente, ao se alcançar isto, não só se estará conservando melhor a água e o solo sobre as áreas agrícolas, como também se estará preservando o ambiente em bem maior grau.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Esclarecimento inicial

Para fins de elaboração deste trabalho, a pesquisa sendo narrada, embora planejada para constituir uma só investigação, em uma só área experimental (envolvendo dois experimentos, entretanto), como de fato foi, devido a problemas ocorridos com o equipamento de suprimento de água aos fluxos extras em um dos experimentos (o com o uso do resíduo cultural de aveia preta), o que anulou os resultados para o fim principal almejado com eles (simulação de comprimentos de declive para fins de controle da erosão hídrica por meio do referido resíduo cultural), foi dividida em duas partes, com enfoques distintos em cada uma delas, assim caracterizadas: a) Parte 1 – investigação de modos de execução da operação de semeadura da técnica de semeadura direta (sem e com hastes sulcadoras ou facões conectados à máquina semeadora-adubadora utilizada para tal), usando diferentes tipos e quantidades de resíduo cultural (aveia preta e milho, nas dosagens de toda, metade e um quarto da quantidade total produzida de cada um deles), avaliados sob a aplicação somente de chuva simulada e com o foco principal direcionado às perdas totais finais de solo e água por erosão hídrica e alguns parâmetros a elas relacionados, e b) Parte 2 – mesma investigação como na Parte 1, porém usando apenas com o resíduo cultural de milho e (a grande diferença entre as duas partes da pesquisa) com a adição de níveis crescentes de fluxo extra de água (limpa ou isenta de sólidos) na cabeceira das parcelas experimentais, concomitantemente à aplicação de chuva simulada, com a finalidade de simular comprimentos de declive, cada vez, maiores, para averiguar o processo de falha do referido resíduo cultural ou a existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo, para fins de controle da

erosão hídrica com o referido resíduo. Não obstante isso, a descrição do material e métodos da pesquisa será uma só, tendo em vista que as atividades desenvolvidas e os procedimentos de campo e laboratório usados na mesma ocorreram de forma contínua no tempo e no espaço, seguindo uma dada regularidade de ações, dentro do cronograma estabelecido. Passar-se-á, pois, a descrição do material e métodos, válida para as duas partes da pesquisa.

3.2. Localização e solo da área experimental

A área experimental onde foi realizada a presente pesquisa situa-se no Centro de Educação Profissionalizante – CEDUP - do Colégio Agrícola Caetano Costa, localizado no km 25 da rodovia BR 282, município de São José do Cerrito (SC), entre as coordenadas geográficas de 28° 55' de latitude sul e 51° 08' de longitude oeste (Greenwich). O período experimental como um todo abrangeu três anos e três meses, tendo iniciado em março de 2006 e finalizado em junho de 2009, com os testes de erosão a campo tendo sido realizados em dezembro de 2008 e em junho de 2009. O referido colégio agrícola situa-se na região fisiográfica do Planalto Sul-Catarinense, na microrregião dos Campos de Lages, apresentando relevo ondulado a fortemente ondulado. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfb – mesotérmico úmido com verão ameno. A temperatura e a precipitação pluvial média anual são de, respectivamente, 21° C e 1.600 mm (CIASC, 2007).

O solo da área experimental encontra-se classificado como um Nitossolo Bruno Aluminoférrico húmico (Embrapa, 2006), possuindo na camada superficial os seguintes valores de alguns dos seus atributos: 665 g kg⁻¹ de argila, 223 g kg⁻¹ de silte e 112 g kg⁻¹ de areia (textura muito argilosa); 32,01 g kg⁻¹ de carbono orgânico; 1,3 mg dm⁻³ de fósforo; 60 mg dm⁻³ de potássio; densidade de partículas igual a 2,51 Mg m⁻³; densidade do solo igual a 1,07 Mg m⁻³ e volume de macroporos e de microporos iguais a 0,19 e 0,40, m³ m⁻³, respectivamente, além de profundidade efetiva moderada e declividade média de 0,16 m m⁻¹. Esse solo representa aproximadamente 16% da área do estado de Santa Catarina, e maiores informações sobre as características e propriedades físicas e químicas do mesmo podem ser vistas no apêndice 1, enquanto que uma vista do seu perfil e de alguns aspectos físicos da área experimental é fornecida na figura 1.



FIGURA 1. Vista da trincheira aberta no solo (a) da área experimental (b), em dada época de condução de um dos seus experimentos, no caso com a cultura da aveia preta em estágio avançado de desenvolvimento vegetativo.

3.3. Histórico da área experimental

O experimento foi iniciado em março de 2006, arando-se (uma vez) e gradeando-se (duas vezes, uma operação seguida da outra) a área experimental, em toda sua extensão, ao mesmo tempo em que incorporando calcário e adubos ao solo, com o propósito de deixá-la o mais uniforme possível, dos pontos de vista tanto químico quanto físico. Cerca de um mês e meio mais tarde, em meados de abril de 2006, foi dado início ao cultivo do solo na área experimental propriamente dito, usando-se a aveia preta (*Avena strigosa* spp) no ciclo cultural de outono-inverno e o milho (*Zea mays* L.) no ciclo cultural de primavera-verão. Assim, o primeiro ciclo cultural do experimento foi estabelecido sob preparo convencional, enquanto que os seguintes, e até o final do período experimental, sob semeadura direta. Os tratamentos culturais usados na pesquisa consistiram do controle químico de plantas invasoras e de pragas, o que foi feito por meio da aplicação de herbicidas e de inseticidas, bem como do suprimento de adubação química de base e de cobertura, conforme recomendações da CQFS-RS/SC (2004), de modo a garantir o crescimento inicial e desenvolvimento posterior das culturas. Na cultura do milho (híbrido simples As 32) foram aplicados 300 kg ha^{-1} de adubo à base de NPK, como adubação básica (fórmula 5-25-25), e 80 kg ha^{-1} de nitrogênio, esta última tendo sido efetuada ao redor de quarenta dias após a semeadura da cultura, usando-se o produto comercial uréia. Para o controle da

lagarta do cartucho do milho, aplicou-se o produto metamidafos, na dosagem recomendada pelo fabricante, enquanto que para o controle de plantas invasoras, aplicou-se o herbicida (seletivo) nicosulfuron, na dose de 3 L ha⁻¹. Para a cultura da aveia preta, implantada como se fosse para fins forrageiros, foi usada a mesma formulação e a mesma quantidade de adubo de base usada no milho, adicionada da aplicação de 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio (produto comercial uréia) como adubação de cobertura, ao redor de quarenta e cinco dias após a semeadura. Ao todo, houveram seis ciclos culturais no período experimental, desde o seu início (março de 2006) até o seu final (maio de 2009), totalizando um período de três anos e três meses de uso do solo com as culturas usadas na pesquisa, cujos maiores detalhes serão dados a seguir.

3.4. Natureza da pesquisa, aparelho simulador de chuva, intensidade e duração das chuvas simuladas, unidade experimental e níveis de fluxo extra de água usados na mesma

A pesquisa foi realizada nas condições reais de campo, porém usando chuva artificial ou simulada. Para isso, utilizou-se o aparelho simulador de chuva de braços rotativos (Swanson, 1965), com as chuvas tendo sido aplicadas na intensidade constante de 75 mm h⁻¹ e com duração variável - até a enxurrada atingir sua condição de equilíbrio ou taxa constante de descarga, para fins de elaboração da primeira parte do estudo (avaliação das perdas totais finais de solo e água por erosão em condições normais – sob a ação somente de chuva), prolongada, sem interrupção, de uma hora, para fins de elaboração da segunda parte do estudo (avaliação das taxas de perda de solo e água por erosão em condições especiais – sob a ação de chuva mais fluxos extras de água, os quais foram adicionados às parcelas experimentais para simular a entrada de enxurrada nas suas cabeceiras, provinda de declives com comprimentos, cada vez, maiores). Assim, a amplitude de variação na duração das chuvas, no primeiro estudo (aplicação somente de chuva), foi de 75 a 120 minutos, enquanto que, no segundo estudo (aplicação de chuva e de fluxos extras de água), foi de 135 a 180 minutos.

A unidade experimental da pesquisa foi constituída da tradicional parcela de erosão para estudos do fenômeno com chuva artificial ou simulada em condições de campo, possuindo 3,5 m de largura por 11,0 m de comprimento,

com a maior dimensão tendo sido disposta no sentido do declive do terreno, delimitada nas laterais e porção superior por chapas galvanizadas, com 2,0 m de comprimento e 0,2 m de altura cada uma, cravadas 0,1 m no solo, e possuindo na sua porção inferior uma calha especial para coleta da enxurrada, confeccionada também com chapa galvanizada. Uma vista do aparelho simulador de chuva e de uma das unidades experimentais usadas na pesquisa é fornecida na figura 2.



(a)

(b)

FIGURA 2. Vista do aparelho simulador de chuva aspergindo água concomitantemente em duas unidades experimentais (a) e de uma destas com o resíduo cultural de aveia preta uniformemente espalhado na superfície do solo antes da aplicação da chuva (b).

Após a enxurrada ter atingido sua condição de equilíbrio ou taxa constante de descarga, e sem interrupção da chuva, deu-se início a adição dos fluxos extras de água (limpa, proveniente de um pequeno riacho localizado próximo à área de estudo) na cabeceira das parcelas experimentais, em níveis crescentes, com a finalidade de simular comprimentos de declive, cada vez, maiores, com vistas à elaboração do segundo parte da pesquisa (averiguação do processo de falha do resíduo cultural ou da existência de limites críticos de comprimento de declive para fins de controle da erosão hídrica pelo mesmo).

Os níveis de fluxo extra de água foram em número de seis (06), tendo sido aplicados por meio de um conjunto de equipamentos (moto-bomba, canos plásticos, registros de entrada e saída de água e manômetros), por um período de tempo de dez minutos cada um, o que fez mais uma hora de chuva simulada, concomitante à adição dos fluxos extras de água. O procedimento

básico usado na aplicação desses fluxos extras foi o mesmo usado e descrito por Bertol (1995) e por Moraes (1999), em seus estudos, com algum detalhamento do que foi feito neste estudo podendo ser visto na figura 3. Na fase de elaboração do projeto de pesquisa planejaram-se dez (10) níveis de fluxo extra de água a serem usados na mesma, de modo a ter sucessivos comprimentos equivalentes de declive relativamente curtos ou intervalos de classe relativamente estreitos (de 50 em 50 m), até a extensão total de 500 m, o que seria conseguido por meio da calibração do conjunto de equipamentos usados. Entretanto, devido a limitações nesses equipamentos (inconstância tanto no suprimento de água pela moto-bomba quanto na regulagem do seu fluxo pelos registros de entrada e saída de água e pelos manômetros), bem como devido à distância e à diferença de altura entre a fonte de água que alimentava o sistema e as parcelas experimentais, respectivamente ao redor de 100 m e 15 m, o que repercutia em oscilações da carga hidráulica, não foi possível concretizar o que se tinha em mente. Desta forma, obteve-se resultados da calibração do equipamento irregulares, resultando em intervalos de classe dos fluxos extras de água e equivalentes comprimentos de declive simulados também irregulares, sendo eles, respectivamente, de 20, 36, 83, 97, 137 e $165 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ (metro de largura da parcela experimental) e de 60, 100, 220, 260, 360 e 430 m. Por sua vez, esses resultados da calibração do equipamento não puderam ser reproduzidos por ocasião da adição efetiva dos fluxos extras de água na cabeceira das parcelas experimentais. Assim, as taxas de fluxo extra de água adicionadas na cabeceira das parcelas experimentais foram obtidas indiretamente (cálculo matemático), subtraindo-se a taxa de enxurrada na sua condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação somente da chuva da taxa de enxurrada medida ao final da parcela experimental, a qual era constituída da primeira mais a taxa associada aos fluxos extras de água. Isso foi feito para cada tratamento, individualmente. Chama-se a atenção do leitor para o fato de que, ao se fazer isso, fez-se também uma pressuposição arrojada e introduziu-se uma causa de variação a mais (sob determinado ponto de vista expressiva) na parte do estudo em consideração (Parte 2), conforme esclarecido a seguir. Em relação à pressuposição arrojada, admitiu-se que, realmente, o solo estava saturado com água quando os fluxos extras desta última tiveram início e, assim, a taxa de

descarga da enxurrada se encontrava, já (sob a aplicação somente de chuva simulada), na sua condição de equilíbrio, fazendo com que toda a água que, a partir de então, entrasse no sistema, imediatamente e em igual intensidade saísse dele, o que é duvidoso em se tratando de um sistema dinâmico como o em consideração. No que diz respeito à causa de variação extra da pesquisa, introduzida ao se realizar a segunda parte do estudo em consideração, portanto afetando somente ela e nada da parte 1, refere-se às taxas desiguais de fluxo extra de água que foram adicionadas em cada parcela experimental, portanto em cada um dos tratamentos, impedindo a comparação direta ou pura e simples de seus resultados. Isto, entretanto, não comprometeu os resultados e o objetivo principal do estudo, porquanto a base principal do mesmo permaneceu válida, podendo-se perfeitamente fazer comparações relativas entre os tratamentos, bem como dissertar em termos absolutos sobre cada um deles, individualmente. De qualquer forma, recomenda-se cautela, tanto na interpretação, quanto na inferência e nas conclusões dos resultados do estudo.



(a)



(b)

FIGURA 3. Vista de alguns detalhes na operacionalização dos testes de erosão da parte 2 do estudo: (a) pluviômetros sob a área de projeção de água do aparelho simulador de chuva, para verificação da intensidade da mesma, e do equipamento utilizado na adição dos fluxos extras de água - canos plásticos, registros de entrada e saída de água e manômetros -, e (b) entrada de água na cabeceira de uma unidade experimental da pesquisa, em um dos níveis de fluxo extra de água adicionado.

3.5. Tratamentos estudados

Os tratamentos delineados para serem investigados na pesquisa foram estabelecidos, a primeira vez, em dezembro de 2008, e, a segunda vez, em junho de 2009, perfazendo, no conjunto, três causas distintas de variação, assim discriminadas: a) tipos de resíduo cultural – foram usados o resíduo cultural de aveia preta e o de milho, sendo que, antes da operação de semeadura dessas culturas, os restos vegetais dos cultivos anteriores, na medida do possível, foram todos removidos da área experimental (exceto os colmos do milho, os quais permaneceram em pé), manualmente, de modo a permitir o estudo isolado de cada tipo de resíduo; b) tamanho das peças constituintes e quantidade de resíduo cultural - foram usados resíduos inteiros no caso da aveia preta e resíduos picados (0,15 a 0,20 m cada peça) no caso do milho, ambos estando uniformemente espalhados na superfície do solo e nas seguintes quantidades, respectivamente para a aveia preta e para o milho: todo (1/1) o resíduo produzido (5,3 e 8,0 Mg ha⁻¹); metade (1/2) do resíduo produzido (2,6 e 4,0 Mg ha⁻¹); e um quarto (1/4) do resíduo produzido (1,3 e 2,0 Mg ha⁻¹); e c) modos de execução da operação de semeadura da técnica de semeadura direta - foram usados os modos de semeadura sem hastes sulcadoras ou facões e com hastes sulcadoras ou facões conectados à máquina semeadora-adubadora utilizada para tal. A referida máquina semeadora-adubadora era constituída de cinco linhas de discos (duplos) desencontrados, destinados à tarefa de colocação das sementes no solo, permitindo ou não o uso de hastes sulcadoras na mesma, destinadas à tarefa de colocação dos adubos em profundidade no solo (0,10 - 0,12 m, no caso deste estudo). Realizou-se uma única passagem do conjunto de trator-máquina semeadora-adubadora, no sentido do declive do terreno, perfazendo cinco linhas de semeadura, distanciadas uma da outra de 0,50 m, em cada parcela experimental. Assim, houve seis tratamentos na pesquisa, sem repetição, esta última ocorrência devido, principalmente, à falta de espaço físico adequado na área experimental, para se poder colocar nela um maior número de parcelas de erosão.

3.6. Determinações efetuadas

3.6.1. Determinações a campo, antes da aplicação das chuvas simuladas e da adição dos níveis de fluxo extra de água

3.6.1.1. Caracterização das condições físicas subsuperficiais do solo

Ao final do ciclo de cada cultura e antes da instalação dos tratamentos propriamente ditos, caracterizou-se o solo da área experimental, em cada parcela, em três posições na mesma (superior, intermediária e inferior), nas camadas de solo de 0 a 0,05; 0,05 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, em termos de teor de carbono orgânico (método da combustão úmida, conforme descrito em Tedesco et al., 1995), diâmetro médio ponderado – DMP - de agregados do solo a úmido (método de Kemper & Chepil, 1965) e densidade e porosidade total do solo (método do anel volumétrico, segundo Forsythe, 1975), com os resultados sendo apresentados também na forma individual, para cada parcela experimental, porém respeitando-se as camadas avaliadas do solo e as culturas usadas. O propósito dessa caracterização foi obter uma base a respeito das condições físicas internas do solo, para se poder explicar melhor as diferenças nos valores das variáveis de erosão hídrica entre os tratamentos da pesquisa. Em adição a essas determinações, foi avaliada a massa de matéria seca (60°C) de raízes (mortas) das culturas, nas camadas de solo de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m, conforme metodologia descrita em Volk & Cogo (2008).

3.6.1.2. Caracterização das condições físicas superficiais do solo

Antes da instalação dos tratamentos, avaliou-se a quantidade de matéria seca de resíduos culturais produzida pelas culturas (parte aérea ou dossel das plantas), por meio da coleta de amostras de uma área de 0,24 m², em dois locais dentro de cada parcela experimental, utilizando-se um quadro de madeira com dimensões de 0,40 x 0,60 m. Essas amostras foram colocadas em sacos de papel e posteriormente postas a secar em estufa a 60° C por um período de 48 horas, após o que foram pesadas, quantificando-se suas massas, e com os resultados tendo sido expressos na unidade de kg ha⁻¹.

Após a instalação dos tratamentos, determinou-se a cobertura do solo por resíduos culturais, utilizando-se o método da corda marcada/numerada ou

linha de transeção de pontos, conforme se encontra descrito em Adams & Arkin (1977), com os resultados tendo sido expressos com base na média das duas repetições, na forma percentual (%). Mediu-se também a rugosidade superficial do solo logo após a operação de semeadura (direta) das culturas, em cada um dos modos de execução (sem e com hastes sulcadoras ou facões conectados à máquina utilizada para tal). Para efetuar as leituras do microrelevo da superfície do solo, e assim poder calcular a rugosidade superficial, utilizou-se um rugosímetro/perfilômetro, possuindo vinte varetas verticais (de alumínio), com 0,60 m de comprimento e 0,01 m de diâmetro cada uma, distanciada uma da outra de 0,03 m, distribuídas ao longo de uma linha sobre o suporte do equipamento, ao qual foi acoplada uma câmara fotográfica digital, distanciada 1,80 m do conjunto de varetas (Figura 4a). Esse recurso possibilitou a tomada de uma foto do conjunto de varetas, as quais refletiam as alturas do microrelevo da superfície do solo, dispostas transversalmente ao declive da parcela experimental. O referido conjunto de varetas era movido sobre o suporte do rugosímetro, em vinte posições na direção da pendente do terreno, à distância de 0,05 m uma da outra, para possibilitar a tomada de vinte fotos em cada parcela (Figura 4b). A digitalização dessas fotos, feita por meio do programa computacional "Profile Meter Program" (Wagner, 1992), permitiu a leitura de 400 medidas de altura do microrelevo da superfície do solo, no centro de cada parcela, numa área de amostragem equivalente a 0,36 m² (600x600 mm), conforme se encontra descrito em Bertol et al. (2007b). A rugosidade ou o microrelevo da superfície do solo foi representado por um índice de rugosidade (RR), calculado pelo método proposto por Kamphorst et al. (2000), exceto que usando no cálculo o desvio padrão das alturas, ao invés do erro padrão, como preconiza o método original, e tendo sido utilizados os valores das alturas do microrelevo da superfície do solo transformados para logaritmo natural, sem eliminar os valores extremos, como às vezes é recomendado. Os cálculos matemático e estatístico necessários para a obtenção do índice de rugosidade (RR) foram realizados por meio do programa computacional TREND, escrito em linguagem FORTRAN, conforme descrito em Vivas Miranda (2000).



FIGURA 4. Vista do rugosímetro ou perfilômetro utilizado na medição da rugosidade superficial do solo (a), em operação sobre uma unidade experimental do estudo (b).

3.6.1.3. Teor de água no solo

Após a instalação dos tratamentos e antes da aplicação das chuvas simuladas, foram coletadas amostras de solo para determinação do seu teor de água, nas suas camadas de 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, em base gravimétrica, conforme se encontra descrito em Forsythe (1975).

3.6.2. Determinações a campo, durante a aplicação das chuvas simuladas e a adição dos níveis de fluxo extra de água

A partir do início das chuvas simuladas, mediu-se o tempo de início da enxurrada (T_i), com cronômetro, e a altura da lâmina de água da chuva superficialmente retida e infiltrada no solo no período que o antecedeu ou período de pré-enxurrada (LAPE), por cálculo, utilizando-se os valores de intensidade das chuvas aplicadas e de tempos de início da enxurrada. As taxas instantâneas de descarga ou vazões da enxurrada foram determinadas a cada três minutos, tanto durante o período de aplicação somente das chuvas e até a mesma atingir taxa constante, quanto durante o período de adição dos fluxos extras de água, respectivamente com o uso de provetas graduadas de 500, 1.000 e/ou 2.000 mL e de baldes metálicos previamente graduados, com capacidade de 40 L cada um, os quais eram colocados sob o fluxo da enxurrada, por um período de tempo dependente da sua intensidade, e contado o mesmo com cronômetro. Assim, o tempo de coleta das amostras de

enxurrada variou de três a quinze segundos, conforme a intensidade do fluxo. Após os devidos cálculos e conversões, os resultados foram expressos na unidade de mm h^{-1} . Nos mesmos intervalos de tempo referidos, foram também coletadas amostras da enxurrada, tanto durante o período de aplicação somente das chuvas, quanto da adição dos fluxos extras de água, usando-se potes plásticos com capacidade de 1 L, para posterior determinação, em laboratório, das correspondentes concentrações de sedimento na mesma.

3.6.3. Determinações de laboratório e procedimentos de escritório

3.6.3.1. Checagem da intensidade das chuvas simuladas aplicadas

A checagem da intensidade das chuvas simuladas aplicadas foi feita distribuindo-se, estrategicamente, vinte canecos de alumínio (usados como pluviômetro) sob a área de projeção de água do aparelho simulador de chuva, possuindo cada um deles 0,20 m de altura e 0,08 m de diâmetro, e posteriormente sendo efetuadas as leituras dos volumes coletados nos mesmos (mL), usando proveta graduada. Com base no volume de água coletado em cada caneco e na área de secção transversal dele, e após se efetuar as devidas conversões de unidade, foi calculada a intensidade de cada chuva aplicada, usando-se a média das leituras dos vinte canecos, com os resultados tendo sido expressos na unidade de mm h^{-1} .

3.6.3.2. Concentrações instantâneas de sedimento na enxurrada

Tomando-se os potes plásticos com as amostras de enxurrada coletadas a campo, a cada cinco minutos durante o período regular de chuva e a cada três minutos durante adição dos níveis de fluxo extra de água, adicionou-se a cada um deles 3 a 5 mL de alúmen de potássio (comercial), usado como precipitante, deixando-os em repouso por 24 a 48 h para decantação. Transcorrido esse tempo, e com auxílio de uma mangueira plástica transparente (diâmetro de 0,01 m), foi retirado o sobrenadante de cada pote plástico e se colocaram os mesmos a secar em estufa com ventilação forçada, a 60°C , por três a quatro dias. A seguir, se pesaram os potes com e sem sedimento (este foi removido dos potes com o auxílio de uma pequena espátula e escova), efetuou-se as devidas subtrações (peso dos potes com

enxurrada, menos peso dos potes sem enxurrada) e dividiu-se a massa seca (60°C) de cada um deles pelas correspondentes massas de enxurrada contidas nas amostras, calculando-se a concentração de sedimentos e expressando-a na unidade de g g^{-1} .

3.6.3.3. Taxas instantâneas de perda de solo

As taxas instantâneas de perda de solo foram obtidas multiplicando-se as concentrações instantâneas de sedimento na enxurrada pelas suas correspondentes taxas instantâneas de descarga, e posteriormente dividindo-se os resultados obtidos pela área da parcela experimental ($38,5 \text{ m}^2$). Após os devidos cálculos e conversões, os resultados foram expressos na unidade de $\text{kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

3.6.3.4. Perda total de água

A perda total de água da chuva na forma de enxurrada foi obtida temporalmente integrando-se os valores das taxas instantâneas de descarga da enxurrada. Após os devidos cálculos e conversões, os resultados foram expressos na forma percentual (%), em relação à quantidade total de chuva aplicada.

3.6.3.5. Perda total de solo

A perda total de solo foi obtida temporalmente integrando-se os valores das taxas instantâneas de perda de solo. Após os devidos cálculos e conversões, os resultados foram expressos na unidade de kg ha^{-1} .

Ao encerrar o relato dos métodos e procedimentos usados na avaliação das variáveis de erosão hídrica do solo medidas no escoamento superficial, cumpre dizer que os cálculos das taxas instantâneas de descarga da enxurrada e suas correspondentes concentrações instantâneas de sedimento, bem como os cálculos das taxas instantâneas de erosão e das perdas totais de solo e água, foram feitos por meio do programa computacional PEDEROSÃO, desenvolvido pelo professor Elemar Antonino Cassol, do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.6.3.6. Cálculo dos comprimentos equivalentes de declive simulados na pesquisa

Os comprimentos equivalentes de declives simulados na pesquisa (L_e), na unidade de metro (m), foram calculados pela seguinte equação, conforme se encontra em Cogo (1981):

$$L_e = (I_a/q_c)L + L \quad [10]$$

Na equação acima I_a é a taxa de fluxo extra de água adicionada na cabeceira das parcelas experimentais, na unidade de $m^3 s^{-1} m^{-1}$ de largura da parcela, q_c a taxa do excesso de água da chuva na condição de equilíbrio da enxurrada, enquanto sob a aplicação somente dela, podendo ser referida como taxa constante de descarga da enxurrada, na unidade de $m^3 s^{-1} m^{-1}$ de largura da parcela, e L o comprimento da parcela experimental (11 m).

3.7. Ajuste de resultados

Quando os valores de intensidade das chuvas simuladas aplicadas variaram em mais do que 5% (para baixo ou para cima) do valor da intensidade da chuva planejada (75 mm h^{-1}), os valores observados de perda total de solo e perda total de água foram ajustados para a intensidade da chuva planejada e para a duração única de chuva de 1,5 h. Em prosseguimento, os resultados da perda total de solo e da perda total de água foram também ajustados para a declividade média do solo nas parcelas experimentais ($0,16 \text{ m m}^{-1}$), obtida pela média aritmética dos valores de declividade de cada uma delas, os quais são apresentados no apêndice 2. Esses ajustes foram todos efetuados conforme se encontra descrito em Cogo (1981). A perda total ajustada de água, para a intensidade da chuva planejada (75 mm h^{-1}), foi obtida subtraindo-se a quantidade total observada da água infiltrada no solo (quantidade total da chuva aplicada menos quantidade total da enxurrada observada) da quantidade total da chuva planejada (intensidade x duração da mesma). A perda total ajustada de solo, também para a intensidade da chuva planejada (75 mm h^{-1}), foi obtida multiplicando-se os valores observados da perda total de solo pelo quadrado da razão entre a intensidade da chuva planejada e a intensidade da chuva observada, enquanto que para a declividade média do solo nas parcelas

experimentais ($0,16 \text{ m m}^{-1}$), foi obtida multiplicando-se os valores da perda de solo obtidos do ajuste recém mencionado pelo valor do fator S dos modelos de predição da erosão USLE e RUSLE, o qual representa a influência do grau do declive na erosão hídrica. Esse fator foi calculado utilizando a fórmula $S=0,065 + 4,65 \text{ sen}\theta + 65,41 (\text{sen}\theta)^2$, onde θ é o ângulo do declive, conforme descrito em Wischmeier & Smith (1978), sendo que os resultados individuais de cálculo do mesmo, para cada parcela experimental, encontram-se no apêndice 2. Informa-se que os valores de intensidade e duração das chuvas, para os quais os valores de perda total de solo e perda total de água foram ajustados (respectivamente 75 mm h^{-1} e $1,5 \text{ h}$), deveu-se ao fato de serem os mais próximos dos valores observados (reais) durante a aplicação somente das chuvas, sem a adição dos fluxos extras, conforme pode ser visto no apêndice 3. Informa-se ainda que todos os ajustes mencionados não foram efetuados, nem para a taxa de erosão ou perda de solo, nem para a taxa de descarga da enxurrada ou perda de água, obtidas tanto na condição de equilíbrio desta última enquanto sob a aplicação somente das chuvas quanto durante o transcorrer delas junto à adição dos fluxos extras de água, e desta forma permanecendo seus valores observados ou reais, bem como os valores observados ou reais de intensidade das aludidas chuvas.

3.8. Análise e interpretação dos resultados

A análise e a interpretação dos resultados, por não ter sido feita a análise estatística dos mesmos, devido à falta de repetição nos tratamentos, conforme explicado, foi essencialmente baseada nas observações visuais de campo, efetuadas *in loco*, durante a vigência do processo erosivo do solo nas parcelas experimentais, enquanto nelas eram aplicadas as chuvas simuladas e adicionados os níveis de fluxo extra de água. Este tipo de pesquisa (usando chuva simulada) permite usar bem tal procedimento, bem como deduzir bem a respeito do processo erosivo, o que, além de ser uma vantagem sobre os estudos conduzidos sob chuva natural, serve de excelente base de apoio para poder explicar melhor as diferenças nos resultados. Em adição, nessa etapa de análise e interpretação dos resultados, lançou-se mão de conceitos e teorias comprovadas, desenvolvidos em estudos de mecânica da erosão hídrica pluvial do solo, existentes na literatura especializada.

No que diz respeito aos resultados obtidos no estudo de averiguação do processo de falha do resíduo cultural ou de existência de limites críticos de comprimento de declive, foram analisados mediante análise de regressão linear e não-linear simples (uma variável), usando os dados na sua forma original, tal e qual foram obtidos (sem transformação). Os recursos computacionais usados nos cálculos, análises e gráficos desse estudo, constituíram-se da planilha eletrônica Microsoft Excel 97 (Microsoft Corporation) e do programa Sigma Plot versão 11.0 (Systat software, Inc. Sigma plot for Windows). Os resultados dessa investigação foram interpretados com base na observação visual a campo, acompanhada de registros fotográficos, efetuados durante o processo de adição dos fluxos extras de água nas parcelas experimentais, e por meio de relações teóricas de erosão, fundamentadas em estudo especificamente desenvolvido para tal, segundo Foster et al. (1982, a,b).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme informado no material e métodos, para fins de elaboração deste trabalho, apesar de uma só investigação, em uma só área experimental, a pesquisa foi dividida em duas partes, quais sejam: Parte 1 e Parte 2. Assim, a apresentação dos resultados e sua discussão seguirão essa ordem.

4.1. Parte 1 – Erosão hídrica sob resíduos culturais de aveia e milho e modos de semeadura direta

4.1.1. Condições físicas internas do solo antes da implantação dos tratamentos e da realização dos testes de chuva simulada

Na Tabela 1 são apresentados os resultados do teor de carbono orgânico e de alguns atributos físicos em três de camadas do solo, avaliados ao final do ciclo das culturas usadas, antes da implantação dos tratamentos. O solo da área experimental se apresentava relativamente uniforme por ocasião da realização dos testes de chuva simulada, após o final do ciclo cultural da aveia e do milho, com pequenas diferenças entre os dois cultivos e os valores dos atributos físicos avaliados tendendo a diminuir com a profundidade do solo. Os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados e de densidade do solo, no entanto, foram ligeiramente superiores após o ciclo da aveia do que de milho, embora tenha ocorrido menor valor de carbono orgânico no primeiro ciclo referido. Isso demonstra o efeito do tipo de cultura, especialmente no que se refere às raízes, que, em conjunto com outros fatores,

exercem forte influência na agregação do solo. Esse efeito provavelmente conferiu maior estabilidade aos agregados do solo sob o cultivo da aveia do que do milho. Em relação ao volume de macroporos, observa-se que, em geral, o mesmo foi ligeiramente superior ao final do ciclo do milho do que da aveia. Isso pode ser atribuído à maior intensidade dos ciclos de umedecimento e secagem do solo no período de verão do que de inverno, em função da maior temperatura do ar no verão, bem como, provavelmente, à diferença das raízes das duas culturas no que se refere ao diâmetro médio.

Apesar da relativa uniformidade nas condições físicas internas do solo nos diversos tratamentos, a drenagem interna de água no solo parecia ser ligeiramente maior durante a realização dos testes de chuva sobre o resíduo de milho do que de aveia; embora, o solo apresentasse maior resistência dos seus agregados por ocasião do estudo com o resíduo de aveia do que de milho.

4.1.2. Massa de matéria seca da parte aérea, cobertura do solo por resíduos culturais e massa de matéria seca de raízes das culturas de aveia e milho, antes e após a implantação dos tratamentos, antes da realização dos testes de chuva simulada

Na tabela 2 são apresentados os resultados de massa de matéria seca da parte aérea e equivalente percentagem de cobertura do solo, antes e após a implantação dos tratamentos, bem como os de massa de matéria seca de raízes, ao final do ciclo das culturas, antes da instalação dos tratamentos. A massa de matéria seca da parte aérea, antes da implantação do experimento, variou de 4.411 a 6.503 kg ha⁻¹ e de 7.268 a 8.755 kg ha⁻¹, respectivamente para a aveia e milho; o valor médio foi de 5.320 kg ha⁻¹ para a aveia e de 8.011 kg ha⁻¹ para o milho. Verifica-se que antes da implantação dos tratamentos a superfície do solo se encontrava totalmente protegida pelos resíduos das duas culturas. Após esse momento, entretanto, tal cobertura foi consideravelmente alterada, devido às duas formas de semeadura direta utilizadas. As diferenças nos resultados de cobertura do solo, entre os tratamentos e entre as culturas, serão abordadas melhor adiante, quando da apresentação e discussão das condições físicas externas do solo.

TABELA 1. Valores de alguns atributos físicos internos em três camadas do solo, avaliados ao final do ciclo das culturas de aveia e milho, antes da implantação dos tratamentos e da realização dos testes de chuva simulada

Tratamento	Camada de solo	CO ¹		DMP ²		Ds ³		Macroporos		Microporos		Poros. Total	
		Aveia	Milho	Aveia	Milho	Aveia	Milho	Aveia	Milho	Aveia	Milho	Aveia	Milho
	m	.....g kg ⁻¹.....	.....mm.....	.....mm.....	.....mm.....	.....Mg m ⁻³.....	.....Mg m ⁻³.....	.....m ³ m ⁻³.....	.....m^{3} m^{-3}.....	.....m^{3} m^{-3}.....	.....m^{3} m^{-3}.....	.....m^{3} m^{-3}.....	.....m^{3} m^{-3}.....
SD ⁴ s/hastes, 1/1 dose	0 – 0,05	24,8	27,1	5,25	4,52	1,15	1,07	0,15	0,20	0,41	0,40	0,56	0,60
	0,05 – 0,1	22,4	25,7	5,32	4,48	1,17	1,12	0,16	0,21	0,40	0,40	0,56	0,58
	0,1 – 0,2	22,3	22,8	4,11	3,74	1,18	1,18	0,09	0,10	0,46	0,45	0,55	0,55
SD s/hastes, 1/2 dose	0 – 0,05	31,1	29,7	5,97	5,09	1,11	1,16	0,18	0,17	0,40	0,39	0,58	0,56
	0,05 – 0,1	25,0	24,3	4,88	5,19	1,08	1,15	0,20	0,18	0,39	0,39	0,59	0,57
	0,1 – 0,2	25,4	20,5	5,28	3,59	1,10	1,13	0,17	0,15	0,41	0,42	0,58	0,57
SD s/hastes, 1/4 dose	0 – 0,05	27,0	29,5	5,81	5,78	1,26	1,17	0,12	0,15	0,40	0,41	0,52	0,56
	0,05 – 0,1	24,2	25,8	5,66	5,41	1,16	1,13	0,18	0,20	0,38	0,38	0,56	0,58
	0,1 – 0,2	24,9	24,0	5,92	5,07	1,22	1,19	0,14	0,13	0,40	0,42	0,54	0,55
SD c/hastes, 1/1 dose	0 – 0,05	24,1	29,6	5,18	5,33	1,19	1,08	0,15	0,20	0,40	0,39	0,55	0,59
	0,05 – 0,1	23,7	29,2	5,17	5,27	1,17	1,13	0,13	0,16	0,43	0,41	0,56	0,57
	0,1 – 0,2	20,8	22,0	4,00	4,64	1,19	1,15	0,09	0,14	0,47	0,43	0,55	0,57
SD c/hastes, 1/2 dose	0 – 0,05	24,4	30,7	5,73	5,63	1,18	1,07	0,12	0,18	0,43	0,42	0,55	0,60
	0,05 – 0,1	28,0	26,4	5,78	5,21	1,15	1,15	0,11	0,14	0,46	0,43	0,57	0,57
	0,1 – 0,2	25,2	26,2	5,50	4,55	1,14	1,16	0,13	0,15	0,44	0,41	0,57	0,56
SD c/hastes, 1/4 dose	0 – 0,05	27,5	30,7	5,61	5,46	1,17	1,12	0,14	0,19	0,42	0,39	0,56	0,58
	0,05 – 0,1	23,5	27,8	5,47	4,84	1,15	1,07	0,17	0,22	0,40	0,38	0,57	0,60
	0,1 – 0,2	23,4	24,6	5,07	4,14	1,19	1,17	0,14	0,18	0,41	0,38	0,55	0,56

¹Carbono orgânico. ²Diâmetro médio ponderado de agregados. ³Densidade do solo. ⁴Semeadura direta.

TABELA 2. Massa de matéria seca da parte aérea, cobertura do solo por resíduos culturais e massa de matéria seca de raízes, avaliadas ao final do ciclo das culturas de aveia e milho, antes e após a implantação dos tratamentos, antes da realização dos testes de chuva simulada

Tratamento	Massa de matéria seca da parte aérea ¹				Cobertura do solo				Massa de matéria seca de raízes ^{1,2}			
	Aveia preta		Milho		Aveia preta		Milho		Aveia preta		Milho	
	Antes ³	Após ⁴	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
	.....kg ha ⁻¹.....				.....%				.....kg ha ⁻¹.....		.....kg ha ⁻¹	
SD ⁵ s/hastes, 1/1 dose	4.415	4.415	8.755	8.755	100	92	100	90	537	- ⁶	1.061	-
SD s/hastes, 1/2 dose	4.411	2.205	- ⁶	4.000	100	88	100	72	1.613	-	1.779	-
SD s/hastes, 1/4 dose	5.515	1.378	-	2.000	100	85	100	49	1.677	-	801	-
SD c/hastes, 1/1 dose	4.809	4.808	7.268	7.268	100	83	100	82	1.882	-	464	-
SD c/hastes, 1/2 dose	6.268	3.134	-	4.000	100	81	100	66	554	-	1.227	-
SD c/hastes, 1/4 dose	6.503	1.625	-	2.000	100	78	100	38	915	-	831	-

¹Seca em estufa, a 60°C. ²Referente à camada de solo de 0 a 0,2 m. ³Antes da implantação dos tratamentos. ⁴Após a implantação dos tratamentos.

⁵Semeadura direta. ⁶Não determinado.

A massa de matéria seca de raízes (Tabela 2), em geral apresentou valores baixos nas duas culturas, comparados aos encontrados por outros autores (Volk & Cogo, 2008; Portela, 2009). Isso, provavelmente, foi devido à dificuldade de se efetuar essa determinação, principalmente no que se refere ao número de amostras de solo coletadas para tal; em parcelas de campo com dimensões relativamente pequenas, como as usadas neste estudo (3,5 m x 11,0 m - 38,5 m²) o cuidado para não danificar demasiadamente a superfície do solo deve ser grande, pois, caso contrário, isso pode interferir nos resultados. A metodologia para a determinação dessa variável pode ter ocasionado variação na profundidade amostrada e no número de amostras e locais de amostragem nos tratamentos, o que pode ter influenciado o resultado final. Neste caso, o número de subamostras foi de duas a três por parcela, o que realmente pode ser considerado pequeno, conforme também ressaltado por Portela (2009). Assim, dada a importância das raízes das plantas para os atributos do solo e destes sobre sua resistência à erosão, a avaliação da mesma deve ser feita com muito cuidado e da melhor forma possível. Assim, com base na tabela 2, a massa de raízes foi ligeiramente maior no cultivo da aveia do que de milho, em coerência com os resultados do DMP dos agregados do solo em cada uma das culturas, demonstrando a sua influência neste último atributo.

4.1.3. Condições físicas externas e teor de água do solo logo após a implantação dos tratamentos, antes da realização dos testes de chuva simulada

Uma vista geral da superfície do solo nas parcelas experimentais, logo após a implantação dos tratamentos e antes da aplicação das chuvas simuladas, é fornecida nas figuras 5 e 6, respectivamente para as situações com o resíduo cultural da aveia e do milho. A cobertura do solo por resíduos culturais, o índice da sua rugosidade superficial e o seu teor de água antecedente às chuvas simuladas, são apresentados na tabela 3. Tanto a cobertura pelos resíduos culturais, quanto à rugosidade superficial do solo, foram afetadas pelos tratamentos estudados, independentemente do tipo de resíduo. Assim, a cobertura resultou maior na semeadura efetuada sem hastes sulcadoras do que com hastes, em ambos os tipos de resíduo; houve tendência

de diminuição da cobertura com a redução das doses dos resíduos e com os seus valores sendo sempre menores sob o resíduo de milho do que de aveia, principalmente nas doses de 1/2 e 1/4 da quantidade total produzida.

No que se refere ao índice de rugosidade superficial do solo (Tabela 3), seus valores resultaram maiores na semeadura efetuada com hastes sulcadoras do que sem hastes. Verifica-se também que os valores dessa variável foram maiores na situação com o resíduo de aveia do que de milho. Não se observou tendência clara quanto às doses dos referidos resíduos, mas, de modo geral, em ambos a rugosidade superficial foi maior na dose de 1/2 da quantidade total produzida, intermediária na de 1/4 e menor na dose integral ou de 1/1, em qualquer dos modos de execução da operação de semeadura.

As diferenças nos valores de cobertura do solo entre os dois tipos de resíduo cultural podem ser explicadas: o resíduo de milho era predominantemente constituído por partes do colmo, tendo sido picado manualmente em peças com tamanho entre 0,10 e 0,15 m cada uma. Esta operação foi realizada com a finalidade de representar uma situação em que o resíduo teria sido colhido com automotriz dotada de picador de palha. Por sua vez, o resíduo da aveia não foi picado, por conseguinte não sofreu redução de tamanho das suas peças, simplesmente tendo sido ceifado rente à superfície do solo e uniformemente espalhado sobre ela. Assim, isso explica a menor cobertura do solo sob o resíduo de milho do que de aveia, especialmente nas doses de 1/2 e de 1/4 da quantidade total produzida, embora esta última tenha sido maior para o milho do que para a aveia (Tabela 2).

De fato, a diminuição da percentagem de cobertura do solo pelos resíduos culturais com a diminuição da dose era esperada, tendo em vista ser absolutamente normal. Os valores de cobertura do solo por resíduo cultural que foram obtidos neste estudo são condizentes com os de outros estudos, realizados em condições semelhantes e utilizando a mesma metodologia de avaliação (Bertol et al, 1997; Schick et al, 2000; Cogo et al, 2003; Amaral et al, 2008).

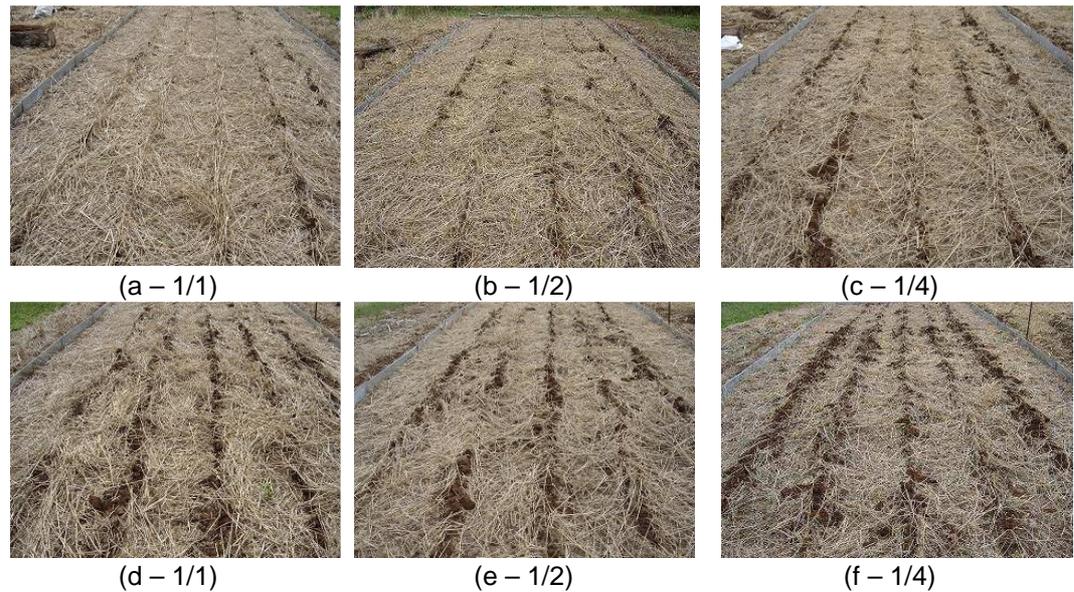


FIGURA 5. Vista da superfície do solo nas parcelas experimentais logo após a implantação dos tratamentos, na situação com o resíduo cultural de aveia preta, antes da realização do correspondente teste de chuva simulada (a, b, c - sem hastes sulcadoras; d, e, f - com hastes sulcadoras; 1/1=todo o resíduo produzido ou $5,3 \text{ Mg ha}^{-1}$; 1/2=metade do resíduo produzido ou $2,65 \text{ Mg ha}^{-1}$; 1/4=um quarto do resíduo produzido ou $1,32 \text{ Mg ha}^{-1}$).

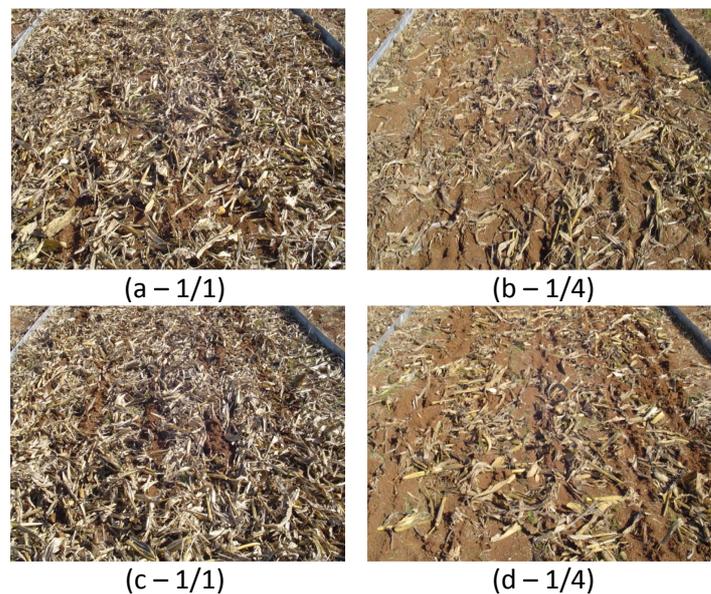


FIGURA 6. Vista da superfície do solo nas parcelas experimentais logo após a implantação dos tratamentos, na situação com o resíduo cultural de milho, antes da realização do correspondente teste de chuva simulada (a, b=sem hastes sulcadoras; c, d=com hastes sulcadoras; 1/1=todo o resíduo produzido ou $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$; 1/4=um quarto do resíduo produzido ou $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$; obs: a ausência das imagens com a dose de 1/2=metade do resíduo produzido ou $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ se deveu a que as mesmas não resultaram boas).

TABELA 3. Valores de alguns atributos físicos externos e de teor de água do solo em duas camadas do solo, avaliados logo após a implantação dos tratamentos, antes da realização dos testes de chuva simulada

Tratamento	Cobertura por resíduo cultural		Índice de rugosidade - RR		Teor de água no solo			
	Aveia	Milho	Aveia	Milho	Aveia	Milho	Aveia	Milho
	.....%.....		.....mm.....		.....kg kg ⁻¹			
					0 – 0,1 m	0,1 – 0,2 m		
SD ¹ s/hastes, 1/1 dose	92	90	6,09	4,16	0,40	0,32	0,42	0,38
SD s/hastes, 1/2 dose	88	72	6,62	6,22	0,40	0,38	0,43	0,40
SD s/hastes, 1/4 dose	85	49	5,66	4,99	0,35	0,31	0,36	0,32
SD c/hastes, 1/1 dose	83	82	7,56	4,63	0,43	0,39	0,47	0,40
SD c/hastes, 1/2 dose	81	66	7,92	6,58	0,36	0,36	0,42	0,38
SD c/hastes, 1/4 dose	78	38	8,71	5,04	0,36	0,34	0,38	0,35

¹Semeadura direta.

Em relação às diferenças nos valores do índice de rugosidade superficial do solo, os quais foram maiores para o resíduo de aveia do que de milho (Tabela 3), podem ser explicadas pelas diferenças nas características físicas internas do solo, avaliadas ao final dos ciclos de cada cultura. Influíram nesta variável principalmente os teores de carbono orgânico, a massa de raízes e o DMP de agregados do solo (Tabelas 1 e 2), cujos valores eram ligeiramente superiores ao final do ciclo da aveia do que do milho. Isso ocorreu principalmente na camada de 0 a 5 cm, tendo resultado em uma estrutura superficial de solo melhor formada e mais resistente. Em decorrência disso, fragmentos de maior porte resultaram da ação dos discos e das hastes sulcadoras na aveia e, em com isso, maior microrelevo ou rugosidade superficial do solo. Ao serem usadas hastes sulcadoras na máquina semeadora-adubadora, realizou-se no solo uma “mini-escarificação”, o que explica a maior rugosidade superficial do solo sob essa operação, comparada à realizada sem hastes sulcadoras. Resultados de rugosidade superficial do solo semelhantes aos observados nesta pesquisa foram encontrados nos trabalhos realizados por Burwell et al. (1966), Allmaras et al. (1966), Cogo (1981), Cogo et al. (1984), Norton et al. (1985), Eltz & Norton (1997); Bertol et al. (2006), Bertol et al. (2007b), Zoldan Jr et al. (2008), Panachuki (2008), entre outros.

Do ponto de vista de aplicação prática dos resultados, a forma de atuação no solo de semeadoras-adubadoras contendo instrumentos mecânicos dotados de hastes, reveste-se de grande importância. Isto porque, com eles, é

possível criar no solo condição favorável para a infiltração e retenção superficial de água da chuva e de retenção superficial das partículas erodidas, o que é fundamental, respectivamente, para o melhor crescimento de plantas e para a menor erosão.

Em relação ao teor de água no solo antecedente às chuvas simuladas (Tabela 3), nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, nas diferentes condições do estudo, de modo geral variou dentro da normalidade, em grau relativamente pequeno; tendeu a ser menor na camada mais superficial do solo, em ambos os tipos de resíduo cultural, bem como levemente maior na situação com o resíduo de aveia do que de milho. Resultados semelhantes foram obtidos por Volk & Cogo (2004), em pesquisa similar a esta. Desta forma, pode-se dizer que o teor de água no solo antecedente às chuvas simuladas não constituiu causa de variação na pesquisa, não tendo interferido, pois, em princípio, nos resultados obtidos.

4.1.4. Distribuição temporal da taxa de descarga da enxurrada

Os resultados da distribuição temporal da taxa de descarga ou hidrograma da enxurrada, para os dois tipos de resíduo cultural e os dois modos de semeadura, são apresentados na figura 7. Houve correspondência entre os tratamentos no que se refere à forma do hidrograma, tanto para o resíduo cultural de aveia quanto de milho. A diferença no tempo de início do escoamento superficial, entre as duas formas de execução da operação de semeadura, apresentou maior amplitude no milho do que na aveia. Isto pode ser explicado pelo teor de água no solo antecedente as chuvas simuladas, que era maior na condição com resíduo cultural de aveia (Tabela 3), minimizando as diferenças entre as duas formas de semeadura.

Observa-se que os valores de taxa de descarga da enxurrada foram maiores para condição de semeadura sem hastes sulcadoras, independentemente do tipo e da dose de resíduo cultural. Com base nesses resultados, verifica-se que as taxas de descarga da enxurrada e suas correspondentes perdas totais de água foram maiores na semeadura sem hastes do que com hastes, em ambos os tipos de resíduo cultural, com diferenças relativamente pequenas entre eles e entre as doses. Da mesma

forma, o comportamento das curvas praticamente foi o mesmo o tempo todo, em todos os tratamentos, exceto um caso isolado (Figura 7c).

Como preliminarmente mencionado, observa-se na figura 7 que, em geral, não houve tendência clara da influência das doses dos resíduos culturais na distribuição temporal das taxas de descarga da enxurrada nos dois modos de semeadura. Na verdade, esperava-se que as mesmas diminuíssem com o aumento da dose dos resíduos, o que não ocorreu. As menores taxas de descarga de enxurrada na semeadura com hastes, comparadas às da sem hastes, são explicadas pela maior rugosidade superficial do solo no mesmo (Tabela 3). Nessa condição de superfície do solo, mais rugosa, normalmente ocorrem maior retenção e infiltração de água da chuva, o que resulta em menores taxas de descarga da enxurrada e de perda total de água, independentemente do tipo e dose de resíduo cultural. De qualquer forma, os resíduos culturais, quando na superfície do solo, também têm grande influência no processo de infiltração de água no solo; por conseguinte, também na perda total de água, por dissiparem a energia cinética das gotas da chuva e, assim, prevenirem a dispersão das partículas do solo e o selamento superficial. No presente estudo, o efeito combinado da rugosidade do solo e dos resíduos culturais na retenção e infiltração da água no solo pôde ser observada no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras, no qual houve alta rugosidade superficial e baixa cobertura do solo, resultando nas menores diferenças entre taxas de descarga da enxurrada e perdas totais de água dentre as observadas no estudo, para qualquer dos tipos de resíduo cultural, porém, sem tendência clara quanto às doses de resíduo cultural.

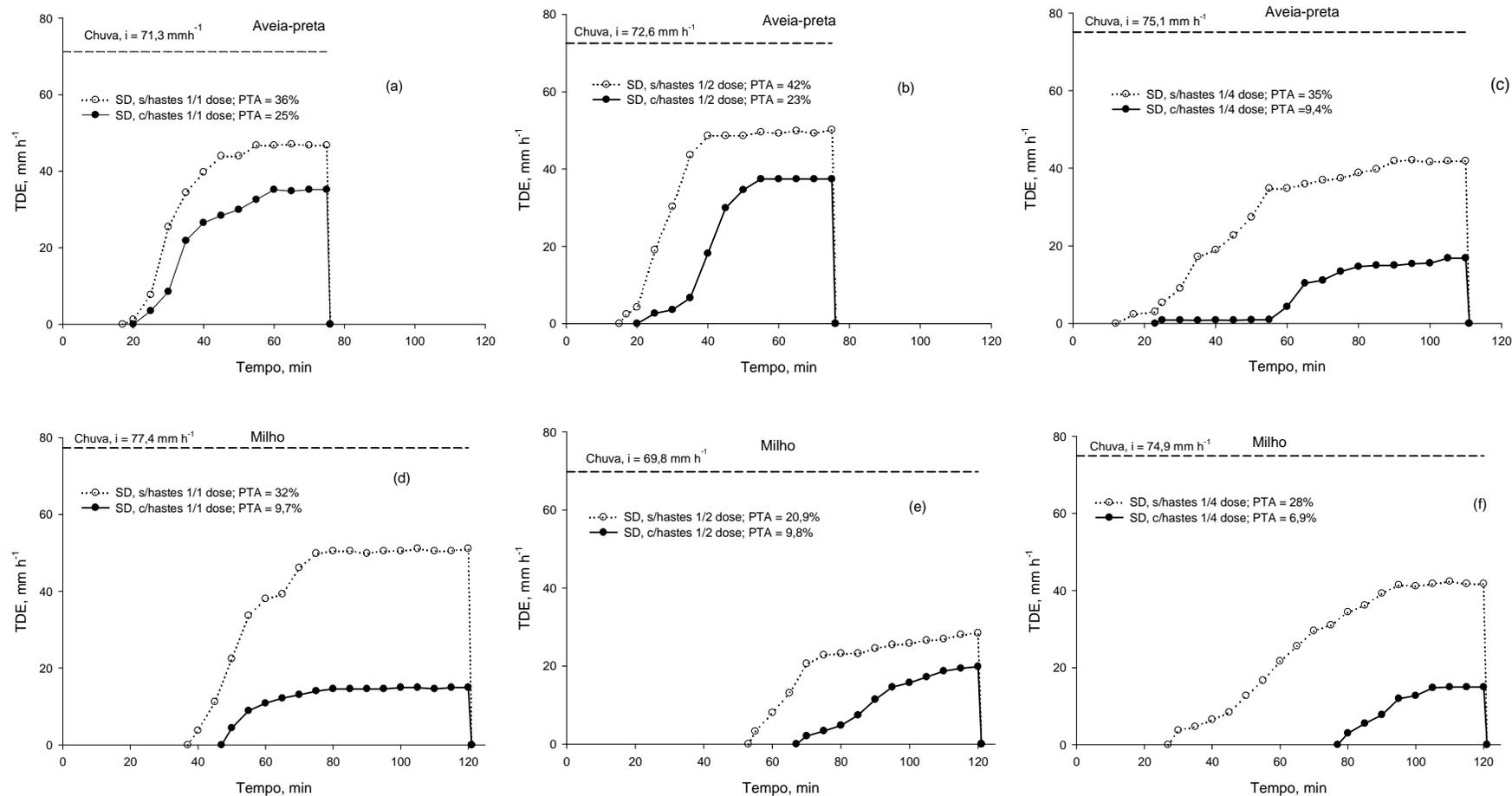


FIGURA 7. Distribuição temporal da taxa de descarga da enxurrada (TDE) e correspondente perda total de água (PTA) em relação às quantidades totais de chuva aplicadas, sob as intensidades e durações reais das chuvas simuladas, com os resíduos culturais de aveia preta e de milho, nos tratamentos estudados.

4.1.5. Distribuição temporal da concentração de sedimentos na enxurrada

Os resultados dessa avaliação são apresentados na figura 8. A concentração de sedimentos na enxurrada comportou-se de modo diferente da taxa de descarga da enxurrada (Figura 7). Enquanto esta última apresentou regularidade na distribuição temporal dos seus valores, a concentração de sedimentos na enxurrada variou muito, com valores altos e baixos, numa típica distribuição irregular. Isso provavelmente se deveu ao fato de que, tão logo iniciou o escoamento superficial, iniciou também o transporte das partículas de solo que estavam previamente desagregadas, tanto pela ação de impacto das gotas de chuva sobre o solo quanto pela ação de cisalhamento da enxurrada. Verifica-se também na figura 8 que a concentração de sedimentos na enxurrada ao longo do tempo tendeu a ser maior na semeadura com hastes sulcadoras, para resíduo cultural de aveia. Houve aumento expressivo especialmente na porção intermediária do tempo de duração da chuva e, a partir disso, tendeu a diminuir até o término da mesma (Figura 8a, 8b, 8c).

Por outro lado, ainda no resíduo de aveia, mas na condição sem haste, verifica-se que a concentração de sedimentos foi relativamente maior logo após o início do escoamento superficial, tendendo a diminuir ao longo do tempo, até o final da aplicação da chuva (Figura 8b, 8c). Exceção ocorreu no tratamento 1/1 dose que apresentou dois valores altos no final da chuva (Figura 8a). Para o resíduo de milho, verifica-se o mesmo padrão que o de aveia, exceto na magnitude dos valores que foram expressivamente maiores no milho.

Os maiores valores de concentração de sedimentos, encontrados no resíduo de milho, podem ser explicados pela forma com que este resíduo foi manejado, pois, devido ao corte, resultou em menores peças e menor percentagem de cobertura do solo (Tabela 3). Dessa forma, na presença deste resíduo houve maior desagregação e transporte de partículas de solo. Outra razão para a diferença na magnitude dos valores entre os dois tipos de resíduo é o possível maior grau de agregação do solo na aveia, representado pelo maior DMP dos seus agregados do que no milho (Tabela 1).

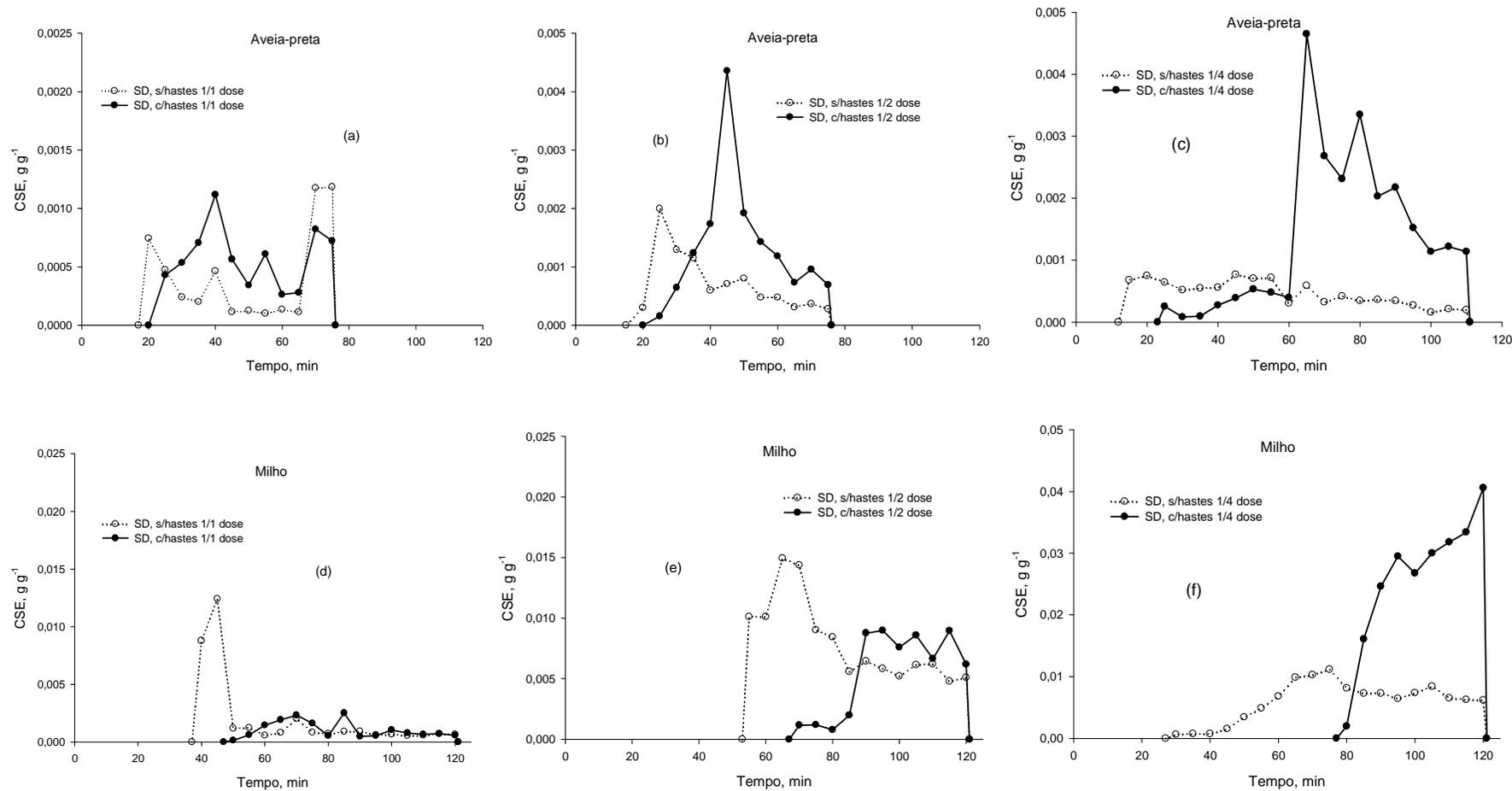


FIGURA 8. Distribuição temporal da concentração de sedimentos na enxurrada (CSE), sob as intensidades e durações reais das chuvas simuladas, com os resíduos culturais de aveia preta e de milho, nos tratamentos estudados.

Entre as doses de resíduo, verifica-se que as maiores quantidades deixadas na superfície do solo reduziram a concentração de sedimentos de forma mais eficaz do que as menores, independentemente do tipo de resíduo cultural e da forma de execução de semeadura (Figura 8). Isso demonstra a importância da quantidade dos resíduos culturais em dissipar a energia das gotas de chuva e a tensão cisalhante da enxurrada, protegendo o solo da desagregação, e por criar rugosidade hidráulica, dificultando o livre movimento de água; como consequência, reduzindo a tensão cisalhante da enxurrada sobre o solo, conforme bem elucidado em estudos e teorias de mecânica da erosão hídrica (Mannering & Meyer, 1963; Wischmeier & Smith, 1978; Alberts & Neibling, 1994; Brenneman & Laflen, 1982; Cogo et al., 1983; Cogo et al., 1996).

4.1.6. Distribuição temporal da taxa de perda de solo

A distribuição temporal dessa variável nos tratamentos estudados é apresentada na figura 9, na qual se observa que houve um comportamento distinto entre os dois tipos de resíduo estudados. Na condição com resíduo de aveia, os valores de taxa de perda de solo foram muito baixos comparados àqueles encontrados para o milho. Isso ocorreu, principalmente devido à menor concentração de sedimentos encontrada para o resíduo de aveia, o que resultou numa perda total de solo (PTS) muito baixa, em todos os casos estudados para essa situação (Figura 9a, 9b, 9c). As razões para a menor concentração de sedimentos, na condição do resíduo de aveia, são as mesmas expostas anteriormente, mas, principalmente, o tamanho das peças constituintes. Dessa forma, a taxa de perda de solo foi ligeiramente superior na situação com hastes, independentemente da dose com o resíduo de aveia (Figura 9a, 9b, 9c). Isto ocorreu exatamente porque a PTS representa a integralização temporal das taxas de perda de solo instantâneas.

Estes resultados demonstram que as hastes sulcadoras proporcionaram maior desagregação de material e, conseqüentemente, maior transporte de partículas de solo pela enxurrada, resultando, neste caso, em maior PTS do que na forma de semeadura sem hastes e apenas com discos (Figura 9a, 9b, 9c).

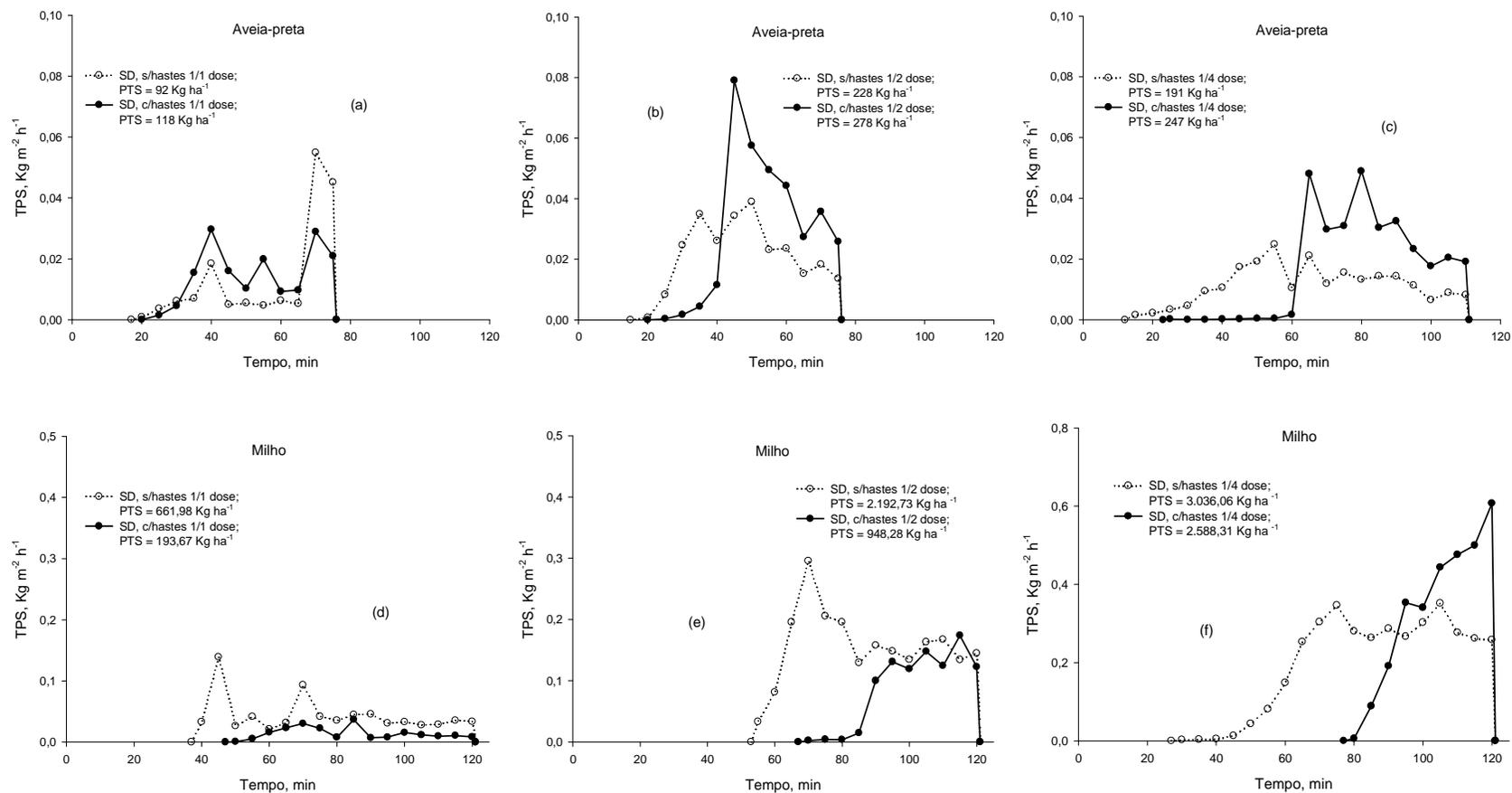


FIGURA 9. Distribuição temporal da taxa de perda de solo (TPS) e correspondente perda total da mesma (PTS), sob as intensidades e durações observadas das chuvas aplicadas, nas condições com o resíduo cultural de aveia e de milho, nos tratamentos estudados.

A distribuição temporal da taxa de perda de solo (TPS), na condição de resíduo cultural de milho (Figura 9d, 9e, 9f), apresentou magnitude e comportamento diferente do resíduo de aveia. O intervalo entre o início da chuva e da enxurrada foi maior, para as duas formas de semeadura, especialmente na menor dose de resíduo cultural (Figura 9f), em função da existência de diferenças no teor de água no solo antecedente as chuvas simuladas entre o ciclo de uma cultura e outra (Tabela 3).

A TPS foi, em geral, menor na condição com hastes sulcadoras, determinada principalmente pela menor taxa de descarga de enxurrada nesta condição (Figura 7d, 7e, 7f) e também pela menor concentração de sedimentos na porção inicial da enxurrada, nos tratamentos com 1/1 e 1/2 dose (Figura 8d, 8e), bem como pelo maior intervalo entre o início da chuva e enxurrada para o tratamento 1/4 dose (Figura 7f).

4.1.7. Tempo de início da enxurrada, lâmina de água da chuva retida e infiltrada na superfície do solo no período que o antecedeu, taxa constante de descarga da enxurrada (q_c), taxa constante de infiltração de água no solo (if_c) e coeficiente de enxurrada (C)

Estes resultados são apresentados nas tabelas 4 e 5 para o resíduo de aveia e milho, respectivamente. A intensidade de chuva simulada variou de 71,3 a 75,1 mm h⁻¹ e de 69,8 a 77,4 mm h⁻¹, no resíduo de aveia e milho, respectivamente. Isso demonstra que houve maior variação na intensidade da chuva para o resíduo de milho do que de aveia; tal variação foi de 10 e 5 % respectivamente na aveia e milho, o que, para estudos dessa natureza, pode ser considerada normal, tendo em vista a influência do número de equipamentos e de operações envolvidas na simulação das chuvas.

- Tempo de início da enxurrada e lâmina de água da chuva retida e infiltrada na superfície do solo no período que o antecedeu

Analisando os dados das tabelas 4 e 5, verifica-se que o tempo de início da enxurrada (T_i) foi maior na semeadura com hastes do que sem hastes, tanto para o resíduo de aveia quanto para o de milho, mas, com maiores valores sob o milho. No que se refere à dose de resíduo, verifica-se que os valores de T_i aumentaram com a diminuição da mesma na semeadura com hastes e

variaram pouco e de forma irregular na sem hastes, em ambos os tipos de resíduo. Na condição sem hastes, os menores valores estiveram sempre associados à menor dose (1/4 do total produzido ou 1,3 e 2,0 Mg ha⁻¹), respectivamente para aveia e milho e, os maiores, à dose intermediária (1/2 do total produzido ou 2,6 e 4,0 Mg ha⁻¹), respectivamente para aveia e milho.

TABELA 4. Valores de alguns atributos de erosão hídrica, avaliados durante a aplicação das chuvas simuladas, na situação com o resíduo cultural de aveia preta, nos tratamentos estudados

Tratamento	i ¹	Ti ²	LAPE ³	q _c ⁴	If _c ⁵	C ⁶	TPS ⁷
	mm h ⁻¹	min	mm	.....mm h ⁻¹			kg ha ⁻¹ h ⁻¹
SD ⁸ , s/hastes, 1/1 dose	71,3	17	20	47	24	0,66	232
SD, s/hastes, 1/2 dose	72,6	15	18	49	24	0,67	177
SD, s/hastes, 1/4 dose	75,1	12	15	42	33	0,56	105
SD, c/hastes, 1/1 dose	71,3	20	24	35	36	0,49	172
SD, c/hastes, 1/2 dose	72,6	20	24	37	36	0,51	365
SD, c/hastes, 1/4 dose	75,1	23	29	17	58	0,23	239

¹i=intensidade real da chuva aplicada. ²Tempo de início da enxurrada. ³Lâmina de água da chuva retida e infiltrada na superfície do solo no período pré-enxurrada. ⁴Taxa constante de descarga da enxurrada. ⁵Taxa constante de infiltração de água no solo. ⁶Coefficiente de enxurrada. ⁷Taxa de perda de solo. ⁸Semeadura direta.

TABELA 5. Valores de alguns atributos de erosão hídrica, avaliados durante a aplicação das chuvas simuladas, na situação com o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados

Tratamento	i ¹	Ti ²	LAPE ³	q _c ⁴	if _c ⁵	C ⁶	TPS ⁷
	mm h ⁻¹	min	mm	.....mm h ⁻¹			kg ha ⁻¹ h ⁻¹
SD ⁸ , s/hastes 1/1 dose	77,4	37	48	50	27	0,64	350
SD, s/hastes 1/2 dose	69,8	53	62	30	40	0,43	1.395
SD, s/hastes 1/4 dose	74,9	27	34	42	33	0,56	2.503
SD, c/hastes 1/1 dose	77,4	43	56	15	62	0,19	111
SD, c/hastes 1/2 dose	69,8	67	71	22	48	0,31	140
SD, c/hastes 1/4 dose	74,9	77	96	15	60	0,20	5.276

¹i=intensidade real da chuva aplicada. ²Tempo de início da enxurrada. ³Lâmina de água da chuva retida e infiltrada na superfície do solo no período pré-enxurrada. ⁴Taxa constante de descarga da enxurrada. ⁵Taxa constante de infiltração de água no solo. ⁶Coefficiente de enxurrada. ⁷Taxa de perda de solo. ⁸Semeadura direta.

Os maiores valores de Ti na semeadura com hastes são explicados pela maior rugosidade superficial (Tabela 3), o que favoreceu a infiltração e a retenção superficiais de água da chuva, tanto no resíduo de aveia quanto de milho. Isto evidencia o efeito positivo da haste na semeadora, quanto a conservação do solo e da água das terras cultivadas, como também verificado por Allmaras et al. (1966), Burwell et al. (1966), Cogo (1981), Castro et al.

(2006), Bertol et al. (2007b), entre outros. As diferenças nos valores de T_i entre os dois tipos de resíduo cultural podem ser explicadas pelo teor de água no solo antecedente às chuvas; para o resíduo de milho a rugosidade era um pouco menor do que para o de aveia (Tabela 3), devido o solo normalmente estar mais seco no período de verão do que de inverno. Assim, o T_i foi maior para o resíduo de aveia do que milho. Quanto às diferenças nos valores de T_i entre as doses de resíduo cultural, elas também estiveram associadas à rugosidade superficial do solo, podendo ser explicadas pelas mesmas razões apresentadas na explicação das diferenças entre os valores do seu índice, conforme se observa na tabela 3.

No que diz respeito à lâmina de água da chuva infiltrada e retida na superfície do solo no período pré-enxurrada (LAPE), seu comportamento foi idêntico ao do tempo de início da enxurrada; isto é explicado pela inter-relação dessas duas variáveis, dispensando comentários adicionais a respeito em relação ao que já foi abordado para o tempo de início da enxurrada no parágrafo anterior.

Entretanto, é importante chamar a atenção aqui para a aplicação prática desses resultados, tendo em vista que as plantas necessitam de uma quantidade mínima de água para seu desenvolvimento normal e rentável. Para isso, essencialmente buscam água no solo por meio de suas raízes, adicionado ao fato de que a enxurrada ou perda de água da chuva também depende da quantidade desta última abstraída pelo sistema (solo em si e seus atributos de superfície). Assim, ao se analisar os resultados das tabelas 4 e 5, quanto ao suprimento de água para as plantas, verifica-se que todos os valores de LAPE no período pré-enxurrada seriam suficientes para garantir o desenvolvimento normal e rentável das culturas que nele estivessem crescendo. Também seriam suficientes para revigorá-las quando sob situações de déficit hídrico, eis que o menor deles se situou ao redor de 15 mm, uma quantidade de água ou chuva que, indiscutivelmente, já pode ser considerada adequada para crescimento vegetal.

- Taxa constante de descarga da enxurrada (q_c), taxa constante de infiltração de água no solo (if_c) e coeficiente de enxurrada (C)

Estes resultados encontram-se nas tabelas 4 e 5, respectivamente para o resíduo de aveia e milho. A taxa constante de enxurrada (q_c) foi em geral maior na aveia do que no milho, independentemente da dose de resíduo cultural. Além disso, esta variável foi superior na semeadura sem hastes, tanto para o resíduo de aveia quanto de milho, porém, com diferenças mais marcantes no milho, entre as duas formas de semeadura.

As diferenças entre os dois tipos de resíduo podem ser explicadas, pelo maior teor de água no solo antecedente as chuvas simuladas na aveia, conforme observado para diferença de T_i . Assim, a quantidade de enxurrada foi maior para o resíduo de inverno do que de verão, decorrente de variações climáticas, especialmente no que se refere à diferença no teor de água no solo.

A menor influência da dose de resíduo cultural sobre o valor de q_c refere-se às mesmas já reportadas, quando se discutiu a variação temporal da taxa de descarga de enxurrada. Entretanto, denota-se que a taxa de descarga no ponto de equilíbrio da mesma tendeu a ser menor no tratamento 1/4 dose, especialmente na condição com hastes. Isto pode ser atribuído ao efeito combinado da rugosidade superficial e cobertura por resíduo cultural que reduziram o T_i , em função da maior infiltração e retenção superficiais de água no solo, conseqüentemente reduzindo o valor de q_c . Dessa forma, nas doses maiores, o efeito combinado das duas condições de superfície em questão aconteceu em menor grau. Isto refletiu em valores altos de q_c , mesmo nas maiores doses de resíduo cultural, especialmente na aveia. Decorrente disso, as mesmas explicações dadas para as diferenças no valor de q_c explicam as diferenças encontradas entre os tratamentos, para infiltração de água constante no solo (if_c), tendo em vista que as variáveis são interdependentes.

Do ponto de vista de aplicação prática destes resultados, destaca-se o valor do coeficiente de enxurrada (C). Esta variável, adimensional, é obtida pela relação entre q_c e l_c , a qual é utilizada como ferramenta auxiliar no dimensionamento de obras hidráulicas de drenagem, baseadas na taxa de descarga da enxurrada esperada para determinada área (Schwab, et al., 1981). Assim, verifica-se que o valor de C variou de 0,23 a 0,67 e de 0,19 a 0,64, para

o resíduo de aveia e milho, respectivamente. Isso demonstra a similaridade nos valores entre os dois tipos de resíduo cultural, quanto ao seu efeito sobre C. Entretanto, conforme observado para q_c , os valores de C também foram maiores na condição com resíduo de aveia do que de milho, principalmente na condição sem hastes sulcadoras. Dessa forma, a semeadura com hastes reduziu o coeficiente de escoamento em 35 % e 57 %, para aveia e milho, respectivamente. Com isso, verifica-se que a taxa de descarga da enxurrada, esperada para condição sem hastes foi maior do que para com hastes, independentemente do tipo de resíduo cultural. Além disso, a maior quantidade de resíduo na superfície em geral não correspondeu ao menor valor do coeficiente C; isto demonstra que é necessário haver uma combinação de operações agrícolas no solo que propiciem a criação de rugosidade superficial e a manutenção de resíduos culturais na superfície.

4.1.8. Perdas totais de água e solo

Os resultados dessas variáveis são apresentados nas figuras 10 e 11, para os dois tipos de resíduo cultural estudados. Para tanto, faz-se necessário informar que para permitir a comparação das referidas variáveis, entre os tratamentos, fez-se o ajuste dos dados, corrigindo os mesmos para intensidade de chuva de 75 mm h^{-1} e duração de 1,5 h, bem como, o ajuste das perdas de solo para declividade média das parcelas $0,16 \text{ m m}^{-1}$, conforme descrito na seção 3.7. em material e métodos.

A perda total de água da chuva na forma de enxurrada (PTA – Figuras 10a e 11a), foi maior na semeadura realizada sem hastes do que com hastes, tanto na condição com o resíduo de aveia quanto de milho; entretanto, foi um pouco maior na primeira, independentemente da dose de resíduo cultural, diferentemente do ocorrido com o Ti e com a LAPE (Tabelas 4 e 5). Observa-se ainda nas figuras 10a e 11a que, de modo geral, os valores de PTA tenderam a diminuir com a redução da dose de resíduo, tanto para o de aveia quanto para o de milho, mas, mais acentuadamente no primeiro.

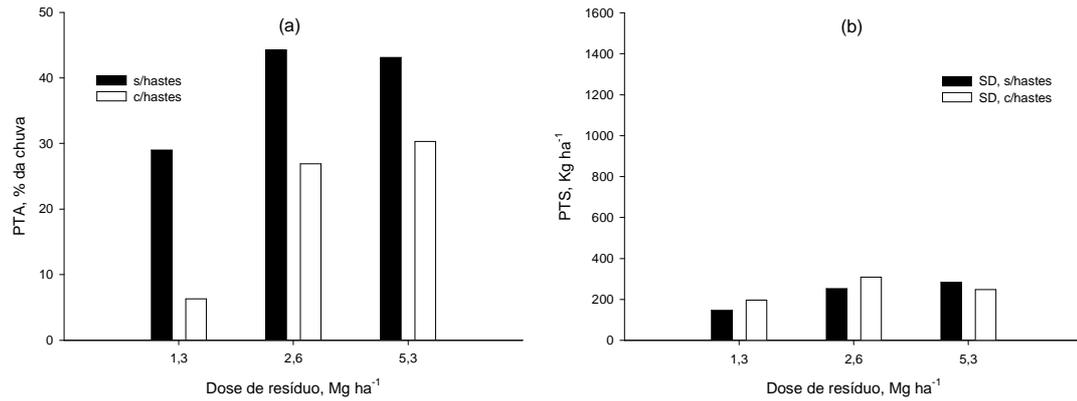


FIGURA 10. Perda total de água (PTA - a) e perda total de solo (PTS - b) na condição com o resíduo cultural de aveia preta, nos tratamentos estudados.

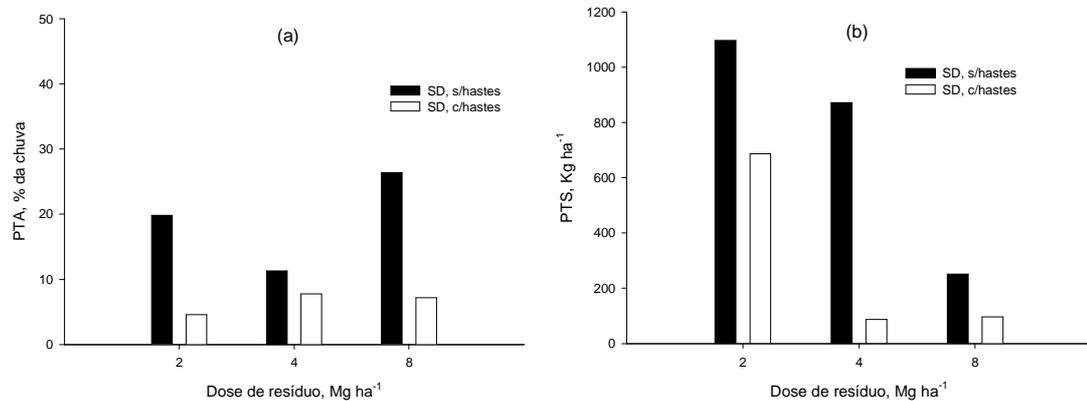


FIGURA 11. Perda total de água (PTA - a) e perda total de solo (PTS - b) na condição com o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.

Em relação à perda total de solo pela erosão (PTS), na condição com o resíduo de aveia (Figura 10b) ela variou muito pouco, tanto entre as formas de semeadura quanto entre as doses de resíduo, com valores relativamente baixos em todas elas.

Na condição com o resíduo de milho (Figura 11b), a PTS variou expressivamente na semeadura sem hastes, com valores relativamente altos e aumento dos mesmos com a redução da dose de resíduo cultural. Na condição de semeadura com hastes para o resíduo de milho, a variação foi pequena, com valores relativamente baixos, similares aos da condição com o resíduo de

aveia, exceto o tratamento 1/4 da dose com hastes, que apresentou valor alto, comparado aos demais tratamentos (Figuras 10b e 11b).

A diferença de valores na PTA entre os dois tipos de resíduo (maiores para o de aveia do que para o de milho) podem ser explicadas pelo teor de água no solo antecedente às chuvas simuladas aplicadas em um e outro ciclo e pelo tipo de resíduo. O solo no experimento apresentava-se um pouco mais seco por ocasião da realização dos testes de chuva com o resíduo de milho do que de aveia (Tabela 3), em função dos ciclos característicos dessas culturas, ou seja, de primavera-verão e de outono-inverno, respectivamente. Isto resultou em maior LAPE para o primeiro tipo de resíduo referido do que para o segundo e, em decorrência, menor perda total de água da chuva na forma de enxurrada em tal ciclo. Em adição, a morfologia dos dois tipos de resíduo cultural difere muito entre um e outro, principalmente quanto ao tamanho das peças, em especial o diâmetro médio dos colmos, bem maiores no de milho do que de aveia. Isto fez com que a água das chuvas aplicadas fosse abstraída pelo sistema em maior quantidade no milho do que na aveia; por isso, a enxurrada encontrou maior dificuldade para escoar na superfície do solo no milho, concordando com os resultados obtidos por Alberts & Neibling (1994) em estudo de mesma natureza. Esses autores observaram maior eficácia de redução da enxurrada pelo resíduo cultural de milho do que pelos de sorgo e de soja. Da mesma forma, Volk et al. (2004), em estudo também similar a este, exceto que sobre um solo Argissolo Vermelho Distrófico típico, observaram que a maior perda total de água da chuva na forma de enxurrada ocorreu na condição com o resíduo cultural de aveia preta do que na com o de milho.

No que se refere às diferenças nos resultados de PTA entre as formas de semeadura, podem ser explicadas pela rugosidade superficial do solo induzida pela operação de semeadura, a qual foi maior com hastes sulcadoras do que sem hastes (Tabela 3) e, por esta razão, permitiu maior infiltração e retenção superficiais de água da chuva e, principalmente nas menores doses de ambos os resíduos, conforme também observado por Burwell et al. (1966), Cogo (1981) e Castro et al. (2006). Assim, a maior PTA na semeadura realizada sem hastes foi devido sua relativamente pequena rugosidade superficial na condição de máquina sem “facões”, pois, esta condição resultou em menor rugosidade superficial do solo, mesmo nas maiores doses de

resíduo cultural (Tabela 3), concordando com os resultados de Dissmeyer & Foster (1981), Cogo (1981), Bertol (1995), Streck & Cogo (2003), Schick et al. (2000), Volk et al. (2004), Castro et al. (2006) e Amaral et al. (2008).

A menor PTS observada na condição com o resíduo de aveia, comparada à de milho (respectivamente Figuras 10b e 11b), provavelmente se deveu a motivos associados, como segue. A agregação do solo sob a aveia parece ter sido melhor do que sob o milho, em função dos seus maiores valores de DMP de agregados (Tabela 1) e maiores valores de cobertura e rugosidade superficiais do solo (Tabela 3), resultando em uma superfície do solo mais resistente à ação dos agentes erosivos. Em adição, as condições na linha e nas entrelinhas em um e outro tipo de resíduo cultural foram diferentes, com maior espaçamento para o milho do que para a aveia, o que pode ter favorecido a concentração e a velocidade da enxurrada na condição com o resíduo de milho. Esses fatos levam a crer que, para a região do estudo, o solo apresenta certa sazonalidade no que se refere a sua resistência à erosão hídrica, em função dos tipos de cultura que são cultivados em uma e outra estação e das condições climáticas dominantes em cada uma delas.

A quase que total ausência de diferença nos valores de PTS entre as formas de semeadura e as doses do resíduo de aveia (Figura 10b), pode ser explicada pela relativamente pequena diferença nos valores de cobertura e rugosidade superficiais do solo nessa situação (Tabela 3). Já as marcantes diferenças observadas na PTS entre as doses de resíduo de milho na condição de semeadura sem hastes (Figura 11b), provavelmente se deveu à relativamente acentuada redução na percentagem de cobertura do solo com a diminuição da dose (Tabela 3). Este último fato também ocorreu na semeadura efetuada com hastes sulcadoras, entretanto sem causar diferenças na PTS entre as doses de resíduo e com todos os seus valores sendo relativamente pequenos e próximos entre si, exceto para menor quantidade de resíduos.

Em resumo, o comportamento dos dados aqui comentados fundamentalmente se deveu às condições físicas de superfície do solo determinadas pelos tratamentos aplicados, as quais agiram de forma inter-relacionada, sobressaindo-se a quantidade, tipo e equivalente percentagem de cobertura dos resíduos culturais, rugosidade superficial do solo induzida pela operação de semeadura e rugosidade hidráulica resultante da combinação das

mesmas, as quais foram determinantes das perdas totais de água e solo em cada situação criada na pesquisa, conforme também comentado por Mannering & Meyer (1963), Wischmeier (1973), Cogo (1981), Cogo et al. (1983 e 1984), Norton et al. (1985), Carvalho et al. (1990), Alberts & Neibling (1994), Bertol et al. (1997), Schick et al. (2000), Volk & Cogo (2004 e 2008), Amaral et al. (2008), entre outros.

Embora a perda total de solo ocorrida em algumas situações da presente pesquisa tenha sido baixa, chama-se atenção para o fato de que as mesmas foram originadas de um comprimento de rampa muito curto (11 m), comparado aos comprimentos normalmente encontrados em lavouras agrícolas. Assim, conforme bem abordado por Cogo et al. (2003), e considerando que a perda de solo por unidade de área é proporcional ao comprimento do declive elevado ao expoente médio de 0,5, podendo variar de 0,2 a 0,6, provavelmente alguns valores baixos de perda total de solo observados neste trabalho se converteriam em valores altos em situações comuns de lavoura, até podendo ultrapassar em várias vezes o valor de tolerância de perda de solo por erosão estabelecido para o solo em questão ($9,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, segundo Bertol & Almeida, 2000). Outra questão importante a ser levantada, é que os tratamentos estudados no presente trabalho irão apresentar eficácia completa de redução da erosão hídrica até um determinado limite de comprimento de rampa, denominado de comprimento crítico de declive para redução da erosão hídrica em preparos conservacionistas de solo (Foster et al., 1982), a partir do qual a enxurrada poderá adquirir volume e velocidade suficientes para remover os resíduos culturais da superfície do solo, aumentando as taxas de erosão a partir daquele ponto. Há também que se considerar que os limites de perda de solo por erosão, estabelecidos pela pesquisa com o fim de manter a capacidade produtiva do solo para garantir um bom rendimento das culturas, não são os mesmos a serem usados para garantir a preservação do ambiente. Isto porque, na água e nos sedimentos da enxurrada poderão estar presentes substâncias químicas nocivas (dissolvidas ou adsorvidas às partículas sólidas), como o nitrogênio e o fósforo, agravando o processo de eutrofização e, assim, comprometendo mais ainda a qualidade dos recursos hídricos fora do local de origem da erosão.

Na seqüência serão discutidos os aspectos relacionados aos comprimentos críticos de declive para eficácia completa de redução da erosão hídrica, determinados pela combinação de quantidade de resíduo e forma de execução da operação de semeadura direta; tal discussão complementarará a seção resultados e discussão da presente pesquisa, especialmente para a condição de resíduo cultural de milho.

4.2. Parte 2 – Limites críticos de comprimento de declive sob três doses de resíduo cultural e dois modos de semeadura direta

4.2.1. Fluxos extras de água adicionados nas parcelas experimentais e equivalentes comprimentos de declive

Considerando o objetivo principal deste estudo (investigação de limites críticos de comprimento de declive para fins de controle da erosão hídrica), o que mais interessa no mesmo, num primeiro momento (outras ocorrências afins serão tratadas mais tarde), de tudo o que esteve relacionado com as entradas e saídas de água nas parcelas experimentais ou fluxos hídricos operantes no processo, provenientes das chuvas simuladas aplicadas e dos fluxos extras de água adicionados, são os comprimentos de declive que foram simulados na pesquisa. Esclarecendo um pouco mais isso, os comprimentos de declive equivalentes às quantidades de água que foram adicionadas nas parcelas experimentais, em adição a das chuvas simuladas, como se fossem diferentes quantidades de enxurrada aportando o último segmento de 11 m (extensão da parcela experimental) de um declive com comprimento, cada vez, maior, em função dos crescentes níveis de fluxo extra de água que foram aplicados. Assim, o detalhamento dos fluxos hídricos que operaram no processo foi todo registrado nos apêndices (Apêndices 4 a 9), limitando-se aqui no texto apenas à apresentação e discussão dos comprimentos equivalentes de declive, calculados com base nas taxas dos referidos fluxos extras de água e nas taxas de descarga da enxurrada que foram observadas na sua condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação somente das chuvas simuladas. Tais taxas de fluxo extra de água, entretanto, neste estudo, conforme relatado no material e métodos, por problemas ocorridos com o equipamento utilizado no suprimento de água para tal propósito (a idéia era fazer uma curva de calibração única e apropriada com esse equipamento, para ser usada como base ou padrão de

comparação em todo o estudo), também foram obtidas por cálculo. Para isso, diminuíram-se as taxas de descarga da enxurrada que foram observadas na sua condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação somente das chuvas simuladas, das taxas de descarga da enxurrada que foram observadas durante a aplicação das chuvas simuladas junto à adição dos níveis de fluxo extra de água, conforme também relatado no material e métodos. Esse procedimento prejudicou a comparação, principalmente direta, dos resultados obtidos, tanto entre os tratamentos da pesquisa quanto entre os intervalos de classe dos fluxos extras que foram usados na mesma. Isto porque, tal procedimento, resultou em diferenças consideráveis nas taxas dos fluxos extras que foram adicionados na cabeceira das parcelas experimentais ou em cada tratamento, bem como em diferenças consideráveis nos valores dos intervalos de classe de cada um deles, conforme pode ser visto na figura 12. Essas diferenças se tornam bem mais evidentes quando são observados os comprimentos equivalentes de declive que foram calculados com base nos fluxos extras de água que foram adicionados nas parcelas experimentais, o que será visto e discutido um pouco mais tarde. Por oportuno, esclarece-se que os resultados da curva de calibração do equipamento utilizado no suprimento de água aos fluxos extras, apresentados na figura 12, junto com os demais resultados da pesquisa, têm apenas fins informativo, tendo em vista que não foram utilizados no estudo. Conforme o plano original que se tinha em mente, era para terem sido usadas quantidades padronizadas únicas, e intervalos de classe iguais, de fluxos extras de água em todos os tratamentos, mas, infelizmente, para isso o equipamento de suprimento de água para esse propósito não funcionou bem. Assim, em função dessa ocorrência (adversa quanto a um dos objetivos do estudo em consideração), a qual restringiu a comparação direta dos resultados obtidos, não foi possível precisar o quanto das diferenças observadas nesse estudo se deveu às taxas e intervalos de classe desiguais dos fluxos extras, e o quanto se deveu aos seus tratamentos em si. Apesar disso, ressalta-se que o propósito maior (global) da investigação - averiguação do processo de falha do resíduo cultural ou da existência de limites críticos de comprimento de declive em diferentes situações (predeterminadas, mas perfeitamente passíveis de ocorrerem no campo) - não foi prejudicado. De qualquer forma, solicita-se

cautela na interpretação e na comparação dos resultados obtidos, para evitar possíveis equívocos e/ou, mesmo, erros no seu trato.

Continuando, e complementando, a análise dos resultados da figura 12, verifica-se que as taxas de fluxo extra de água que foram adicionadas na cabeceira das parcelas experimentais ou nos tratamentos da pesquisa variaram de, aproximadamente, $0,35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, a, pouco menos de, $2,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, com amplitude média aproximada de variação entre os tratamentos de $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$. De fato, não há reparos ou comentários a fazer a respeito desses resultados, uma vez que foi o que resultou do trabalho feito, embora fosse preferível que a ocorrência (adversa) relatada acima não tivesse acontecido. Assim, o que resta a fazer, é reforçar o pedido de atenção na interpretação e comparação dos resultados entre os tratamentos, pelo fato de os mesmos terem sido submetidos a cargas hidráulicas diferentes e, por conseguinte, diferentes quantidades de energia erosiva, com respostas à erosão, muito provavelmente, também diferentes.

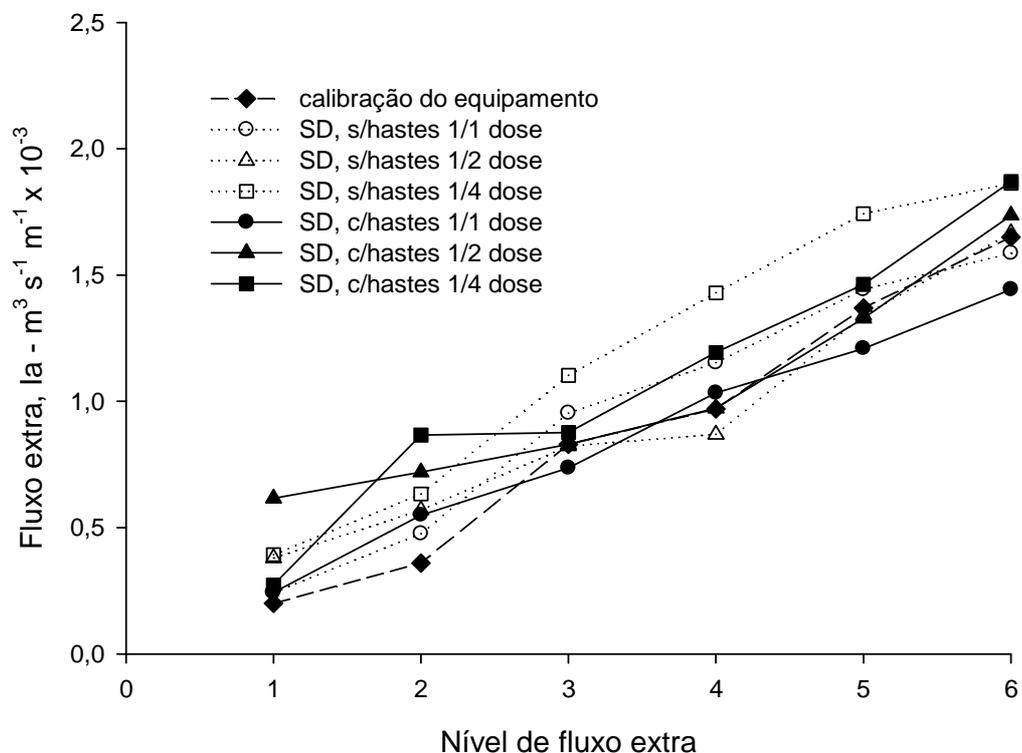


FIGURA 12. Taxas dos fluxos extras de água adicionados nas parcelas experimentais (la), em cada um dos seus níveis, sobre o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.

Na figura 13 são apresentados os resultados dos comprimentos equivalentes de declive obtidos na pesquisa (L_e), calculados com base nas taxas dos fluxos extras que foram adicionados nas parcelas experimentais (I_a), as quais também foram obtidas por cálculo, como mencionado, e nas taxas de descarga da enxurrada que foram observadas na sua condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação somente das chuvas simuladas (q_c), segundo a equação $L_e = I_a / q_c L + L$, em que L é o comprimento da parcela experimental (11 m). Lembra-se que os resultados da curva de calibração do equipamento utilizado no suprimento de água aos fluxos extras apresentados na figura 13, juntamente com os demais resultados da pesquisa, são meramente para fins informativo. Analisando os dados na referida figura, observa-se que, para qualquer das doses do resíduo cultural (milho), os comprimentos equivalentes de declive (L_e) foram muito maiores no modo de semeadura com hastes sulcadoras (variação aproximada de 70 m a 460 m) do que no sem hastes sulcadoras (variação aproximada de 35 m a 200 m), com diferenças também entre as doses do resíduo em cada um deles, entretanto de modo desordenado ou irregular (sem tendência definida). Conforme relatado no início, observa-se na figura 13 ter havido expressiva variação também nos resultados dos intervalos de classe dos fluxos extras de água que foram adicionados nas parcelas experimentais, no que se refere tanto à (pretensa) curva de calibração do equipamento utilizado no suprimento de água aos mesmos, quanto às curvas dos tratamentos propriamente ditos, inclusive em alguns casos com resposta contrária ao esperado. Interrompendo por instantes a análise em andamento, relata-se que a linearidade das curvas de resposta constituintes da figura 13 é normal, tendo em vista que, neste estudo, houve interdependência (direta) dos comprimentos equivalentes de declive (L_e), obtidos por cálculo, com as taxas de fluxo extra de água que foram adicionadas às parcelas experimentais ou aos tratamentos da pesquisa (I_a) quando o solo já se encontrava saturado, as quais, neste estudo, devido aos problemas ocorridos com o equipamento utilizado no suprimento de água extra, também foram obtidas por cálculo (taxas totais globais de descarga da enxurrada – chuva simulada + mais fluxo extra – menos taxas de descarga da enxurrada na sua condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação somente das chuvas simuladas - q_c), conforme essas duas variáveis integram a fórmula de cálculo

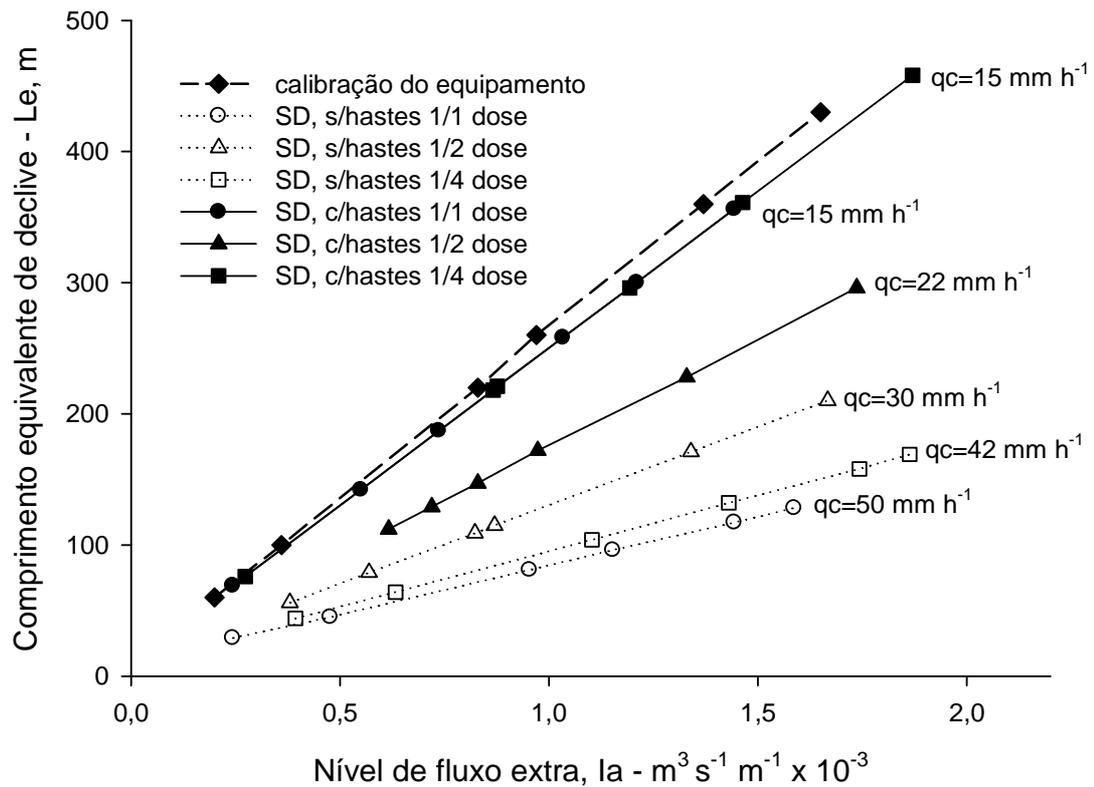


FIGURA 13. Comprimentos equivalentes de declive simulados na pesquisa (L_e), em função das taxas de fluxo extra de água que foram adicionadas nas parcelas experimentais (I_a), sobre o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.

$L_e = I_a/q_c L + L$, em que L é o comprimento da parcela experimental (11 m), como visto. A base para essa ocorrência (linearidade nas curvas de resposta de L_e em relação às variáveis integrantes da equação recém-referida), está no fato de que, sob a condição de solo saturado com água, que foi a situação do estudo, tudo o que entra no sistema solo e seus inerentes atributos físicos de superfície, e em não se fazendo alterações no mesmo ou mantendo ele em equilíbrio, em igual grau, e de imediato, sai. Prosseguindo a análise dos dados que, por instantes, havia sido interrompida, relata-se que os maiores comprimentos equivalentes de declive observados no modo de semeadura com hastes sulcadoras, comparados aos do sem hastes sulcadoras (Figura 13), se deveram às melhores condições físicas superficiais do solo na mesma para reter e infiltrar água da chuva, motivadas pela sua maior rugosidade superficial (Tabela 3), causada pelas referidas hastes, e, em decorrência, também maior

porosidade total da camada de solo que foi mobilizada. Esses fatos resultaram em taxas totais globais de descarga da enxurrada (chuva simulada+fluxo extra de água) que foram menores em tal modo de semeadura, o que pode ser comprovado pelos também menores valores da mesma na sua condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação somente das chuvas simuladas (q_c – Figura 13), tendo em vista o modo como esta última variável integra a equação usada no cálculo de comprimento equivalente de declive (L_e), vista anteriormente. Assim, observa-se na figura 13 que, quanto menor a taxa de descarga da enxurrada na sua condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação somente das chuvas simuladas (q_c) ou, de outro modo dizendo, quanto maior a taxa final ou básica de infiltração de água no solo, que foi o que ocorreu no modo de semeadura com hastes sulcadoras, comparada à do sem hastes sulcadoras, em qualquer das doses de resíduo cultural, maior também será a quantidade de água a ser adicionada ou maior o nível de fluxo extra (I_a) necessário para provocar falha do resíduo cultural e, em decorrência, maior o comprimento equivalente de declive (L_e) em tal situação. No que se refere ao modo desordenado ou irregular (sem tendência definida) de influência das doses do resíduo cultural nos comprimentos equivalentes de declive, tanto no modo de semeadura sem quanto com hastes sulcadoras, não foi possível precisar o quanto se deveu a ocorrências reais (não sabidas e/ou não observadas e não detectadas) e o quanto se deveu às variações ao acaso e demais fontes de variação introduzidas no estudo (problemas com o equipamento de suprimento de água aos fluxos extras e erro experimental), mas, provavelmente, pesando muito a influência destas últimas. Isto porque, conforme revelam os resultados da figura 13, não só diferiram em grau alto, as taxas dos fluxos extras de água adicionados aos tratamentos, como também os valores dos seus intervalos de classe, devido aos problemas ocorridos com o equipamento utilizado no suprimento de água extra, conforme por várias vezes foi informado. Essa ocorrência, também já por várias vezes informada, lamentavelmente, prejudicou a comparação, principalmente direta, dos resultados entre os tratamentos e os níveis de fluxo extra de água. De qualquer forma, também repetindo o que já por mais de uma vez foi informado, isso não afetou o objetivo maior da pesquisa, pelo menos em grau que pudesse e, mesmo, eventualmente, possa vir comprometê-la. Isto porque a análise dos limites

críticos de comprimento de declive, para o fim principal a que se destina este estudo, se for o caso, pode muito bem ser feita por meio de comparações relativas e, com o exercício da lógica e o uso do bom senso, também em termos absolutos, embora fosse preferível efetuar todas as comparações possíveis nos mesmos termos como estes últimos.

4.2.2. Taxas de descarga da enxurrada a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água

Os resultados dessa avaliação são apresentados na figura 14. Analisando os dados nessa figura, verifica-se que as taxas de descarga da enxurrada, medidas ao final das parcelas experimentais a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água, portanto sendo compostas das suas taxas na condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação somente das chuvas simuladas, mais as taxas associadas aos fluxos extras de água ou taxas totais globais de descarga da enxurrada (q_t), variaram de modo desordenado ou irregular (sem tendência definida), porém sem grandes diferenças entre os tratamentos do estudo. Verifica-se também, na mesma figura, que os valores das referidas taxas de descarga, na sua integralidade, se situaram na faixa de 0,35 a $2,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1} \times 10^{-3}$, com amplitude média de variação entre os tratamentos um pouco menor do que $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1} \times 10^{-3}$, em magnitude crescente e, ao que tudo indica, no modo de resposta linear. De fato, esse último comportamento era o esperado, tendo em vista que, como mencionado, sob condição de solo saturado com água, que foi a situação do estudo, o que entra no sistema solo, e em não se fazendo alterações no mesmo ou mantendo ele em equilíbrio, em igual grau, e de imediato, sai, conforme dita a equação de continuidade para esse fim (aspectos hidrológicos), fundamentada no princípio da lei de conservação das massas. Verifica-se ainda na figura 14 que, em qualquer dos tratamentos, a distribuição temporal das taxas de descarga da enxurrada, de modo geral (considerando a natureza da pesquisa – sujeita a inúmeras variações ao acaso e, também, à considerável erro experimental), foi relativamente uniforme e coerente com os níveis de fluxo extra de água que foram aplicados, com três observações em cada um deles, efetuadas de três em três minutos. Esse fato evidencia que o procedimento em si, de adição dos

fluxos extras de água na cabeceira das parcelas experimentais, para simular a chegada ou o aporte de enxurrada nos últimos 11 m de um declive com comprimento, cada vez, maior, em princípio, resultou bem sucedido. Isto confere confiabilidade aos resultados calculados de comprimentos equivalentes de declive, baseados na simulação, os quais foram apresentados e discutidos no item anterior, em que pese, como mencionado, ter havido expressiva variação nas taxas dos fluxos extras de água que foram adicionados às parcelas experimentais ou aplicados nos tratamentos da pesquisa, além da variação observada nos valores dos seus intervalos de classe.

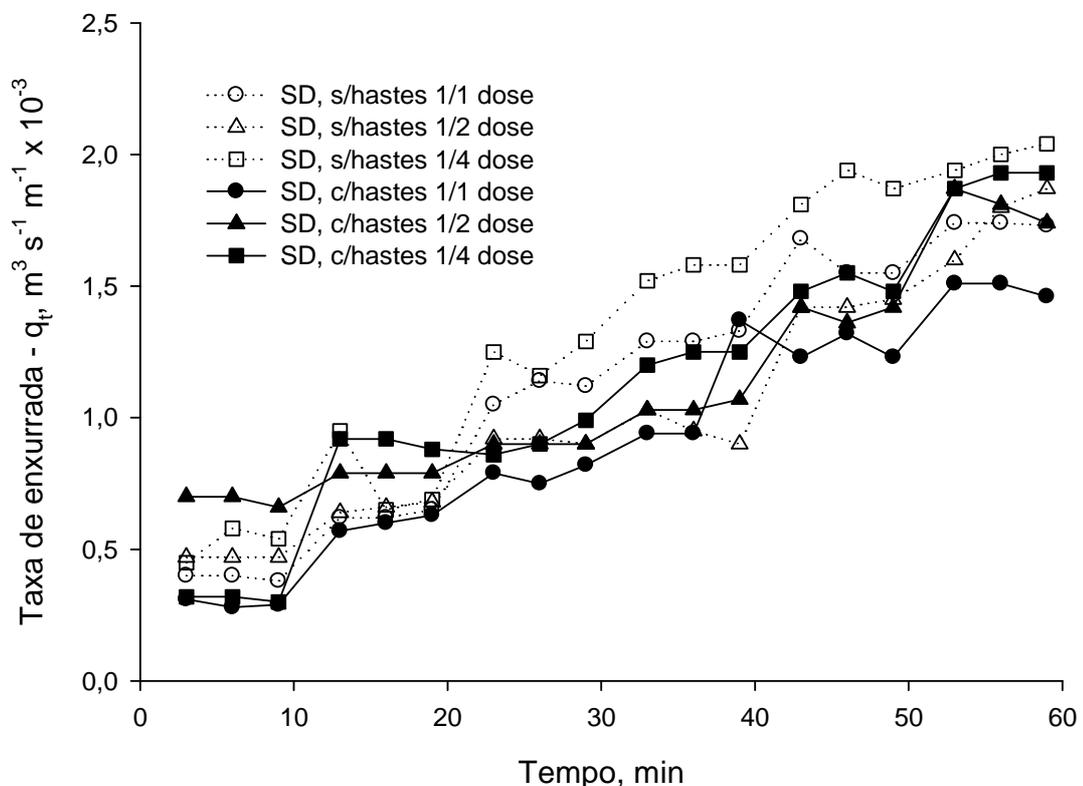


FIGURA 14. Distribuição temporal das taxas de descarga da enxurrada (q_t) a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água nas parcelas experimentais, sobre o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.

Quanto à influência, em si, dos tratamentos nas taxas totais globais de descarga da enxurrada (chuva simulada+fluxo extra de água), verifica-se na figura 14 que houve tendência dos seus valores serem sensivelmente maiores, e de crescimento mais rápido, naqueles com a menor dose de resíduo cultural (1/4 da quantidade total produzida), comparados aos com as doses maiores

(1/2 e 1/1 da quantidade total produzida), tanto no modo de semeadura sem hastes sulcadoras quanto no com hastes sulcadoras, bem como a tendência de serem sensivelmente menores neste último do que no primeiro. A tendência das taxas totais globais de descarga da enxurrada serem um pouco maiores e aumentarem mais rapidamente com o transcorrer do tempo sob a menor dose de resíduo cultural (em decorrência, também sob a menor percentagem de cobertura do solo – Tabela 3), pode ser explicada pelo fato de, normalmente, infiltrar menos água no solo e em taxa mais baixa sob tal condição, devido a menor resistência da sua superfície à ação erosiva da chuva e da enxurrada a ela associada. Quanto à tendência das taxas de descarga da enxurrada serem um pouco maiores na situação de semeadura com hastes sulcadoras, pode ser explicada pela considerável mobilização do solo na mesma, causada pelas referidas hastes, induzindo rugosidade superficial e, em decorrência, ganho de porosidade total na camada mobilizada do solo, o que favoreceu a retenção e a infiltração superficiais da água da chuva e, em decorrência, diminuiu as taxas totais globais de descarga da enxurrada. Há também que se considerar, nas diferenças dos resultados obtidos, a influência tanto da pesquisa em si (natureza complexa e de difícil realização) quanto das variações ao acaso e do erro experimental, os quais estão sempre presentes e, usualmente, em grau relativamente alto em estudos do tipo como este. Isto, entretanto, conforme mencionado, não prejudicou o propósito maior intencionado com a pesquisa.

4.2.3. Concentrações de sedimento na enxurrada a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água

Os resultados dessa avaliação, a qual denota a proporção das partículas desagregadas do solo sendo transportada na enxurrada (dominantemente em suspensão), são apresentados na figura 15 e suas subdivisões ou subfiguras, (15a a 15f). Analisando os dados nessas subfiguras (chama-se a atenção para a grande diferença numérica nos valores da escala usada no eixo do y ou na ordenada das referidas figuras), verifica-se que, de modo diferente ao observado com as taxas totais globais de descarga da enxurrada, variaram muito entre os tratamentos, ao mesmo tempo em que apresentando bem maior variação nos seus valores com o transcorrer do tempo, além de comportamentos também muito diferentes entre si, o que era esperado e é

normal, entretanto (lembra-se que esse fato também foi observado com as concentrações de sedimento na enxurrada que foram medidas durante a sua condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação somente das chuvas simuladas, conforme mostram os dados da Figura 8 da Parte 1 deste trabalho).

As observações expostas acima se deveram ao fato de os resíduos culturais superficiais, principalmente, mas também a rugosidade da superfície do solo, na sua condição de saturação com água, que foi a situação do estudo, ambos exercerem maior influência na carga de sedimentos que a enxurrada transporta do que nela própria, por constituírem barreira física ou obstáculo mecânico (ação de impedância) mais à primeira do que à segunda, efetivamente induzindo a deposição das partículas erodidas do solo no local de ocorrência do fenômeno e, praticamente, apenas diminuindo a velocidade da enxurrada, com pouca influência na sua quantidade total e taxa final de descarga. Assim, verifica-se na figura 15 que a magnitude das concentrações de sedimento na enxurrada foi menor no modo de semeadura sem hastes sulcadoras (variação de próximo a zero a aproximadamente $0,012 \text{ g g}^{-1}$ – Figuras 15a, 15b e 15c) do que no com hastes sulcadoras (variação de próximo a zero a aproximadamente $0,12 \text{ g g}^{-1}$ – Figuras 15d, 15e e 15f), e em ambos aumentou com a diminuição das doses de resíduo e tendeu a diminuir no tempo, exceto o tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras e metade da dose integral do resíduo cultural (SD c/hastes, 1/2 dose - Figura 15e), o qual teve sua concentração de sedimentos na enxurrada aumentada ao se aproximar do final da adição dos níveis de fluxo extra de água.

As maiores concentrações de sedimento na enxurrada no modo de semeadura com hastes sulcadoras, em qualquer das doses de resíduo cultural, se deveu ao fato de já existir no mesmo uma maior quantidade de partículas de solo desagregadas, prontamente disponíveis para o processo de transporte, originada da mobilização do solo pelas referidas hastes. Em adição, devido a esta última ocorrência, certamente foi bem mais fácil também a desagregação posterior das partículas do solo, tanto pela ação de impacto das gotas da chuva, quanto pela ação de cisalhamento da enxurrada, pelo fato das suas unidades estruturais tornarem-se menos resistentes à ação mecânica dos equipamentos utilizados na referida mobilização.

No que diz respeito ao das concentrações de sedimento na enxurrada com a diminuição das doses de resíduo cultural, em qualquer dos modos de semeadura, simplesmente se deveu a maior área de exposição do solo à ação da chuva ou menor percentagem de cobertura do mesmo, bem como a menor impedância à ação da enxurrada (menor quantidade de resíduo cultural na superfície do solo), o que também foi observado por Cogo et al. (1996), Bertol et al. (1997) e Morais & Cogo (2001) em estudos de natureza semelhante à deste, o do primeiro autor realizado nos Estados Unidos da América e os dos demais autores no Brasil (estado do Rio Grande do Sul). Quanto à tendência de diminuição das concentrações de sedimento na enxurrada com a adição dos níveis de fluxo extra de água, exceto um único caso, em que aumentou, é explicada pelo fato de, neste estudo, ao que tudo indica, o aumento nas taxas de desagregação e transporte de solo pela ação da chuva e da enxurrada a ela associada ter sido menor do que o verificado nas taxas de descarga desta última, no que se denomina de efeito de diluição de quantidades. Por fim, a maior variação nos resultados das concentrações de sedimento na enxurrada com o passar do tempo, comparada à verificada nos das suas taxas de descarga, inclusive num mesmo nível de fluxo extra de água, é explicada pelo fato de, basicamente, a desagregação e o transporte de solo ininterruptamente variarem com o transcorrer do processo erosivo, em função de suas maiores sensibilidades às mudanças provocadas na superfície do solo, mais do que varia o escoamento superficial nas mesmas condições, especialmente em se tratando de solo saturado com água, que foi a situação do estudo.

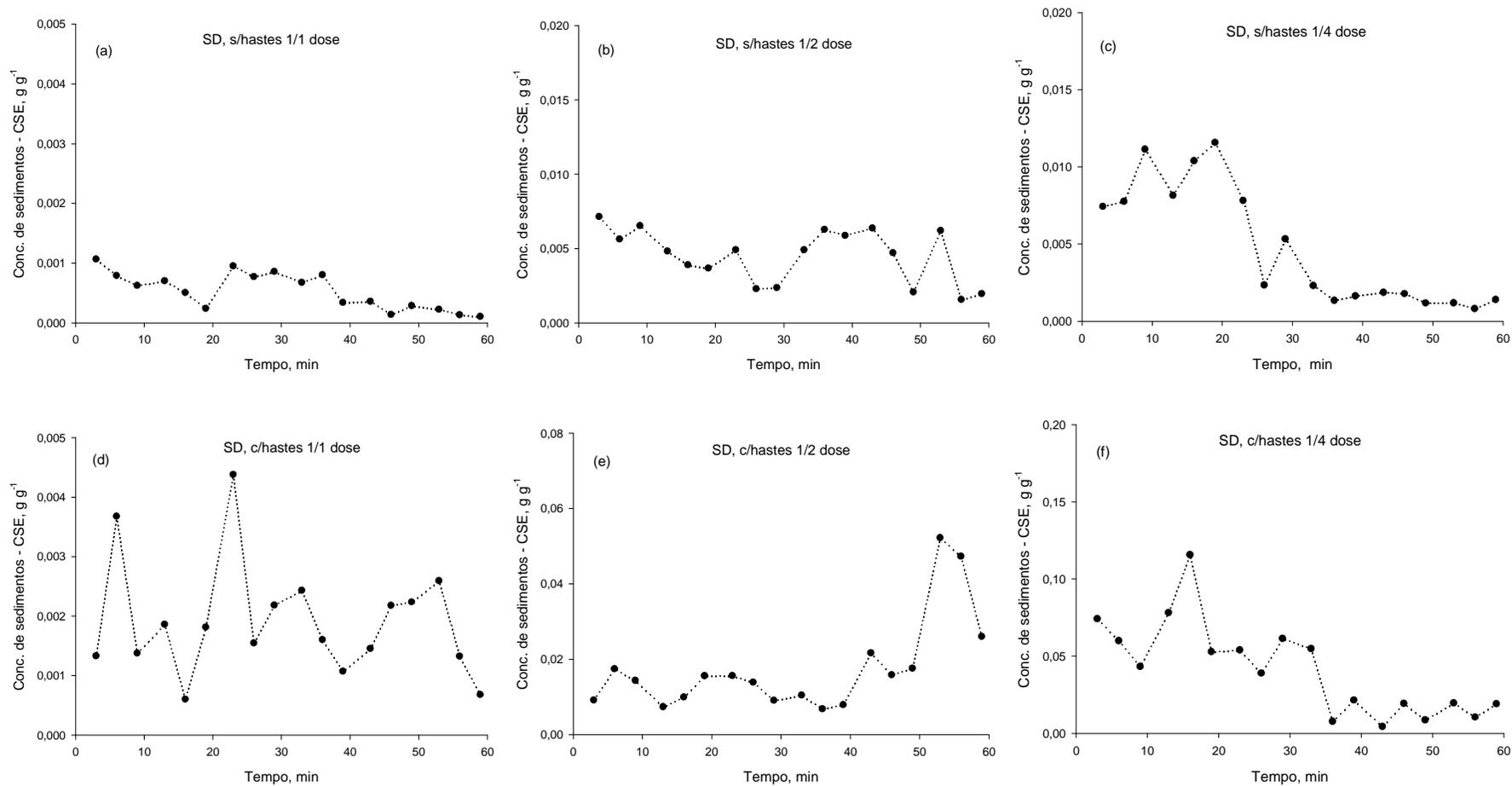


FIGURA 15. Distribuição temporal das concentrações de sedimento na enxurrada (CSE) a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água nas parcelas experimentais, sobre o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.

4.2.4. Taxas de erosão ou perda de solo a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água

Os resultados dessa avaliação, os quais foram obtidos multiplicando-se as taxas totais globais de descarga da enxurrada (Figura 14) pelas correspondentes concentrações de sedimento na mesma (Figura 15), são apresentados na figura 16 e suas várias subdivisões ou subfiguras (16a a 16f). Analisando os dados nessas subfiguras (novamente chama-se atenção para a grande diferença numérica nos valores da escala usada no eixo do y ou na ordenada das mesmas), verifica-se, praticamente em todos os aspectos e em todas as particularidades, comportamento muito parecido ao observado com as concentrações de sedimento na enxurrada, o que, na situação em análise, era esperado e é normal. Isto porque, conforme mencionado no início, as taxas de erosão ou perda de solo em pauta resultaram da multiplicação das taxas totais globais de descarga da enxurrada, as quais, praticamente, aumentaram linearmente com o aumento dos níveis de fluxo extra de água (condição de solo saturado), pelas suas correspondentes concentrações de sedimento, decorrendo, pois, um certo paralelismo entre a primeira e a última variável referidas. Assim, toda a discussão relacionada com as concentrações de sedimento na enxurrada, incluindo as diferenças entre tratamentos e seus comportamentos, pode, tal e qual, ser transferida para cá, na discussão dos resultados das taxas de erosão ou perda de solo, razão pela qual não se farão comentários adicionais a respeito. De qualquer forma, lembra-se que a variação observada nos resultados das taxas de erosão ou perda de solo ora sendo tratadas (sob a adição de fluxos extras de água), também foi observada nos resultados das taxas de erosão ou perda de solo medidas na condição de equilíbrio da enxurrada enquanto sob a aplicação somente das chuvas simuladas, conforme pode ser visto na figura 9, na Parte 1 deste estudo.

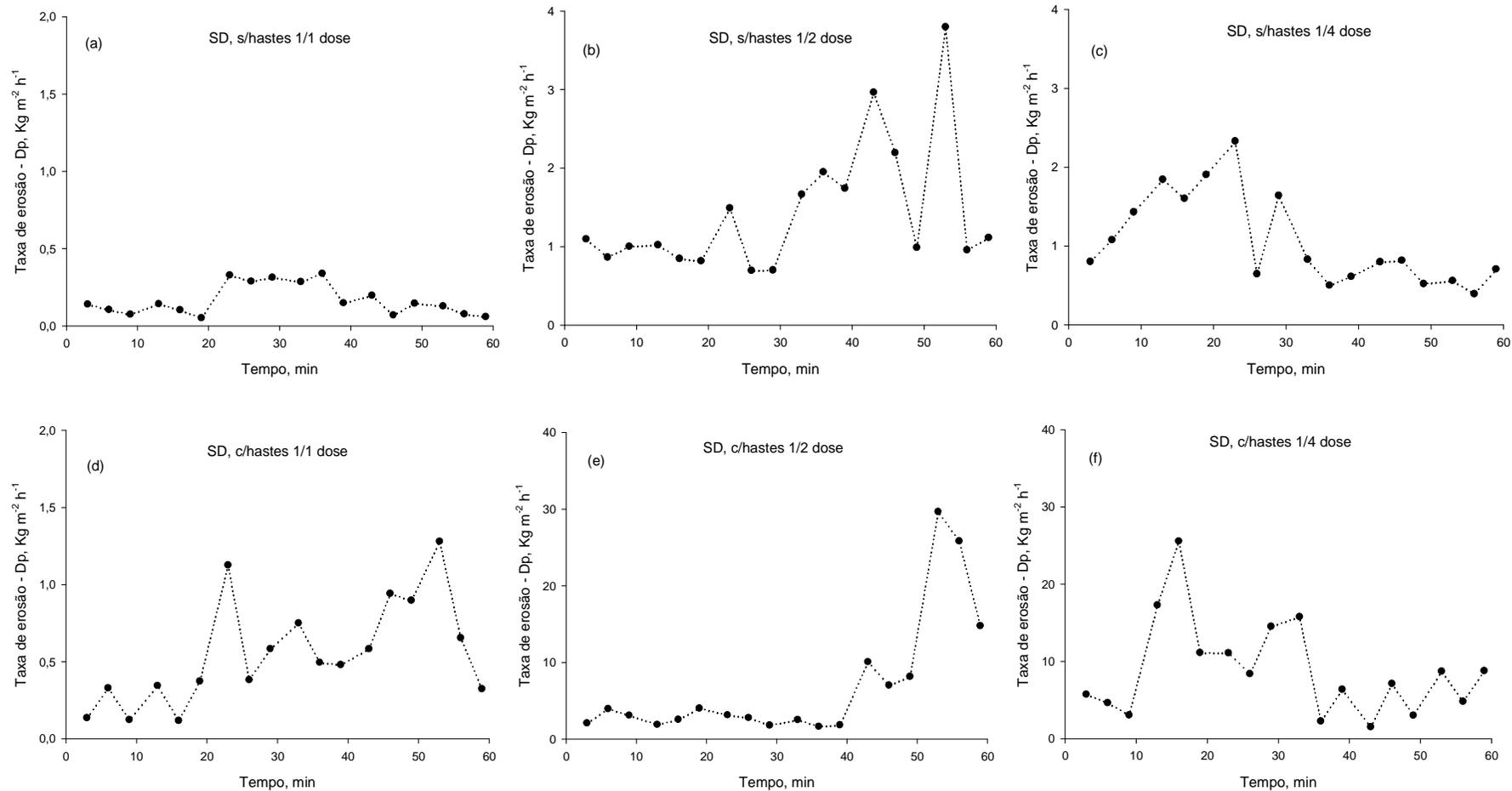


FIGURA 16. Distribuição temporal das taxas de erosão ou perda de solo (Dp) a partir da adição dos níveis de fluxo extra de água nas parcelas experimentais, sobre o resíduo cultural de milho, nos tratamentos estudados.

4.2.5. Análise preliminar do processo de falha do resíduo cultural ou da existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo

Com o intuito de, preliminarmente, verificar a ocorrência do processo de falha do resíduo cultural ou da existência de comprimentos críticos de declive no estudo, relacionaram-se os comprimentos equivalentes de declive obtidos na pesquisa (Le) com as concentrações de sedimento na enxurrada e suas correspondentes taxas finais de erosão ou perda de solo, cujos resultados são apresentados, respectivamente, nas figuras 17 e 18, com sua interpretação e discussão sendo efetuada a seguir.

Analisando primeiramente os resultados da relação dos comprimentos equivalentes de declive (Le) com as concentrações de sedimento na enxurrada (CSE – Figura 17), verifica-se que, exceto dois casos (semeadura direta com hastes sulcadores e metade e um quarto da quantidade total de resíduo cultural produzida – SD c/hastes, 1/2 e 1/4 dose), os quais se diferenciaram muito em magnitude e em comportamento, tanto entre si quanto em relação aos demais tratamentos, variaram pouco e tenderam a diminuir com o aumento dos valores de comprimento equivalente de declive (Le). A diminuição das concentrações de sedimento na enxurrada no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras e meia dose de resíduo cultural (SD c/hastes, 1/2 dose) até o comprimento equivalente de declive aproximado de 170 m e, então, bruscamente mudando para taxas maiores, é um indicativo forte de ter havido falha do resíduo cultural ou existido limite crítico de comprimento de declive nesse tratamento, a partir de tal distância no declive, conforme atesta a relação teórica de erosão desenvolvida por Foster et al. (1982a,b) para esse tipo de relacionamento, a ser apresentada um pouco adiante. De outro lado, a brusca mudança, para valores menores, das concentrações de sedimento na enxurrada no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras e um quarto da dose integral de resíduo cultural (SD c/hastes, 1/4 dose), ao redor do comprimento equivalente de declive de 210 m, foi um comportamento inesperado e estranho ao que se conhece do assunto, assim ficando o mesmo para ser esclarecido em pesquisas futuras. Por sua vez, a tendência de, nos demais tratamentos, as concentrações de sedimento na enxurrada diminuírem com o aumento do comprimento equivalente de declive, com pequenas diferenças nos seus valores, é um indicativo forte de que, nesses tratamentos,

não ocorreu falha do resíduo cultural ou não existiu limite crítico de comprimento de declive, como também atesta a relação teórica de erosão referida anteriormente para o tratamento cuja esta última ocorrência, em princípio, se concretizou. Tendo em vista que a relação mais apropriada para esse tipo de análise (averiguação do processo de falha do resíduo cultural) é aquela feita com as taxas de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais como sendo a variável independente, e a qual será apresentada e discutida adiante, em item específico, não mais serão feitos comentários da relação em pauta neste item dos resultados e discussão.

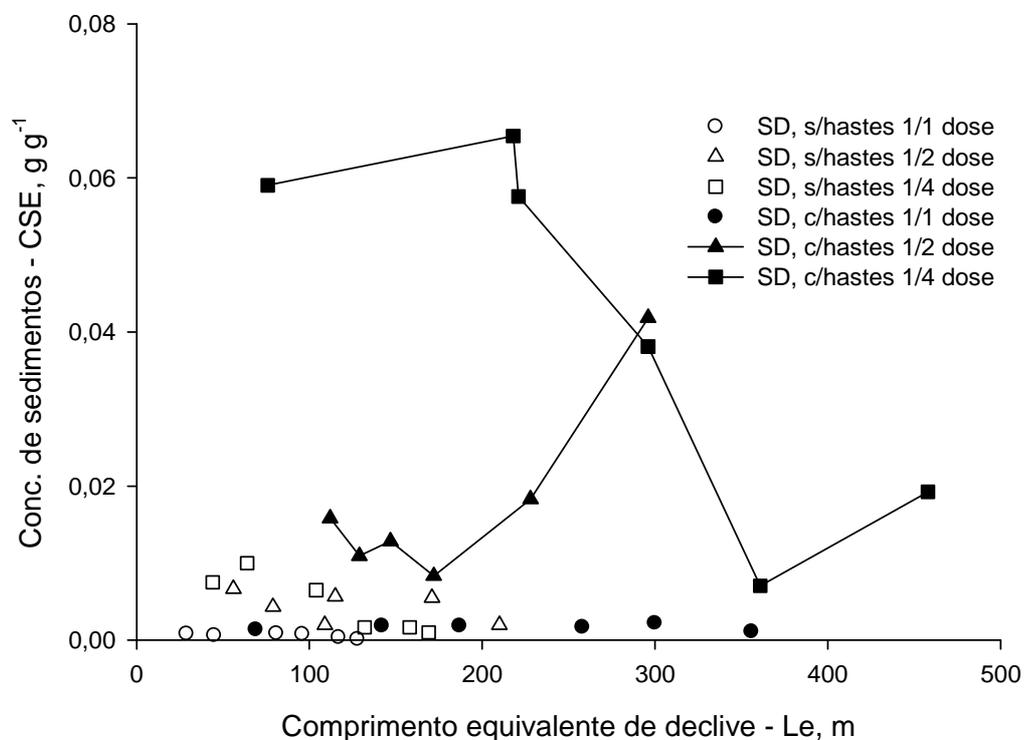


FIGURA 17. Concentração de sedimento na enxurrada (CSE) em função dos comprimentos equivalentes de declive simulados na pesquisa (Le), nos tratamentos estudados.

Analisando os resultados da relação dos comprimentos equivalentes de declive (Le) com as taxas de erosão ou perda de solo (D_p – Figura 18), verifica-se que, resguardadas as unidades de expressão e as magnitudes dos valores das variáveis envolvidas, se comportaram de modo parecido como na relação com as concentrações de sedimento na enxurrada, o que é normal em se tratando da situação em análise. Isto porque as taxas dos fluxos extras de água

que foram adicionados na cabeceira das parcelas experimentais (Ia), e a partir das quais foram calculados os comprimentos equivalentes de declive (Le), neste estudo, por problemas ocorridos com o equipamento utilizado no suprimento de água aos mesmos, como informado, também foram obtidas por cálculo, o que resultou na linearidade entre essas duas variáveis, conforme pode ser visto pelos resultados da figura 13, já apresentada e discutida.

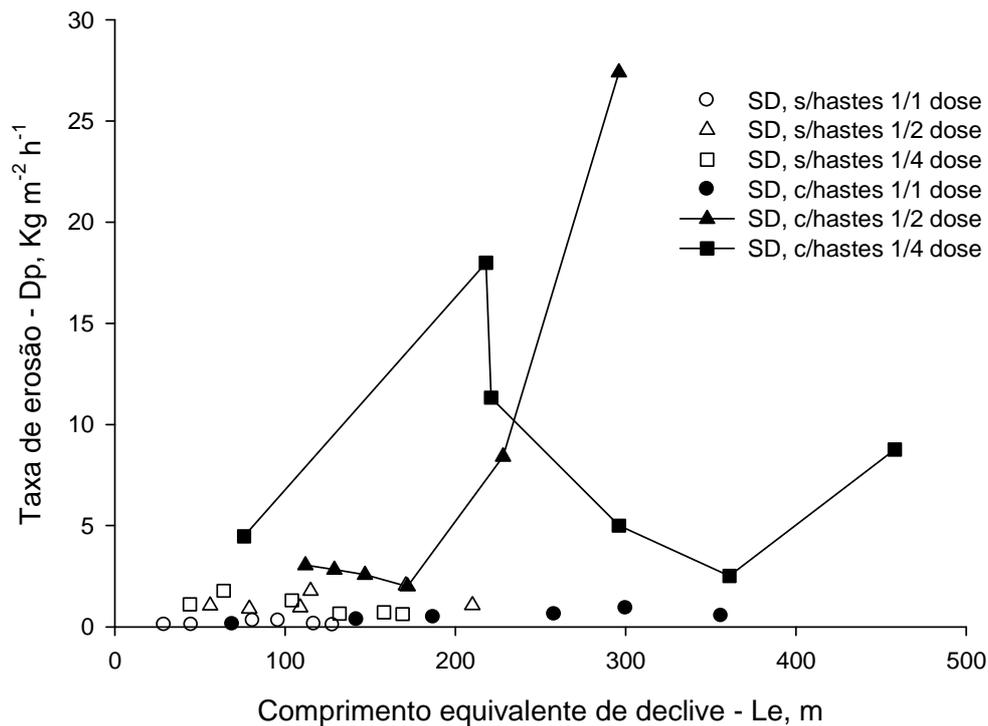


FIGURA 18. Taxas de erosão ou perda de solo (Dp) em função dos comprimentos equivalentes de declive simulados na pesquisa (Le), nos tratamentos estudados.

Assim, a mesma variação observada na relação com as concentrações de sedimento na enxurrada, praticamente se repetiu com as taxas de erosão ou perda de solo, uma vez que estas foram obtidas multiplicando-se as primeiras pelas taxas de descarga da enxurrada na sua condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação das chuvas simuladas, as quais, praticamente, aumentaram no modo linear (na verdade, era para ser assim, conforme dito), na medida em que os fluxos extras de água iam sendo adicionados às parcelas experimentais (Figura 12). Pela mesma razão apresentada na análise da relação dos

comprimentos equivalentes de declive com as concentrações de sedimento na enxurrada, não mais serão feitos comentários da relação em pauta neste item dos resultados e discussão, ficando a análise a ser feita de modo mais completo e mais apropriado adiante, em item específico.

4.2.6. Análise padrão dos indicadores do processo de falha do resíduo cultural ou da existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo

Conforme mencionado na revisão bibliográfica e no material e métodos, neste trabalho foram adotados os dois critérios clássicos usados para investigar o processo de falha dos resíduos culturais ou, de outro modo dizendo, para averiguar a existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo. Esses critérios são o da observação visual a campo e o das relações teóricas de erosão, conforme estabelecidos e usados, pela primeira vez, por Foster et al. (1982), nos Estados Unidos da América, em um de seus estudos, seguido do estudo de Cogo (1981) ou Cogo et al. (1996), também realizado naquele País. No Brasil, os mesmos critérios foram usados por Bertol (1995) ou Bertol et al. (1997) e Morais (1999) ou Morais & Cogo (2001), em estudos de natureza semelhante aos recém relatados, no estado do Rio Grande do Sul. Entretanto, antes de iniciar esse tipo de análise com os resultados obtidos nesta pesquisa, julgou-se importante fazer alguns esclarecimentos adicionais a respeito, para não se cometer equívocos ou, mesmo, erros na sua interpretação e trato, neste documento, bem como nas suas possíveis alusões e/ou transcrições futuras, a virem ser feitas por pesquisadores ainda não bem familiarizados e/ou com pouca experiência no assunto. Essencialmente, se falará aqui do emprego correto dos termos movimentação, remoção e falha dos resíduos culturais, relacionado com limites críticos de comprimento de declive, como será feito a seguir.

O critério da observação visual a campo para verificação, ou melhor, para inferência (logo adiante será justificado o uso preferível desse termo) do processo de falha dos resíduos culturais ou da existência de limites críticos de comprimento de declive em dada situação, é o mais evidente e certo no que se refere a poder dizer que os resíduos se movimentaram ou não e, em decorrência, se mudaram ou não de posição no terreno, em relação a sua

posição original, e, em caso afirmativo, se foram transportados pela enxurrada apenas por curtas distâncias ou por distâncias maiores, inclusive podendo sair fora da lavoura e, neste caso, permitindo dizer que houve remoção externa dos mesmos. Isto porque esse critério é essencialmente baseado no que pode ser visto (com os próprios olhos) a partir do desencadeamento do processo erosivo do solo pela água da chuva e da enxurrada a ela associada, seja em parcelas experimentais de campo, como as usadas neste trabalho, seja em lavouras normais, quando circunstancialmente se está nelas ou deliberadamente se vai a elas para verificar tais ocorrências. Assim, esse critério pode ser considerado a referência maior ou a melhor base para se constatar a movimentação, ou não, seguida da remoção, ou não, em curtas, médias e relativamente longas distâncias, dos resíduos culturais, praticamente sem possibilidade de se cometer equívocos ou, mesmo, erros quanto a tal julgamento. Em função dessa realidade (ver com os próprios olhos o processo de movimentação e remoção dos resíduos culturais, ou não ter poder vê-lo, porque não ocorreu), pode-se inferir, e tão apenas inferir (agora será justificado o uso preferível desse termo), sobre a ocorrência do processo de falha (logo a seguir será esclarecido, desta vez, o uso preferível desse termo) dos resíduos culturais ou, de outro modo dizendo, sobre a existência de limites críticos de comprimento de declive na lavoura. Justificando, pois, o emprego do termo falha no assunto em pauta, de modo correto deverá ser usado somente quando a taxa de erosão ou perda de solo na lavoura, a partir de determinado ponto ou distância na mesma, aumenta em relação a que já vinha ocorrendo (antes do processo de falha), devido à movimentação, sem ou com remoção, e em qualquer distância, dos resíduos culturais, e, como mencionado, até mesmo sem nenhuma movimentação dos mesmos, neste caso a erosão ocorrendo por baixo deles, na forma de pequenos sulcos, praticamente não perceptível a olhos vistos, motivada pelo aumento progressivo do volume e da velocidade da enxurrada ao ela descender o terreno inclinado. Assim, para corretamente poder falar em, ou usar o termo, falha do resíduo cultural, o qual, por sua vez, permitirá que se fale da existência de limites críticos de comprimento de declive para a eficácia máxima ou completa de redução da erosão pelos resíduos culturais, nos preparos conservacionistas de solo (Wischmeier, 1973), necessariamente há que haver mudança (para maior) na taxa de erosão ou

perda de solo. Em adição, e já finalizando o esclarecimento, há também que ter em mente que, não necessariamente quando ocorre falha do resíduo cultural ou se constata limites críticos de comprimento de declive na lavoura, a taxa de erosão ou perda de solo que se verifica na mesma (aumentada em relação a que já vinha ocorrendo ou antes da falha) é alta ou prejudicial, ou seja, ela excede os limites aceitáveis de erosão ou ultrapassa as tolerâncias de perda de solo pelo fenômeno, estabelecidas para fins de manutenção da capacidade produtiva do solo para as culturas, conforme se encontram registradas em Wischmeier & Smith (1965 e 1978) e Renard et al. (1997). A falha do resíduo apenas indica (de modo concreto, entretanto) que houve perda de eficácia relativa dos resíduos culturais no controle da erosão hídrica pluvial, porém sendo ela apenas parcial, não total, podendo ou não requerer tomadas de decisão a respeito e, em caso positivo, se elas devem ser postas em prática no curto, no médio ou no longo prazo ou, então, implementar um outro tipo de medida, em um outro espaço de tempo. Finalizado o esclarecimento, passar-se-á então à análise dos resultados obtidos nesta pesquisa, pelos dois critérios que foram mencionados no início deste item, um dos quais se constituiu no motivo do esclarecimento feito

4.2.6.1. Critério da observação visual a campo

A base para averiguação do processo de falha do resíduo cultural por meio desse critério, neste estudo, foi constituída, como o próprio nome indica, pela atenta observação visual da movimentação ou não, seguida da remoção ou não, do resíduo cultural de milho nas parcelas experimentais, acompanhada da tomada de imagens (fotos digitais) da superfície do solo nas mesmas, na medida em que nelas iam sendo adicionados os níveis de fluxo extra de água, em magnitude crescente. Essas imagens foram criteriosamente analisadas, selecionadas (quatro para cada tratamento) e estão à vista nas figuras 19 a 24, nos seguintes momentos de obtenção das mesmas: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do nível de fluxo extra em que foi verificada a movimentação inicial do resíduo cultural, eventualmente também com alguma remoção do mesmo, porém incipiente, (c) durante a adição do nível de fluxo extra em que foi efetivada a remoção do resíduo

cultural e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, em que a remoção do resíduo cultural pôde ser vista com maior clareza ou de modo mais completo e extensivo. A análise das imagens correspondentes a cada uma dessas descrições, em cada uma das figuras referidas, será efetuada a seguir.

Analisando o conjunto de imagens contido nas figuras 19 a 24, percebe-se ter havido movimentação e deslocamento ou transferência (curtas distâncias no terreno, impostas pelo pequeno comprimento das parcelas experimentais – 11 m – e pela interrupção abrupta do escoamento superficial pela calha coletora existente ao final das mesmas), portanto remoção efetiva do resíduo cultural de milho em todos os tratamentos da pesquisa. Esses processos, entretanto, como pode ser visto pelos resultados sumarizados das referidas figuras (e nelas próprias), apresentados na tabela 6, ocorreram em graus variados, tanto do número de ordem dos níveis de fluxo extra que causaram a movimentação e remoção do resíduo cultural, quanto do modo como elas ocorreram. Assim, observa-se na referida tabela, ou mesmo nas figuras das quais as informações nela contidas foram extraídas, que em dois tratamentos (semeadura direta sem hastes sulcadoras e toda e metade da quantidade total de resíduo produzida, respectivamente SD s/hastes, 1/1 dose e SD s/hastes, 1/2 dose – Figuras 19 e 24) a movimentação do resíduo cultural iniciou no terceiro e sua remoção propriamente dita ocorreu no quarto nível de fluxo extra, em outros dois tratamentos (semeadura direta com hastes sulcadoras e toda e metade da quantidade total de resíduo produzida, respectivamente SD c/hastes, 1/1 dose e SD c/hastes, 1/2 dose – Figuras 22 e 23) o referido processo ocorreu no quarto e no quinto nível de fluxo extra, em um tratamento (semeadura direta sem hastes sulcadoras e um quarto da quantidade total de resíduo produzida – SD s/hastes, 1/4 dose – Figura 24) ele ocorreu no segundo e no terceiro nível de fluxo extra, e, em outro tratamento (semeadura direta com hastes sulcadoras e um quarto da quantidade total de resíduo produzida - SD c/hastes, 1/4 dose – Figura 21) a movimentação inicial e a remoção efetiva do resíduo cultural ocorreram, respectivamente, no quinto e no sexto nível de fluxo extra de água.

Pormenorizando o que foi relatado acima, e pode ser visto melhor pelos resultados apresentados na tabela 6, verifica-se que houve tendência do

resíduo cultural de milho ser movimentado e deslocado nos níveis maiores de fluxo extra de água no modo de semeadura com hastes sulcadoras, e nos níveis menores no modo de semeadura sem hastes sulcadoras, sem tendência definida quanto às doses de resíduo em qualquer um deles. Observa-se nas imagens digitais (Figuras 19 a 24) que o tipo de deslocamento ou remoção do resíduo em pauta ocorreu no modo combinado de peça por peça e em massa (dominância desta) em quatro tratamentos (segundo – Figura 20c, terceiro – Figura 21c, quinto – Figura 23c, e sexto – Figura 24c) e, praticamente, somente em massa em dois tratamentos (primeiro – Figura 19c – e quarto – Figura 22c). Quanto às taxas de fluxo extra e equivalentes limites críticos (inferior e superior) de comprimento de declive onde foi possível visualizar a movimentação inicial e a remoção efetiva do resíduo cultural, observa-se na tabela 6 que, no que se refere às doses de resíduo, variaram de modo desordenado ou irregular (sem tendência definida) nos dois modos de semeadura, mas em relação a estes foram bem maiores no com hastes sulcadoras, independentemente das doses de resíduo. Verifica-se ainda na referida tabela que, exceto um caso isolado, em que também foi grande (SD s/hastes, 1/4 dose), o intervalo entre os limites críticos de comprimento de declive foi muito maior no modo de semeadura com hastes sulcadoras.

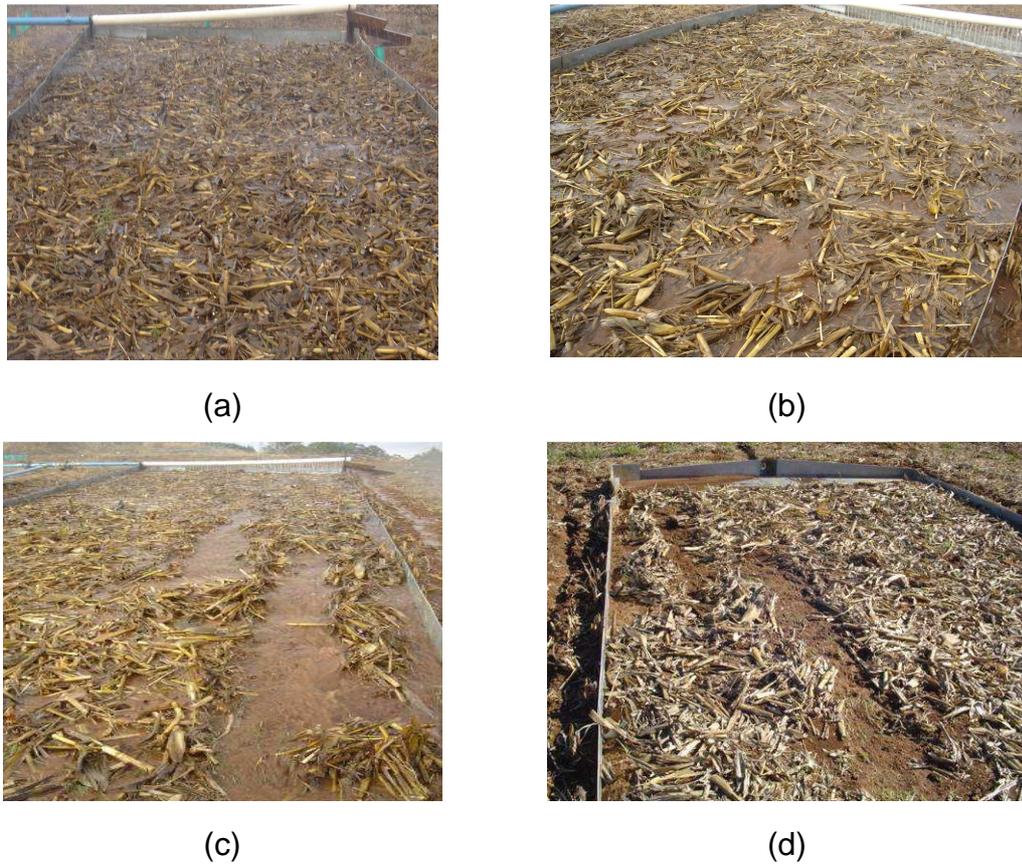


FIGURA 19. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras e dose integral do resíduo cultural de milho (SD s/hastes, 1/1 dose ou $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do terceiro nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, (c) durante a adição do quarto nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, no modo em massa, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural.

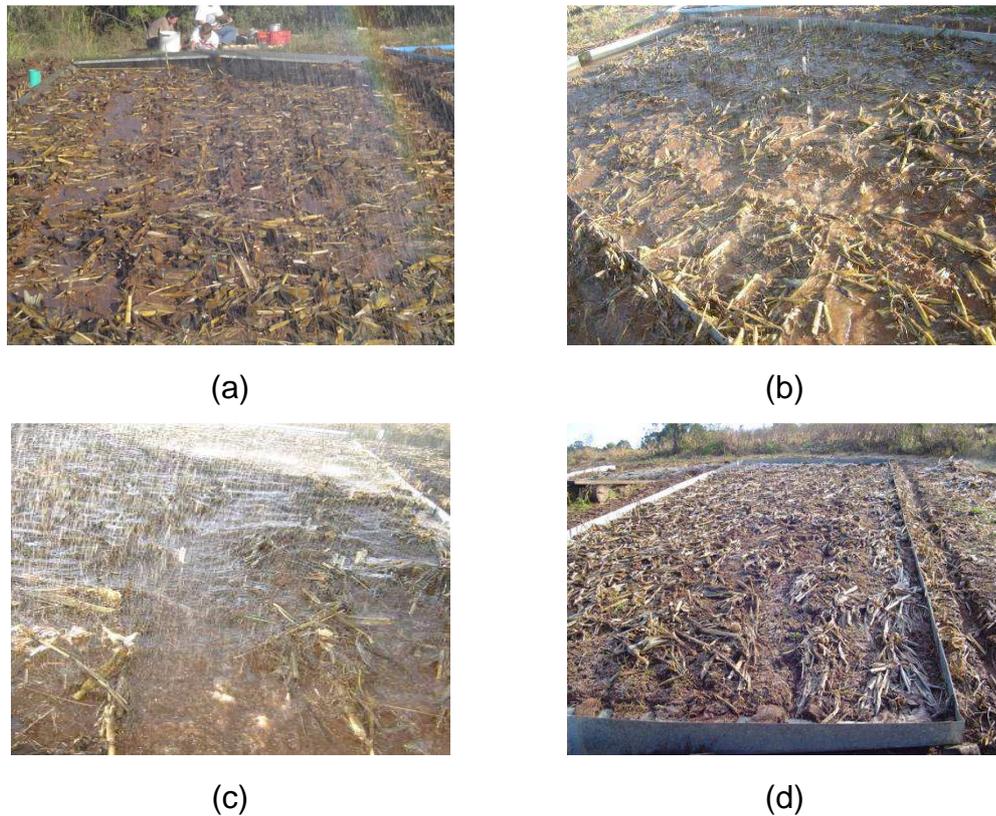


FIGURA 20. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras e metade da dose integral do resíduo cultural de milho (SD s/hastes, 1/2 dose ou $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do terceiro nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, (c) durante a adição do quarto nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, predominantemente no modo em massa, mas com alguma remoção no modo de peça por peça, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural.

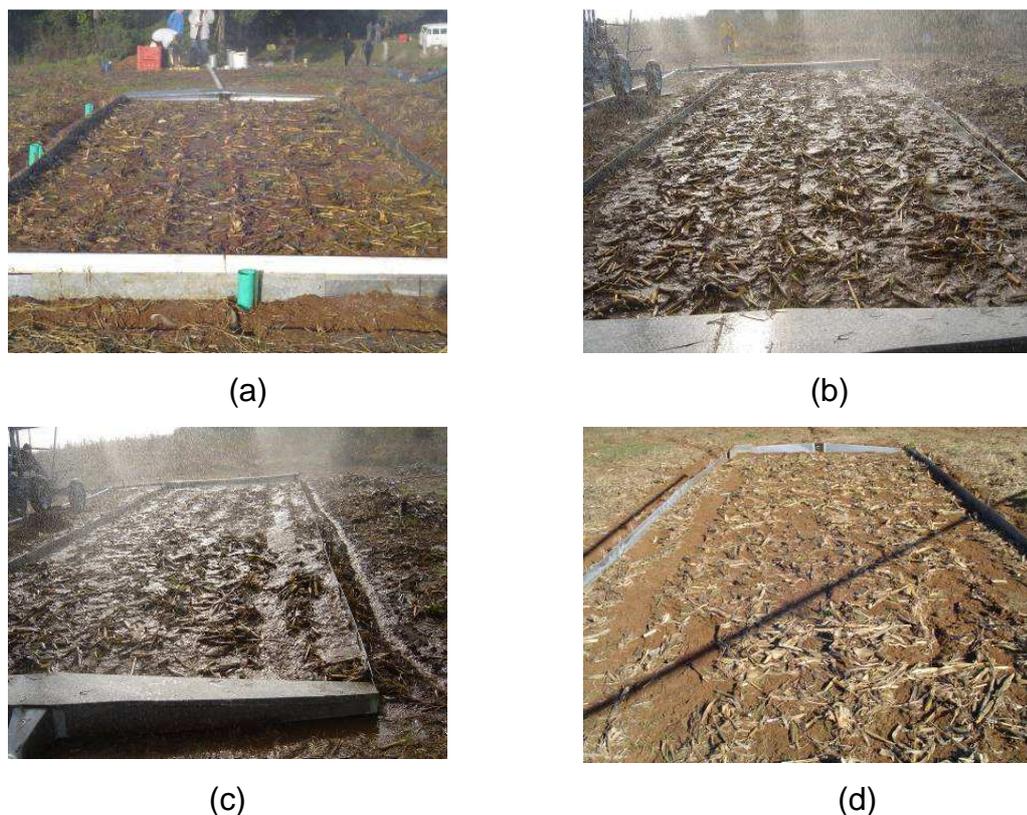


FIGURA 21. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras e um quarto da dose integral do resíduo cultural de milho (SD s/hastes, 1/4 dose ou $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do segundo nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, (c) durante a adição do terceiro nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, nos modos de peça por peça e em massa, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural.

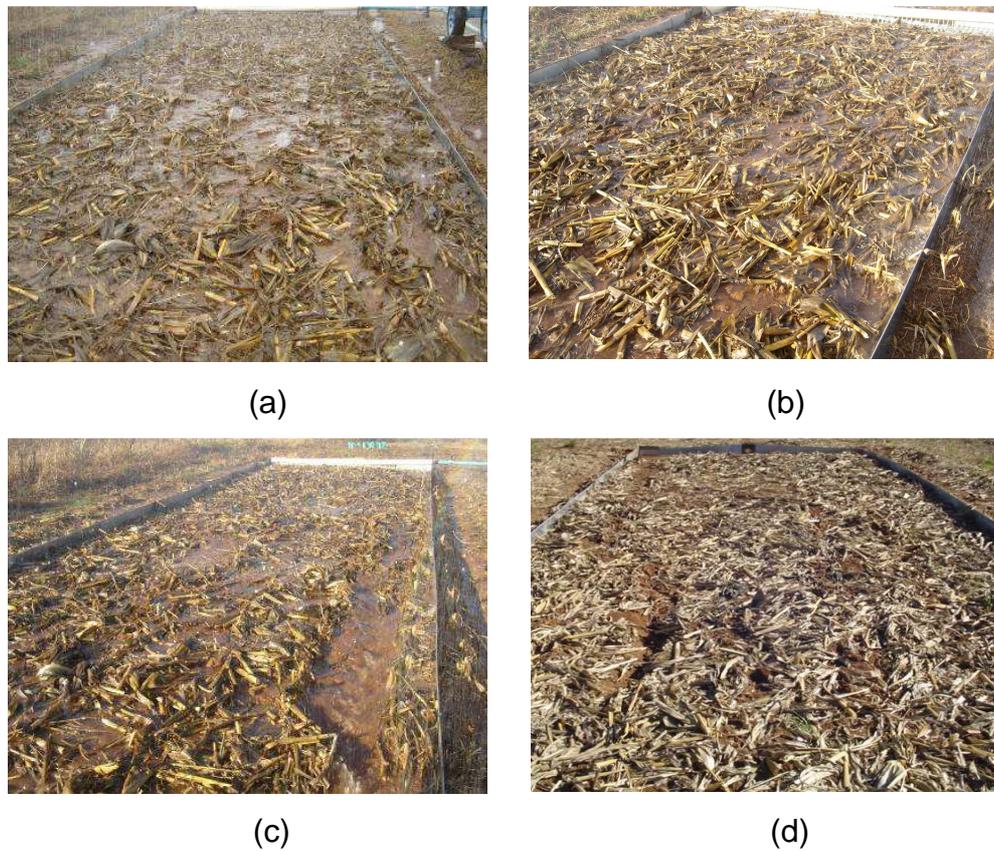


FIGURA 22. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras e dose integral do resíduo cultural de milho (SD c/hastes, 1/1 dose ou $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do quarto nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, (c) durante a adição do quinto nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, no modo em massa, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural.

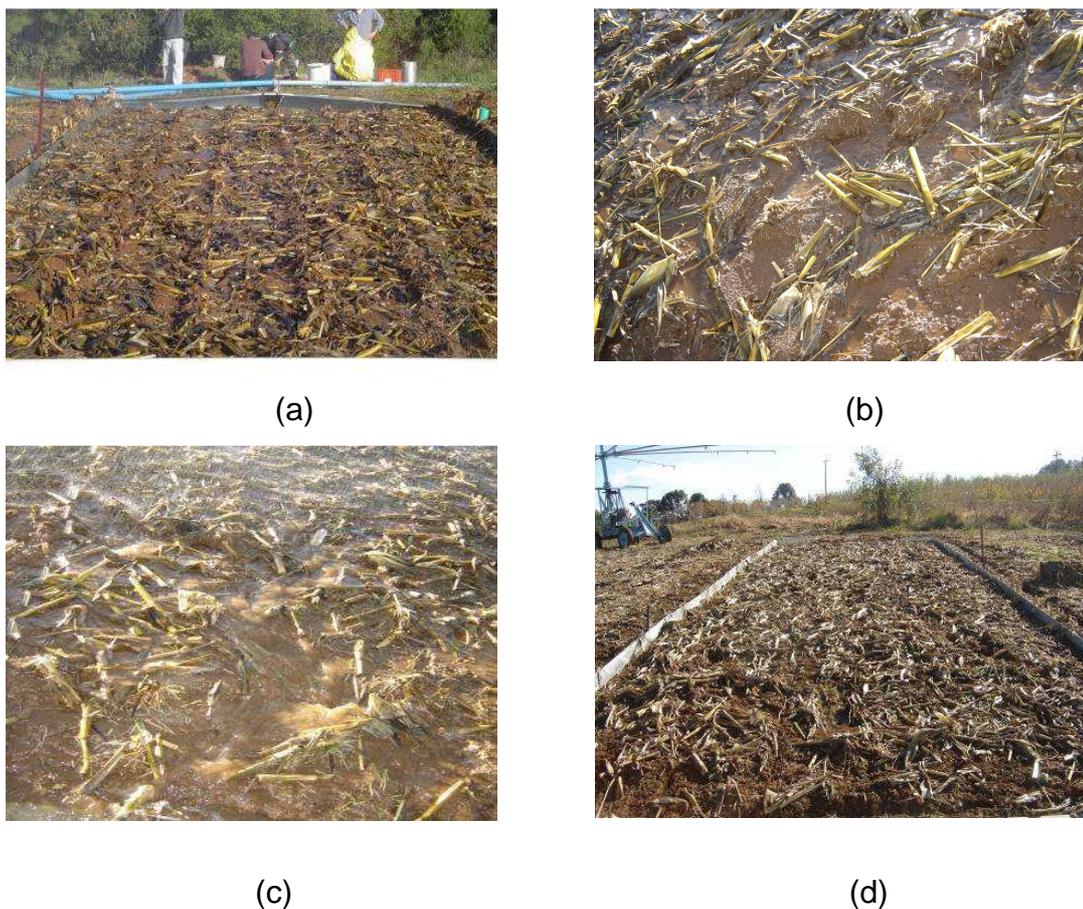


FIGURA 23. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras e metade da dose integral do resíduo cultural (SD c/hastes, 1/2 dose ou $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a aplicação do quarto nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, (c) durante a adição do quinto nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, nos modos de peça por peça e em massa, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural.

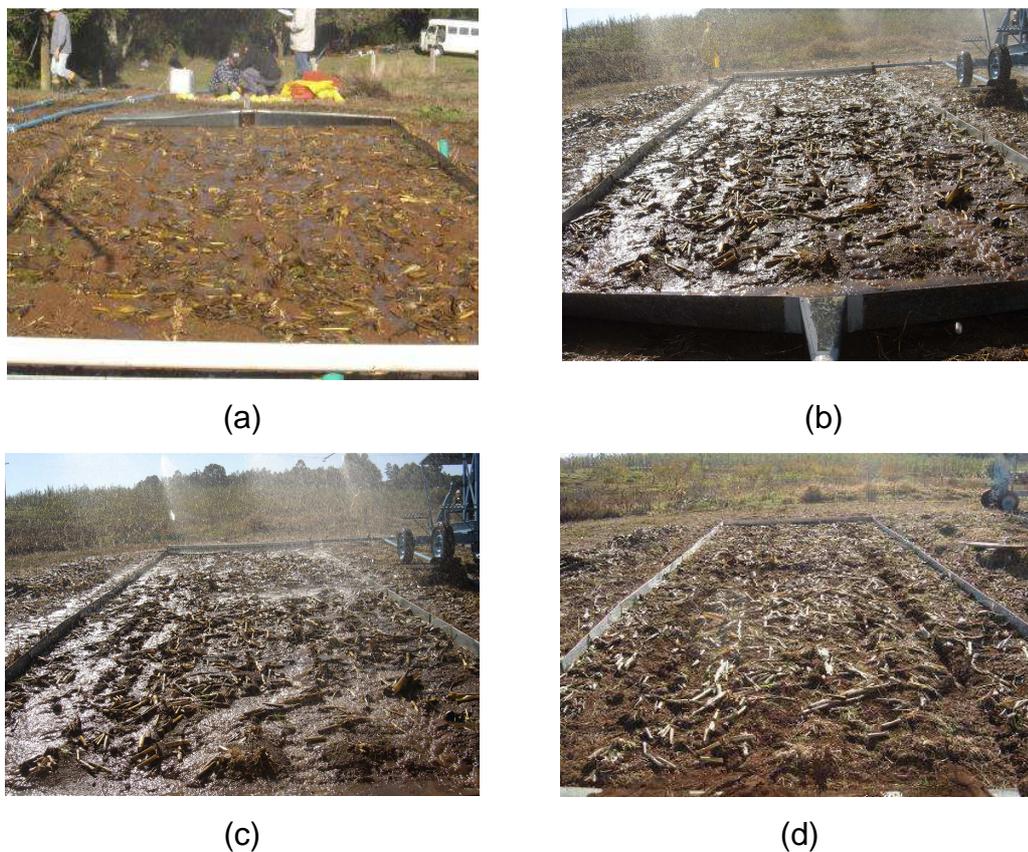


FIGURA 24. Vista da superfície do solo na parcela experimental do tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras e um quarto da dose integral do resíduo cultural de milho (SD c/hastes, 1/4 dose ou $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), em diferentes momentos do correspondente teste de erosão: (a) durante a aplicação somente da chuva simulada, (b) durante a adição do quinto nível de fluxo extra, evidenciando a movimentação inicial do resíduo cultural, no modo de peça por peça, e (c) durante a adição do sexto nível de fluxo extra, evidenciando a remoção efetiva do resíduo cultural, nos modos de peça por peça e em massa, e (d) após o término da chuva simulada e da adição do último nível de fluxo extra, evidenciando de modo mais claro a remoção do resíduo cultural.

TABELA 6. Níveis e taxas de fluxo extra de água em que foram observadas a movimentação e remoção do resíduo cultural de milho, e equivalentes limites críticos calculados de comprimento de declive, nos tratamentos estudados

Tratamento	Nível de fluxo extra da movimentação/remoção do resíduo cultural ¹	Taxa de fluxo extra da movimentação/remoção do resíduo cultural	Limite crítico de comprimento de declive	
		$m^3 s^{-1} m^{-1} \times 10^{-3}$	Inferior	Superior
			.....m.....	
SD s/hastes, 1/1 dose	3º/4º	0,95/1,15	81	96
SD s/hastes, 1/2 dose	3º/4º	0,82/0,87	109	118
SD s/hastes, 1/4 dose	2º/3º	0,63/1,10	64	104
SD c/hastes, 1/1 dose	4º/5º	1,03/1,21	300	354
SD c/hastes, 1/2 dose	4º/5º	0,97/1,33	171	228
SD c/hastes, 1/4 dose	5º/6º	1,46/1,87	363	456

¹ Com base no critério da observação visual a campo.

Dos acontecimentos relatados até este momento, relacionados com o critério da observação visual da movimentação e remoção do resíduo cultural de milho, com base nos resultados da tabela 6, de modo geral resultaram conforme o esperado e têm explicação plausível para tal os relacionados com o número de ordem dos níveis de fluxo extra e suas correspondentes taxas de adição em que foram observadas a movimentação inicial e a remoção efetiva do resíduo cultural, ou seja, serem maiores no modo de semeadura com hastes sulcadoras do que no do sem hastes sulcadoras, independentemente das doses de resíduo. A explicação para isso está no fato de que, no modo de semeadura com hastes sulcadoras, o solo sofreu considerável mobilização na camada superficial, ficando mais rugoso e com maior porosidade total na camada mobilizada (este tipo de porosidade inclui as microdepressões ou os vazios resultantes da ação mecânica das hastes sulcadoras), fazendo com que aumentasse sua capacidade de reter e infiltrar água superficialmente e, em decorrência, diminuísse o escoamento superficial. Devido a isso, foi necessário um nível de fluxo extra mais alto ou uma quantidade de água maior para movimentar e, em prosseguimento, remover o resíduo cultural da superfície do solo em tal modo de semeadura, comparado ao do sem hastes sulcadoras, na qual não houve nenhum ganho, nem de rugosidade superficial, nem de porosidade total da camada mobilizada, pelo simples fato do solo na mesma não ter sido mobilizado. No que diz respeito aos maiores limites críticos (inferior e superior) de comprimento de declive (L_e) e intervalos entre eles onde foi possível visualizar a movimentação inicial e a remoção efetiva do resíduo cultural, no modo de semeadura com hastes sulcadoras, comparados aos do sem hastes sulcadoras, simplesmente se deveu às maiores taxas de fluxo extra adicionadas na mesma (l_a – Figura 12) e menores taxas de descarga da enxurrada na sua condição de equilíbrio enquanto sob a aplicação somente das chuvas (q_c – Figura 13), tendo em vista que $L_e = l_a / q_c$ $L + L$, como visto. Quanto à variação (de modo geral, tendo em vista que um só caso foi consistente – SD s/hastes, 1/4 dose – e outro inesperado – SD c/hastes, 1/4 dose - Tabela 6) desordenada e irregular (sem tendência definida) do número de ordem dos fluxos extras que motivaram a movimentação e a remoção do resíduo cultural de milho, das taxas de adição de água ou cargas hidráulicas aplicadas e dos equivalentes limites críticos (inferior e superior) de

comprimento de declive calculados, relacionado com as doses de resíduo, nos dois modos de semeadura direta, em princípio, atribuiu-se às variações ao acaso e ao erro experimental, devido à natureza da pesquisa (complexa, difícil de realizar e sujeita a inúmeras influências), como mencionado. Entretanto, tal variação pode também ter sido por ocorrências reais não observadas e/ou não detectadas na pesquisa, o que sugere prosseguir com o estudo, para melhor elucidar os fatos.

Encerrando o assunto, e no que se refere à falha do resíduo cultural propriamente dita ou à existência verdadeira de limites críticos de comprimento de declive no estudo, evidenciada, ou melhor dizendo, possível de ser admitida pelo critério da observação visual a campo, com base nas imagens tomadas (e vista real) da superfície do solo nas parcelas experimentais enquanto nelas iam sendo adicionados os fluxos extras de água, adicionadas das imagens tomadas (e vista real) após o término das chuvas simuladas e da adição dos níveis de fluxo extra de água, com esta última ação evidenciando faixas de solo desnudas, diretamente expostas à ação erosiva, inclusive podendo-se ver o início da formação de pequenos sulcos nas parcelas, ocorreu ou existiu. Porém, a comprovação dessa ocorrência ou dessa existência somente será possível após analisar os resultados das concentrações de sedimento na enxurrada e suas correspondentes taxas de erosão ou perda de solo, o que será feito a seguir.

4.2.6.2. Critério das relações teóricas de erosão

Conforme informado no material e métodos, devido à rugosidade superficial ou microrelevo do solo e/ou o resíduo cultural de milho presente na sua superfície, ambos obstáculos mecânicos efetivos ao escoamento contínuo e uniforme da água de enxurrada, não foi possível medir a velocidade desta última no estudo, pelo método usual (tempo gasto por um corante – azul de metileno –, jogado sobre o fluxo de água, para percorrer dada distância demarcada na parcela experimental). Caso tivesse sido, se disporia de mais uma relação teórica de erosão para investigar a possível ocorrência do processo de falha do resíduo cultural na pesquisa, juntamente com as relações das concentrações de sedimento na enxurrada e suas correspondentes taxas

de erosão ou perda de solo. Assim, neste estudo, serão examinadas apenas as duas últimas relações mencionadas.

Antes de examinar as relações teóricas de erosão, mencionadas acima, julgou-se interessante analisar o comportamento temporal das taxas de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais (q_m - base para as relações a serem consideradas ou variável independente) enquanto nelas iam sendo adicionados os fluxos extras de água, e com as quais, em prosseguimento, as concentrações de sedimento na enxurrada e suas correspondentes taxas de erosão ou perda de solo foram relacionadas. Os resultados dessas taxas de descarga são apresentados na figura 25. Analisando os dados na mesma, verifica-se que as taxas de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais (q_m) variaram em grau relativamente alto entre os tratamentos, no modo linear, com seus valores se situando na faixa aproximada de $0,35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ a cerca de $2,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, e com amplitude média de variação entre os tratamentos de $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Essas

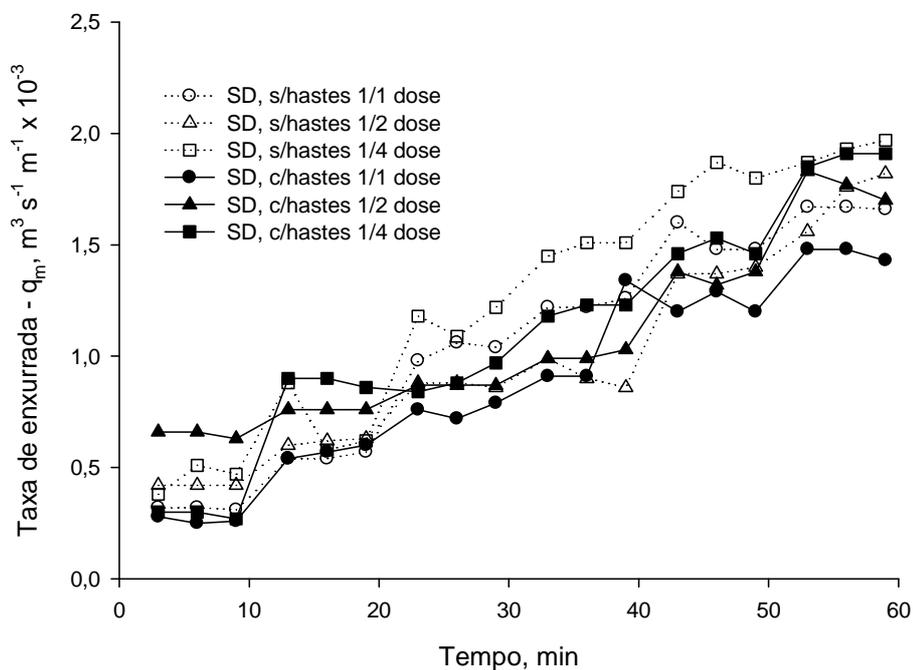


FIGURA 25. Distribuição temporal das taxas de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais (q_m), a partir da adição dos fluxos extras de água, nos tratamentos estudados.

magnitudes de valores e modos de comportamento da variável em consideração (q_m) são os mesmos observados com as taxas totais globais de descarga da enxurrada que foram medidas ao final das parcelas experimentais

enquanto nelas iam sendo aplicadas as chuvas simuladas e adicionados os fluxos extras de água (q_t - Figura 14), e também os mesmos observados com estes últimos (I_a - Figura 12), o que é normal. Isto porque os três tipos mencionados de taxa de descarga da enxurrada, neste estudo, por circunstâncias, foram interdependentes, ou seja, obtidos por cálculo, sendo que I_a a partir de q_t e q_m a partir destes dois, conforme mencionado. Assim, a razão fundamental para as diferenças observadas nos resultados das taxas de descarga da enxurrada que foram medidas no ponto médio das parcelas experimentais, neste estudo, fica dividida entre as diferenças nos resultados das taxas de fluxo extra que foram adicionadas às parcelas experimentais (Figura 12), por conseguinte nos resultados das taxas de descarga da enxurrada no ponto médio das mesmas (Figura 25), e o efeito dos tratamentos em si, sem poder precisar o quanto se deveu a um e outro deles. Desta forma, mais uma vez, solicita-se cautela na interpretação e na comparação, principalmente direta, dos resultados obtidos. Passar-se-á, então, a partir de agora, a examinar as relações teóricas de erosão usadas na pesquisa, para comprovar, ou não, a ocorrência do processo de falha do resíduo cultural ou, de outro modo dizendo, a existência de limites críticos de comprimento de declive nos tratamentos estudados, conforme evidenciado ou, melhor, admitido ter ocorrido ou existido pelo critério da observação visual a campo, conforme tratado no item anterior.

4.2.6.2.1. Concentração de sedimentos na enxurrada versus taxa de descarga da mesma no ponto médio das parcelas experimentais

Os resultados dessa relação são apresentados na figura 26. Analisando os dados na mesma, verifica-se que, exceto um caso isolado (semeadura direta com hastes sulcadoras e metade da quantidade total de resíduo cultural produzida - SD c/hastes, 1/2 dose – Figura 26e), em que, por algum tempo, diminuiu e, então, bruscamente aumentou, denotando ter ocorrido falha do resíduo cultural nesse ponto, ou a partir dele, a concentração de sedimentos na enxurrada (CSE), embora com relativamente grande variação nos seus valores ou grande dispersão de pontos, claramente permitiu ver que tendeu a diminuir com o aumento das taxas de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais (q_m), em todos os tratamentos.

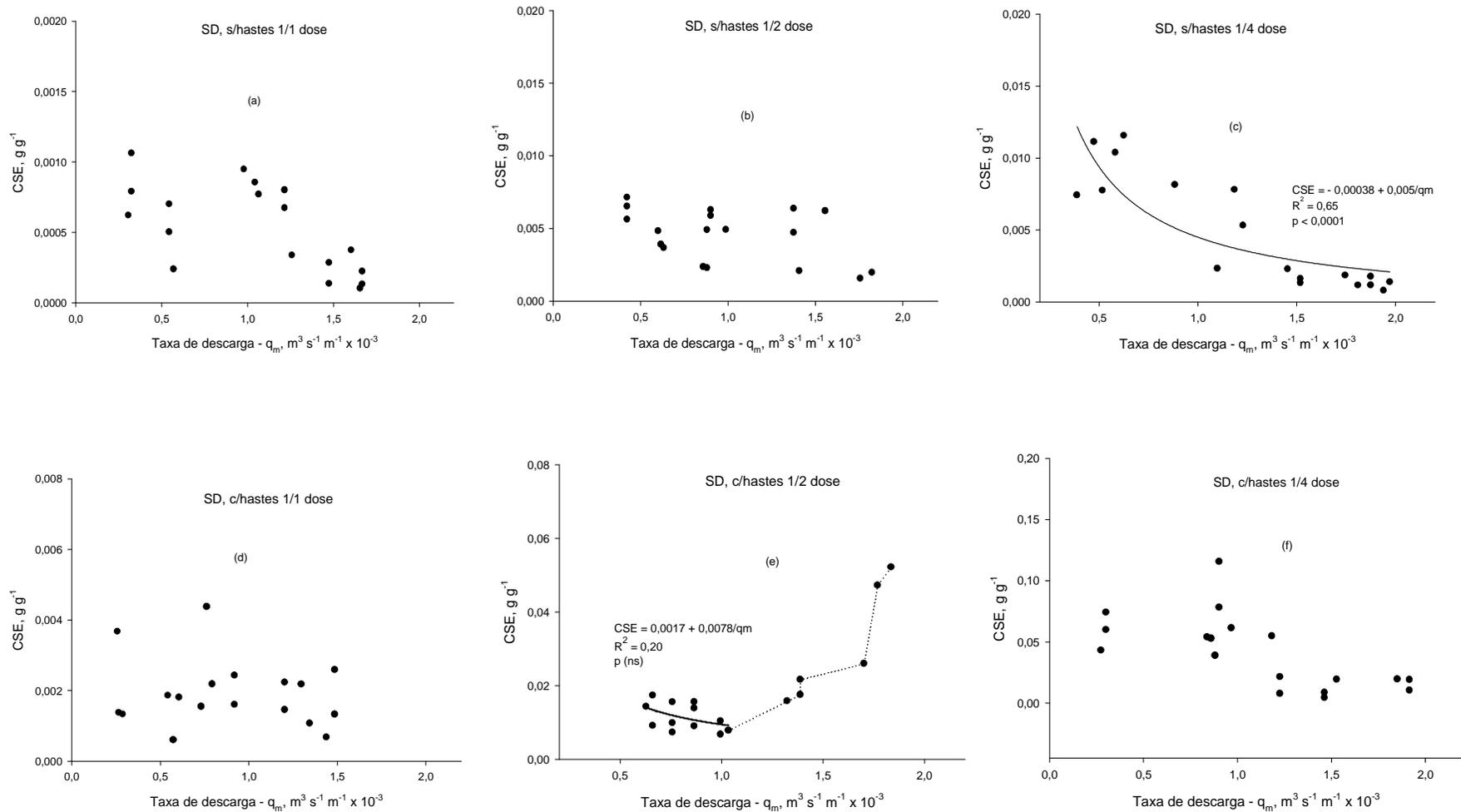


FIGURA 26. Relação da concentração de sedimentos na enxurrada (CSE) com a sua taxa de descarga no ponto médio das parcelas experimentais (q_m), nos tratamentos estudados.

Um caso claro e típico do comportamento relatado, anterior à falha do resíduo cultural (semeadura direta sem hastes sulcadoras e um quarto da quantidade total de resíduo produzida – SD s/hastes, 1/4 dose), é apresentado na figura 26c, juntamente com a curva típica de ajuste de dados para esse tipo de relacionamento (para fins ilustrativos), não tendo sido ajustadas curvas nos demais casos devido à grande dispersão de pontos nos mesmos. O comportamento predominante relatado (diminuição de CSE com o aumento de q_m) indica que não houve falha do resíduo cultural ou não existiu limite crítico de comprimento de declive no estudo, avaliado pela relação teórica em consideração, conforme atesta a equação $CSE = KrCr + C_2/q_m$, desenvolvida e sugerida por Foster et al. (1982a,b) para esse tipo de relacionamento. Algumas considerações a respeito, serão efetuadas a seguir.

A base para explicação dos acontecimentos relatados, nos casos de falta de evidência ou não comprovação do processo de falha do resíduo cultural, baseada na relação teórica de erosão em consideração, reside no fato de que, embora a quantidade absoluta de sedimentos na enxurrada tenha aumentado com a adição dos níveis de fluxo extra de água (este é o processo normal, aliás), devido à crescente energia erosiva para desagregar e transportar solo, oriunda da ação de cisalhamento e de transporte da enxurrada, o aumento se deu em taxas decrescentes, contrastando com o aumento, cada vez maior, das quantidades de fluxo extra de água adicionadas às parcelas experimentais, na conhecida ocorrência denominada de efeito de diluição de quantidades. No caso isolado de evidência clara ou comprovação efetiva do processo de falha do resíduo cultural, em que concentração de sedimentos na enxurrada até um determinado momento diminuiu com a adição dos fluxos extra de água e, então, bruscamente aumentou, baseada na relação em discussão, até o momento em que não houve falha do resíduo cultural é explicada pela mesma razão exposta há instantes, ou seja, pelo efeito de diluição de quantidades. A partir do ponto de falha, entretanto, a desagregação e o transporte de solo pela enxurrada (a primeira também pela ação da chuva) aumentaram, aumentando também a quantidade absoluta de partículas erodidas do solo nesta última e, por conseguinte, cessando o efeito de diluição de quantidades. Com isso, houve aumento da concentração de sedimentos na enxurrada, o que levou à mudança no comportamento da curva (foi para cima),

conforme atesta a equação usada para esse tipo de relacionamento, transcrita no início desta discussão. Quanto ao por que de somente ter havido falha do resíduo cultural, evidenciada pela relação teórica de erosão em consideração, no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras e metade da quantidade total de resíduo produzida, é algo que fica para ser esclarecido, tendo em vista não ter sido encontrado motivo lógico ou explicação plausível para tal, a não ser um, mero, acontecimento fortuito.

4.2.6.2.2. Taxa de erosão versus taxa de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais

Os resultados dessa relação são apresentados na figura 27. Antes de efetuar a análise dos mesmos, julgou-se interessante lembrar que as taxas de erosão na referida figura representam a perda média de solo do último segmento de 11 m (extensão da parcela experimental) de um declive com comprimento igual ao simulado por cada nível de fluxo extra de água que foi adicionado na cabeceira das parcelas experimentais (neste estudo, os apresentados na Figura 13), mais os referidos 11 m, conforme as relações teóricas de erosão desenvolvidas por Foster et al. (1982) para esse propósito. Efetuando, então, a análise dos dados na figura 27, verifica-se que, de modo geral, variaram de modo parecido como na relação com a concentração de sedimentos na enxurrada, visto no item anterior, ou seja, com relativamente grande variação nos seus valores ou grande dispersão de pontos. Entretanto, chama a atenção nesta inter-relação o comportamento dos dados, o qual, ao contrário do observado na primeira inter-relação referida, que foi um só (exceto um caso isolado, o qual também ocorreu aqui, nesta inter-relação, e foi o mesmo), variou muito, ora tendendo a uma direção (aumentando com a taxa de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais - q_m), ora a outra (diminuindo com q_m) e ora às duas direções (inicialmente aumentando e posteriormente diminuindo com q_m), numa verdadeira mistura de ocorrências.

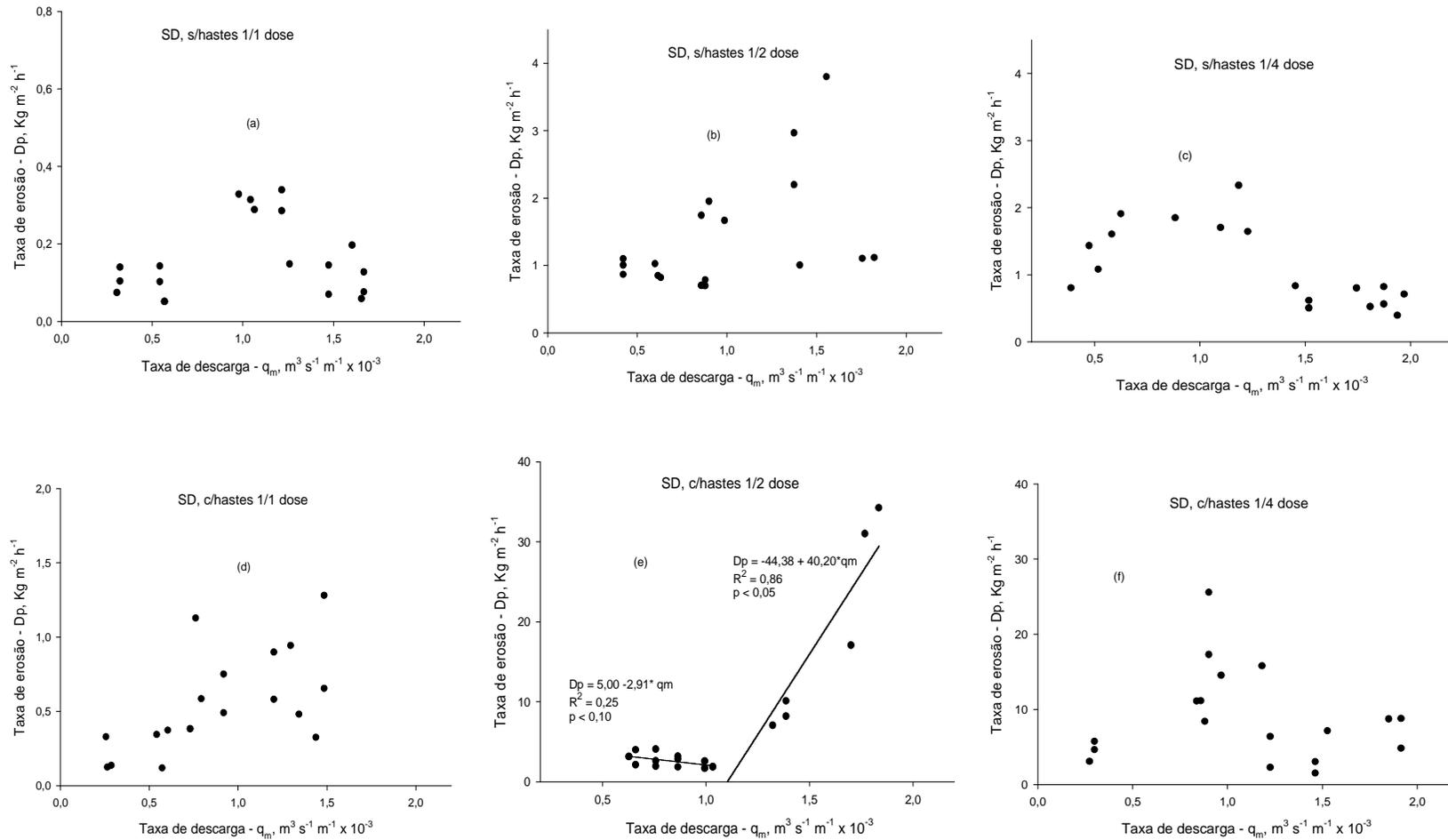


FIGURA 27. Relação da taxa de erosão ou perda de solo (D_p) com a taxa de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais (q_m), nos tratamentos estudados.

O esperado nesse inter-relacionamento, enquanto não houvesse falha do resíduo cultural, era a taxa de erosão ou perda de solo (D_p) diminuir com o aumento da taxa de descarga da enxurrada no ponto médio das parcelas experimentais (q_m), no modo linear, e a partir da falha aumentar, no modo também linear, conforme dita a equação $D_p = C_2 + K_r C_r q_m$, desenvolvida para tal por Foster et al. (1982a), na qual C_2 é uma constante, K_r o coeficiente de erodibilidade do solo para a erosão em sulcos e C_r o fator cobertura e manejo do solo também para a erosão em sulcos.

A relativamente grande variação no comportamento dos dados relatados acima foi estranha ao esperado e não se encontrou motivo lógico ou explicação plausível para ter sido assim, desta forma ficando ela também pendente de melhor investigação, como já ocorreu uma e outra vez neste estudo. De qualquer forma, presume-se que o erro experimental, pela natureza da pesquisa (sujeita a inúmeras influências externas instantâneas e variações ao acaso), como mencionado, tenha tido muito a ver com a referida ocorrência. O caso isolado de evidência de falha do resíduo cultural ou de comprovação de existência de limite crítico de comprimento de declive, era esperado e é normal. Isto porque a taxa de erosão ou perda de solo, na relação em pauta, foi obtida pela multiplicação da concentração de sedimentos na enxurrada com a taxa de descarga desta última no ponto médio das parcelas experimentais, e como esta cresceu linearmente com a adição dos níveis de fluxo extra de água nas referidas parcelas, o resultado foi apenas uma transposição de valores. Entretanto, a razão ou explicação de somente nesse tratamento ter sido evidenciada falha do resíduo cultural, não foi encontrada (pode, até, ter sido um mero acontecimento fortuito, como ocorreu na relação efetuada com a concentração de sedimentos na enxurrada), assim ficando ela também pendente de melhor investigação.

4.2.6.3. Análise conjunta dos resultados de falha do resíduo cultural ou de existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo: critério da observação visual a campo versus critério das relações teóricas de erosão

Para finalizar o assunto de falha do resíduo cultural ou existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo, julgou-se importante

comentar um pouco a aparente contrariedade nos resultados entre os dois critérios usados no mesmo para constatar o processo, em que pelo da observação visual a campo, baseado na remoção efetiva do resíduo cultural das parcelas experimentais e decorrente exposição do solo (estreitas faixas desnudas) à ação erosiva, houve, e pelo das relações teóricas de erosão, usando a concentração de sedimentos na enxurrada e a taxa de erosão ou perda de solo como indicadores ou variáveis dependentes, exceto um caso isolado (o mesmo nas duas variáveis), não houve.

No caso da pressuposta (parecendo ser verdadeira, entretanto) ocorrência do processo de falha do resíduo cultural (todos os tratamentos da pesquisa), vista pelo critério da observação visual a campo e baseada na remoção efetiva do mesmo das parcelas experimentais, pode, realmente, ter havido, mas não tendo sido detectada pelo critério das relações teóricas de erosão, em função da relativamente grande variação nos valores das variáveis envolvidas (concentração de sedimentos na enxurrada e taxa de erosão ou perda de solo). Alternativamente, pode, mesmo, não ter havido, com a remoção do resíduo cultural expondo o solo à ação erosiva, mas não constituindo, ainda, condições para que a erosão se manifestasse em grau maior. No caso da negativa de falha do resíduo cultural pelo critério das relações teóricas de erosão (todos os tratamentos da pesquisa, exceto um), usando a concentração de sedimentos na enxurrada e a taxa de erosão ou perda de solo como indicadores ou variáveis dependentes, provavelmente se deveu à relativamente grande variação nos seus valores ou grande dispersão de pontos na relação, motivada pelas variações ao acaso (usualmente muitas e freqüentes) e pelo erro experimental (normalmente alto em pesquisas de natureza com a desta). De qualquer forma, por questão de segurança, mas também por lógica, eis que solo descoberto é, sempre, solo muito propenso à erosão, não importando o grau e o momento em que ela possa vir a ocorrer, o bom senso recomenda dar crédito à pressuposta falha do resíduo cultural ou à presumível existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo, evidenciada pelo critério da observação visual a campo. Isto, entretanto, não significa que o critério das relações teóricas de erosão, usado neste estudo, não serviu ou resultou falho, absolutamente, eis que as possíveis razões para tal, foram apontadas. Desta forma, em situações de lavoura semelhantes às abrangidas neste estudo,

sugere-se, em caráter preventivo, pensar alguma medida ou alguma ação voltada para o controle da erosão naqueles intervalos de comprimentos críticos de declive em que remoção do resíduo cultural, realmente, se efetivou (os expressos na Tabela 6), para, pelo menos, manter o resíduo cultural no seu local original ou dentro da lavoura.

5. CONCLUSÕES

1. As condições físicas externas ou superficiais do solo, criadas pelos tratamentos investigados, efetivamente influenciaram os valores das variáveis de erosão hídrica medidas no estudo, porém, em grau variado e de modo irregular, com a variação, em alguns dos resultados, tendo sido acima do normal e do esperado, evidenciando a grande influência da variação ao acaso e do erro experimental em pesquisas como esta.
2. Não foi possível precisar o quanto da variação nos resultados da pesquisa se deveu aos tratamentos em si, e o quanto às variações ao acaso e ao erro experimental, assim como o quanto se deveu a uma e outra destas duas últimas causas de variação.
3. A mobilização parcial do solo, propiciada pelas hastes sulcadoras ou facões supridos à máquina usual de semeadura direta (sem os referidos órgãos ou instrumentos), embora reduzindo a cobertura pelos resíduos culturais, criou rugosidade superficial ou microrelevo no mesmo o suficiente para favorecer a retenção e a infiltração superficial da água da chuva e o aprisionamento das partículas erodidas, na grande maioria das situações de tipos e doses de resíduo cultural, controlando de modo satisfatório a perda de água na forma de enxurrada e a perda de solo por erosão e, assim, no geral, superando a semeadura direta realizada sem hastes sulcadoras ou facões no que se refere a essas ocorrências.
4. Não houve tendência definida ou constância da influência dos tipos e doses de resíduo cultural nos valores das variáveis de erosão hídrica medidas no estudo, em qualquer dos modos de semeadura direta, com alguns dos resultados, além da variação acima do normal e do esperado, tendo apresentado comportamento estranho e, até mesmo, contrário ao que se esperava e se conhece do assunto, o que foi atribuído à variação ao acaso e ao erro experimental.

5. A semeadura direta realizada com hastes sulcadoras ou facões propiciou comprimentos de declive simulados, calculados com base nos resultados associados ao resíduo cultural de milho (não puderam ser aproveitados os resultados associados ao resíduo cultural de aveia preta para esse fim), maiores do que a realizada sem os referidos órgãos ou instrumentos, independentemente das doses de resíduo cultural.
6. Não houve tendência definida ou constância da influência das doses do resíduo cultural de milho nos comprimentos de declive simulados, em qualquer dos modos de semeadura direta.
7. Houve remoção efetiva do resíduo cultural de milho pela enxurrada, originada dos fluxos extras de água que foram adicionados às parcelas experimentais ou dos comprimentos de declive que foram simulados na pesquisa, em todos os tratamentos, o que levou a admitir ter ocorrido falha do referido resíduo ou ter existido limites críticos de comprimento de declive no estudo, baseado no critério da observação visual a campo.
8. A admitida falha do resíduo cultural de milho ou existência de limites críticos de comprimento de declive no estudo, baseada no critério da observação visual a campo, não foi confirmada pelo critério das relações teóricas de erosão, o que se atribuiu à variação ao acaso e ao erro experimental, mais do que à inexistência de tal ocorrência propriamente dita ou à ineficácia ou incapacidade de tais relações para detectá-la.
9. Por medida de segurança, considerando o solo um recurso natural não-renovável (para propósitos práticos ou na escala de tempo do ser humano), deu-se crédito real ao critério da observação visual a campo na sua função de alertar para a possibilidade de ocorrer falha dos resíduos culturais ou de existir limites críticos de comprimento de declive em situações de lavoura, relacionado com a eficácia máxima de redução da erosão hídrica, por meio de resíduos culturais, no caso usando a técnica de semeadura direta.
10. Em função do admitido no item anterior, apontaram-se limites críticos de comprimento de declive para o resíduo cultural de milho maiores na semeadura direta realizada com hastes sulcadoras ou facões do que na realizada sem esses órgãos ou instrumentos, sendo eles, respectivamente, de 64 a 118 m e de 171 a 456 m, no conjunto das doses de resíduo, em cada um dos modos de semeadura.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

6.1. Do ponto de vista científico ou metodológico

No decorrer deste trabalho, foi claramente evidenciado que uma das principais causas da relativamente grande variação nos resultados da pesquisa, relacionado com os fluxos extras de água, esteve associada com os problemas ocorridos com o equipamento utilizado no suprimento de água aos mesmos. O resultado disso, como visto, foram níveis diferentes de fluxo extra de água aplicados aos tratamentos, com seus intervalos de classe também tendo sido diferentes. Isto, indiscutivelmente, prejudicou a comparação, principalmente direta, dos resultados obtidos, não tendo sido possível precisar o quanto das diferenças nos mesmos se deveu aos tratamentos em si, e o quanto às fontes de variação naturalmente presentes em pesquisas como esta (a campo) e mais as que foram introduzidas nela, devido suas natureza e complexidade operacional, conforme comentado. Desta forma, para substancialmente diminuir a influência (adversa) desses fatores em estudos futuros iguais a este, e então se poder discernir melhor entre aquilo que se deveu e que não se deveu, recomenda-se efetuar esforços no sentido de construir um equipamento para suprimento de fluxos extras de água a serem aplicados igualmente em todos os tratamentos, que seja eficiente e confiável, de modo a se obter vazões únicas, a qualquer tempo e em qualquer lugar, com os mesmos intervalos de classe, e, também muito importante, os mais estreitos possíveis (em grande proporção isto permitirá atestar com maior precisão os limites críticos de comprimento de declive nos quais a falha do resíduo ocorre). Baseado no que se utilizou, e foi visto neste estudo, torna-se necessário usar manômetros medidores de pressão de água e registros de regulação de entrada e saída da mesma nas tubulações pertinentes que sejam mais exatos e sensíveis, ao mesmo tempo em que (extremamente fundamental isto) calibrando esse conjunto várias vezes, em cada local ou em cada parcela

experimental onde um dado tratamento irá ser instalado. Também muito importante, torna-se necessário dispor de um conjunto de moto-bomba para recalque de água às tubulações recém-referidas que tenha alta capacidade de sucção-vazão e mantenha-se estável o tempo todo, sem oscilações bruscas e repentinas, como não raras vezes aconteceu neste estudo. Acredita-se que, com isso, eliminar-se-á grande parte das variações normalmente constatadas em resultados de pesquisa do tipo como esta, tornando os estudos a serem desenvolvidos no assunto mais confiáveis e mais proveitosos.

6.2. Do ponto de vista de aplicação prática dos resultados

Os resultados obtidos nesta pesquisa, em que pese uma porção (dominantemente, os relacionados com a simulação de comprimentos de declive ou com a adição de fluxos extras de água) ter apresentado variação acima do normal, e também do esperado, devido aos problemas apontados e orientados a serem sanados no item anterior, se traduziram em informações importantes do ponto de vista de sua aplicação prática a campo ou em condições reais de lavoura. Assim, eles poderão ser usados como base para refletir e programar medidas globais úteis de conservação do solo e da água, bem como para orientar práticas específicas eficazes de controle da erosão, no caso causada pela água da chuva e da enxurrada a ela associada. Isto, principalmente, considerando a forma como vem sendo usada, já por mais de duas décadas, ressalta-se (tempo, o referido, mais do que suficiente para a erosão causar danos irreversíveis ao solo e, paralelamente a eles, assorear e degradar as fontes superficiais de água também em grau alto), a técnica de semeadura direta/plantio direto nos cerca de 25 milhões de hectares de lavoura com culturas anuais no Brasil, como será comentado a seguir.

Com raras exceções, a técnica de semeadura direta, por desconhecimento e/ou por interesses (não claros), vem sendo usada no Brasil de forma, totalmente, equivocada, de fato, errada ou não recomendável, sob qualquer pretexto e para qualquer propósito. Inquestionavelmente, e a verdade, além de reconhecida, deve ser dita, a referida técnica é a que, dentre todas as demais formas de se implantar culturas ou dos demais métodos de se preparar o solo para tal, mais reduz a perda de solo por erosão, seja ela a hídrica, seja

ela a eólica. Entretanto, por melhor que seja implantada e conduzida, não só a referida técnica, como prática isolada, não impede ou reduz a perda de solo por erosão aos níveis toleráveis, como também pode favorecer (no caso da erosão hídrica pluvial) a perda de água da chuva na forma de enxurrada. Em relação ao primeiro aspecto (perda de solo), é porque a erosão (hídrica ou eólica) depende de um conjunto de fatores, e não apenas de um e/ou outro deles, isoladamente, como é pensado e agido no Brasil em relação à semeadura direta, com os principais sendo (em se tratando da erosão hídrica pluvial) o regime de chuva, o tipo de solo, o comprimento, a inclinação e a forma do declive, a cobertura e o manejo do solo e as práticas conservacionistas de suporte ou práticas complementares ou de caráter mecânico de controle da erosão, como terraços, culturas em faixas em contorno, preparo do solo e semeadura das culturas em contorno, entre algumas outras. Em relação ao segundo aspecto (perda de água na forma de enxurrada), é porque, por não mobilizar o solo e ser facilitado o tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas (também animais) sobre o mesmo em condições de umidade maior do que a recomendada para algumas operações agrícolas (limite superior da faixa de friabilidade do solo), situação esta atraída e propiciada pela presença de resíduos culturais superficiais, e isso tudo ainda de modo contínuo e na ausência de rotações culturais bem planejadas e bem conduzidas, a camada superficial do solo sob semeadura direta tende a consolidar, a ponto de, às vezes, quase impedir a entrada de água da chuva na mesma. Agrava a situação o fato de, na semeadura direta, por não haver mobilização do solo, a rugosidade superficial do mesmo ser muito pequena ou, praticamente, nula, fazendo com que a retenção superficial da água da chuva e dos sedimentos da erosão, bem como a diminuição da velocidade da enxurrada, sejam também muito pequenas ou, praticamente, nulas. Torna a situação ainda mais grave o fato de, ao se pensar que a técnica de semeadura direta, por si só, é suficiente para resolver todos os problemas relacionados com a conservação do solo e da água sobre as terras agrícolas brasileiras; mais especificamente que ela, como prática isolada, irá, ao mesmo tempo, impedir ou baixar a perda de solo por erosão aos níveis permissíveis e controlar a enxurrada a ponto de fazer com que toda a água da chuva permaneça na área de ocorrência, não só não mais serem recomendados terraços nas lavouras agrícolas, como também

efetuando a operação de semeadura e de outras que seguem a ela no sentido do declive do terreno (morro acima-morro abaixo), ao mesmo tempo em que fomentando a retirada dos terraços das lavouras que já os tinham. Essa forma de pensar e de conduzir a técnica de semeadura direta, no nosso País, é totalmente descabida, de fato pobre, sem nenhum respaldo científico e de caráter extremamente reducionista, entre outros qualificativos no gênero. Definitivamente, e com certa urgência (a erosão está aí, solta, rolando como quer nos solos brasileiros, é só parar, ver e crer no que se está vendo), é preciso mudar essa forma de interpretar e usar a técnica de semeadura no nosso País, a qual, quando bem implantada e bem conduzida, inquestionavelmente, é a melhor opção de manejo para, efetivamente, reduzir a perda de solo por erosão das áreas cultivadas.

Dos fatos mencionados, resulta o que está aí acontecendo nos dias atuais no nosso País, ou seja, embora com o uso generalizado da técnica de semeadura direta, os solos agrícolas brasileiros continuam sendo erodidos em quantidade acima da tolerável, as fontes superficiais de água continuam sendo assoreadas e tendo suas águas degradadas pelos produtos da erosão, e as conseqüências do processo, econômicas, sociais e ambientais, alcançando proporções, cada vez, maiores. Desta forma, acredita-se que os resultados desta pesquisa possam ir ao encontro da solução para esses problemas todos, podendo ser usados como guia na elaboração de planos de conservação do solo e da água para a propriedade agrícola, na derivação de valores do fator C – cobertura e manejo do solo dos modelos USLE e RUSLE de predição da erosão hídrica –, na escolha de métodos e procedimentos de preparo do solo e/ou de semeadura das culturas, no cálculo de espaçamento de terraços, entre outras aplicações, principalmente relacionado com métodos de preparo do solo que se enquadrem na categoria de conservacionistas e, especialmente, dentre eles, se escolher para uso a técnica de semeadura direta. E quanto mais as condições de campo às quais se possam aplicar os resultados desta pesquisa se aproximarem das condições de realização da mesma, como intensidade da chuva, tipo de solo, inclinação do declive e tipo e modo de cultivo, tanto melhor e mais confiável será sua aplicação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J. E.; ARKIN, G. F. A light interception method for measuring row crop ground cover. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 41, p. 789-792, 1977.

ALBERTS, E. E.; NEIBLING, W. H. Influence of crop residues on water erosion. In: UNGER, P.W. (Ed.) **Managing agricultural residues**, Boca Raton, 1994. p. 19-39.

ALLMARAS, R. R.; BURWELL, R. E.; LARSON, W. E. **Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage**. Washington: USDA, 1966. 22 p. (Conservation Research Report, 7).

AMARAL, A. J. et al. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um Cambissolo Húmico da região do planalto sul-catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2145-2155, 2008.

ARMSTRONG, C. L.; MITCHELL, J. K. Plant canopy characteristics and process with effect transformation of rainfall properties. **Transactions American Society Agronomy Engineering**, St. Joseph, v. 5, p. 1400-1409, 1988.

BEARE, M. H.; HENDRIX, P. F.; COLEMAN, D. C. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no tillage soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 58, p. 777-789, 1994.

BERTOL, I. **Relações da erosão hídrica com métodos de preparo do solo, na ausência e na presença de cobertura vegetal por resíduos culturais de trigo**. 1986. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Relações da erosão hídrica com métodos de preparo do solo na ausência e na presença de cobertura por resíduo cultural de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, p. 187-192, 1987.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Cobertura morta e métodos de preparo do solo na erosão hídrica em solo com crosta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 373-379, 1989.

BERTOL, I. **Comprimento crítico de declive para preparos conservacionistas de solo**. 1995. 185f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Comprimento crítico de declive em sistemas de preparo conservacionistas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 139-148, 1997.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 657-668, 2000.

BERTOL, I. et al. Erosividade das chuvas e sua distribuição entre 1989 e 1998 no município de Lages(SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 455-464, 2002.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 155-163, 2004.

BERTOL, I. et al. Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 543-553, 2006.

BERTOL, I. et al. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 133-142, 2007.

BERTOL, I., GONZÁLEZ, A. P.; VÁZQUEZ, E. V. Rugosidade superficial do solo sob diferentes doses de resíduo de milho submetido à chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 103-110, 2007b.

BRENNEMAN, L. G.; LAFLEN, J. M. Modeling sediment deposition behind corn residue. **American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 80, p. 1245-1250, 1982.

BURWELL, R. E.; LARSON, W. E. Infiltration as influenced by tillage, induced random roughness and pore space. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v. 33, p. 449-452, 1969.

CAMPOS, B. C. et al. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 383-391, 1999.

CARVALHO, F. L. C.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Eficácia de formas e doses de manejo de resíduo culturas de trigo na redução da erosão hídrica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 251-257, 1990.

CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Sistema plantio direto: evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 5, p. 333-370, 2007.

CASTRO, L.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 339-352, 2006.

CIASC. **Centro de informática e automação de Santa Catarina, mapa interativo**. Disponível em: <http://www.ciascmapainterativo.gov.br>. Acesso em: 22 fev. 2007.

COGO, N.P. **Effect of residue cover, tillage induced roughness, and slope length on erosion and related parameters**. 1981. 346 f. Tese (Doutorado) – Purdue University, West Lafayette, 1981.

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

COGO, N. P.; MOLDENHAUER, W. C.; FOSTER, G. R. Soil loss reductions from conservation tillage practices. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 48, p. 368-373, 1984.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 475-483, 1996.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por método de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 743-753, 2003.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, 2004. 400 p.

DARBOUX, F. HUANG, C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 69, p. 748-756, 2005.

DAVEREDE, I. C. et al. Phosphorus Runoff: Effect of tillage and soil phosphorus levels. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 32, p. 1436-1444, 2003.

DENARDIN, J. E. et al. Vertical mulching como prática conservacionista para manejo de enxurrada em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2847-2852, 2008.

DISSMEYER, G. E.; FOSTER, G. R. Estimating the cover management factor (C) in the universal soil loss equation for forest conditions. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 36, p. 235-240, 1981.

DULEY, F. L. Surface factors effecting the rate of intake of water by soils. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v. 4, p. 60-64, 1939.

ELLISON, W. D. Soil erosion studies. **Agronomy Engineering**, Washington, v. 28, p.145-147, 197-201, 245-248, 297-300, 349-351, 402-405, 442-444, 1947.

ELTZ, F. L. F.; NORTON, L. D. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage and canopy cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1746-1755, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

ESWARAN, H.; LAL, R.; REICH, F. Land degradation: an overview. In: BRIDGES, E. M. et al. (Eds.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LAND DEGRADATION AND DESERTIFICATION, 2., 1992, Khon Kaen, Thailand. **Proceedings...** Responses to land degradation. New Delhi: Oxford Press, 1992. p. 1-25.

FORSYTHE, W. **Física de suelos**: manual de laboratorio. San José: IICA, 1975. 212 p.

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: PRODUCTION SEDIMENT YIELD WORKSHOP, 1972, Oxford. **Anais...** Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. Oxford, 1972. 285 p.

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. Soil erosion and sedimentation by water: an overview. In: NATIONAL SYMPOSIUM BY WATER, 1977, Illinois. **Proceedings...** St. Joseph, 1977. p.1-13.

FOSTER, G. R.; JOHNSON, C. B.; MOLDENHAUER, W. C. Critical slope lengths for unanchored cornstalk and wheat straw residue. **Transactions of America Society Agriculture Engineering**, St. Joseph, v. 25, p. 935-939, 1982a.

FOSTER, G. R.; JOHNSON, C. B.; MOLDENHAUER, W. C. Hydraulics of failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control. **Transactions of America Society Agriculture Engineering**, St. Joseph, v. 25, p. 940-947, 1982b.

FOSTER, G. R. et al. Process of soil erosion by water. In: FOLLET, R. F.; STEWART, B. A. (Ed.) **Soil erosion and crop productivity**. Madison: American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/Soil Science Society of America, 1985. p. 137-162.

GHIDEY, F.; ALBERTS, E. E. Runoff and soil losses as affected by corn and soybean tillage systems. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 53, n. 1, p. 64-70, 1998.

GILLEY, J. E.; FINKNER, S. C.; VARVEL, G. E. Runoff and erosion as affected by corn residue. II. Rill and interrill components. **Transactions of America Society Agriculture Engineering**, St. Joseph, v. 29, p. 161-167, 1986.

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

GONZALEZ HIDALGO, J. C.; RAVENTOS, J.; ECHEVARRIA, M. T. Comparison of sediment ratio curves for plants with different architectures. **Catena**, Amsterdam, v. 29, p. 333-340, 1996.

HUDSON, N. W. **Soil conservation**. 3. ed. Ames: Iowa State University Press, 1995. 391 p.

JOHNSON, C. B.; MOLDENHAUER, W. C. Effect of chisel versus moldboard plowing on soil erosion by water. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 43, p.177-179, 1979.

KAMPHORST, E. C. et al. Predicting depression storage from soil surface roughness. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 64, p. 1749-1758, 2000.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.) **Methods of soil analysis, physical and mineralogical properties, including statistics, measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KNAPEN, A. et a. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review. **Earth Science Reviews**, Amsterdam, v. 80, p. 75-109, 2007.

KOHNKE, H. **Soil physics**. New York: McGraw-Hill, 1968. 224 p.

LAFLEN, J. M.; BAKER, J. L.; HARTWIG, R. O. Soil and water loss from conservation tillage systems. **Transactions of America Society Agriculture Engineering**, St. Joseph, v. 39, n. 6, p. 2139-2145, 1978.

LARSON, W. E.; GILL, W. R. Soil physical parameters for designing new tillage systems. In: NATIONAL CONSERVATION TILLAGE CONFERENCE, 1973, Ankeny. **Proceedings...** Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1973. p. 13-22.

LEVIEN, R. **Erosão na cultura do milho em diferentes sistemas de cultivo anterior e métodos de preparo**. 1988. 168 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

LI, Y. X.; TULLBERG, J. N.; FREEBAIRN, D. M. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, p. 282-292, 2007.

LINDSTROM, W. J. et al. Tillage effects on water runoff and soil erosion after sod. **Journal Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 53, n. 1, p. 59-63, 1998.

LOPES, P. R. C.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa de tipo e quantidade de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo na redução da erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 71-75, 1987.

MANNERING, J. V.; MEYER, L. D. The effects of various rates of surface mulch on infiltration and erosion. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 27, n. 1, p. 84-86, 1963.

MEYER, L. D.; PORTS, M. A. Prediction and control of urban erosion and sedimentation. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON URBAN HYDROLOGY, HIDRAULICS, AND SEDIMENTATION, 1976, Lexington, Kentucky. **Proceedings....** Lexington: University of Kentucky, 1976. p. 323-331.

MOHAMOUD, Y. M.; EWING, L. K. Rainfall interception by corn and soybean residue. **Transactions American Society Agriculture Engineering**, St. Joseph, v. 33, p. 507-512, 1990.

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**. 1999. 162f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

MORAIS, L. F. B.; MUTTI, L. S. M.; ELTZ, F. L. F. Índices de erosividade correlacionados com perdas de solo no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 281-284, 1988a.

MORAIS, L. F. B.; MUTTI, L. S. M.; ELTZ, F. L. F. Relações entre características físicas da chuva e perdas de solo no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 285-288, 1988b.

MORAIS, L. F. B.; COGO, N. P. Comprimentos críticos de rampa para diferentes manejos de resíduos culturais em sistema de semeadura direta em um argissolo vermelho da depressão central (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 1041-1051, 2001.

NORTON, L. D.; COGO, N. P.; MOLDENHAUER, W. C. Effectiveness of mulch in controlling soil erosion. In: EL SWAIFY, S. A.; MOLDENHAUER, W. C.; LO, A. (Eds.). **Soil erosion and conservation**. Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1985. 80 p.

ONSTAD, C. A. Depressional storage on tilled soil surfaces. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 27, p. 729-732, 1984.

PANACHUKI, E. **Rugosidade superficial do solo e índices relacionados, sob diferentes sistemas de manejo**. 2008. 143 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2008.

PORTELA, J. C. **Restauração da estrutura do solo por sequências culturais e sua relação com a erosão hídrica**. 2009, 188 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RANEY, W. A.; ZINGG, A. W. **Principles of tillage**. Washington: Yearbook of Agriculture, 1957. p. 277-281.

RENARD, K. G. et al. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington: USDA Department of Agriculture, 1997. 384 p. (Agriculture Handbook, nº 703).

SCHICK, J. et al. Erosão hídrica em cambissolo húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 427-436, 2000.

SCHWAB, G. O. et al. **Soil and water conservation engineering**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1981. 525 p.

SHARPLEY, A. N.; McDOWELL, R. W.; KLEINMAN, P. J. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, p. 287-307, 2001.

SILVA, I. F. **Formação, estabilidade e qualidade de agregados do solo afetados pelo uso agrícola**. 1993. 126 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

STRECK, E. V.; COGO, N. P. Reconsolidation of the soil surface after tillage discontinuity, with and without cultivation, related to erosion and its prediction with RUSLE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 141-152, 2003.

SWANSON, N. P. A rotating-boom rainfall simulator. **Transactions of the**

American Society Agronomy Engineering, St. Joseph, v. 26, n. 1738-1743. 1965.

TEDESCO, M. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, Hagerstown, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1984.

TOY, T. J.; FOSTER, G. R.; RENARD, K. G. **Soil erosion**: process, predicting, measurement and control. New York: USDA, 2002. 338 p.

UNGER, P. W. Common soil and water conservation practices. In: AGASSI, M. (Ed). **Soil erosion, conservation and rehabilitation**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 239-265.

VIVAS MIRANDA, J. G. **Análisis fractal del microrrelieve del suelo**. 2000. 313 f. Tese (Doutorado). Facultad de Ciencias, Universidade da Coruña, Coruña, 2000.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P.; STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 763-774, 2004.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P. Inter-relação da biomassa vegetal subterrânea-estabilidade de agregados-erosão hídrica em solo submetido a diferentes formas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1713-1722, 2008.

ZHANG, G. S. et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 122-128, 2007.

ZOLDAN JUNIOR, W. A. et al. Rugosidade superficial do solo formada por escarificação e influenciada pela erosividade da chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 353-362, 2008.

WAGNER, L. E. **Profile meter program**: documentation. Manhattan: Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Wind Erosion Research United States of America, 1992. 27 p.

WISCHMEIER, W. H. A rainfall erosion index for universal soil loss equation. **Proceedings of Soil Science Society of America**, Madison, v. 23, p. 246-249, 1959.

WISCHMEIER, W. H. Storms and soil conservation. **Journal of Soil Water Conservation**, Ankeny, v. 17, p. 55-59, 1962.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains**: guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington: USDA, 1965. 47 p. (Agronomy Handbook, 282).

WISCHMEIER, W. H. Conservation tillage to control water erosion. In: NATIONAL CONSERVATION TILLAGE CONFERENCE, 1973, Ankeny. **Proceedings...** Ankeny: Soil Conservation American Society, 1973. p.133-141.

WISCHMEIER, W. H. Estimating the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed areas. In: PROCEEDINGS OF THE SEDIMENT-YIELD WORKSHOP, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford. **Proceedings...** Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. Washington: Printing Office, 1975. p.118-124. (USDA-ARS, ARS-40).

WISCHMEIER, W. H.; SMITH D. D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58 p. (Agricultural Handbook, 537).

8. APÊNDICES

APENDICE 1. Valores de alguns atributos físicos e químicos do solo usado na pesquisa (Nitossolo Bruno Aluminoférrico húmico), localizado na região do Planalto Sul-Catarinense (SC), em diferentes horizontes e camadas do seu perfil - continua

Atributos físicos do solo													
Horiz.	Prof.	Rep.	Densidade		Porosidade			Estabilidade de agregados		Carbono orgânico CO ³	Argila	Silte	Areia
			Solo	Partícula	Macro	Micro	Total	DMP ¹	DMG ²				
		..... Mg m ⁻³ .....		..... m ³ m ⁻³ .....			.....mm.....		g Kg ⁻¹		.....g kg ⁻¹		
A1	0 - 12	1	1,072	2,390	0,107	0,444	0,552	5,60	5,20	33,60	645	217	138
		2	1,037	2,483	0,157	0,425	0,582	5,67	4,58	34,44	625	265	110
		Média	1,054	2,437	0,132	0,435	0,567	5,63	4,89	34,02	635	241	124
A2	12 - 26	1	1,041	2,577	0,284	0,312	0,596	4,29	3,57	29,40	705	193	102
		2	1,101	2,560	0,228	0,342	0,570	5,72	5,12	30,62	685	220	95
		Média	1,071	2,569	0,256	0,327	0,583	5,00	4,35	30,01	695	206	99
AB	26 - 46	1	1,121	2,513	0,216	0,338	0,554	3,87	3,02	27,59	725	175	100
		2	1,066	2,493	0,268	0,305	0,572	4,63	3,74	27,43	725	182	93
		Média	1,094	2,503	0,242	0,321	0,563	4,25	3,38	27,51	725	178	96
Bt1	46 - 74	1	1,000	2,434	0,122	0,467	0,589	1,94	1,32	17,16	765	154	81
		2	1,058	2,482	0,128	0,446	0,574	2,40	1,63	17,79	785	135	80
		Média	1,029	2,458	0,125	0,456	0,581	2,17	1,47	17,48	775	144	81
Bt2	74 - 123	1	1,093	2,631	0,121	0,464	0,585	1,85	1,19	11,84	625	278	97
		2	1,136	2,588	0,109	0,453	0,561	2,07	1,52	11,84	625	311	64
		Média	1,114	2,610	0,115	0,458	0,573	1,96	1,36	11,84	625	295	80
BC/Cr	123 - 137+	1	0,952	2,510	0,187	0,433	0,621	1,33	0,84	9,43	505	345	150
		2	0,996	2,506	0,139	0,464	0,602	1,52	0,91	7,95	515	418	67
		Média	0,974	2,508	0,163	0,449	0,612	1,43	0,87	8,69	510	381	109

¹DMP=diâmetro médio ponderado - úmido; ²DMG=diâmetro médio geométrico - úmido; ³CO=carbono orgânico.

APENDICE 1. Continuação

Horiz.	Rep.	Atributos químicos do solo ²					
		pH em água	P	K	Ca	Mg	Al
		Rel. 1:1	.....mg dm ⁻³ .....	.....Cmol _c dm ⁻³			
A1	1	5,31	1,23	61	0,50	0,44	0,3
	2	5,16	1,32	71	0,39	0,40	0,7
	Média	5,24	1,27	66	0,44	0,42	0,5
A2	1	4,82	1,05	50	0,15	0,16	3,1
	2	4,90	1,26	45	0,17	0,18	3,1
	Média	4,86	1,15	47,5	0,16	0,17	3,1
AB	1	4,78	0,42	40	0,09	0,08	3,5
	2	4,67	0,36	44	0,10	0,09	3,8
	Média	4,73	0,39	42	0,10	0,08	3,6
Bt1	1	4,80	0,54	29	0,10	0,08	3,8
	2	4,75	0,63	28	0,06	0,04	4,1
	Média	4,78	0,58	28,5	0,08	0,06	3,9
Bt2	1	5,09	0,51	34	0,02	0,02	4,4
	2	4,98	0,45	34	0,02	0,01	5,8
	Média	5,04	0,48	34	0,02	0,02	5,1
BC/Cr	1	4,82	0,21	35	0,02	0,02	5,7
	2	4,75	0,24	25	0,01	0,02	5,9
	Média	4,79	0,22	30	0,01	0,02	5,8

²P=fósforo; K=potássio; Ca=cálcio; Mg=magnésio; Al=alumínio (todos na forma trocável).

APÊNDICE 2. Declividade e valor do fator S (fator inclinação do declive nos modelos USLE e RUSLE) nas unidades experimentais onde foram alocados os tratamentos estudados

Parcela/Tratamento		Declividade	Fator S ¹
		m m ⁻¹	
2	SD, s/hastes 1/1 dose	0,147	2,111
6	SD, s/hastes 1/2 dose	0,159	2,392
4	SD, s/hastes 1/4 dose	0,145	2,066
1	SD, c/hastes 1/1 dose	0,165	2,541
5	SD, c/hastes 1/2 dose	0,162	2,467
3	SD, c/hastes 1/4 dose	0,163	2,427
Média		0,157	2,281

¹S=65,41 sen² θ+4,56 sen θ+0,065, onde θ=ângulo do declive (Wischmeier & Smith, 1978).

APÊNDICE 3. Intensidade média e duração (valores observados) das chuvas simuladas aplicadas, medidas antes da adição dos níveis de fluxo extra de água nas parcelas experimentais, nos tratamentos estudados

Parcela	Tratamento ¹	Tipo de resíduo	Intensidade da chuva	Duração da chuva
n ^o			mm h ⁻¹	min
2	SD, s/hastes 1/1 dose	Aveia preta	71,3	75
6	SD, s/hastes 1/2 dose	Aveia preta	72,6	75
4	SD, s/hastes 1/4 dose	Aveia preta	75,1	110
1	SD, c/hastes 1/1 dose	Milho	77,4	120
5	SD, c/hastes 1/2 dose	Milho	69,8	120
3	SD, c/hastes 1/4 dose	Milho	74,9	120

¹SD=semeadura direta; s/hastes=sem hastes sulcadoras ou facões; c/hastes=com hastes sulcadoras ou facões; 1/1, 1/2 e 1/4 dose=respectivamente toda, metade e um quarto da quantidade total de resíduo produzida, uniformemente espalhada na superfície do solo.

APÊNDICE 4. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, dose integral (1/1– 8 Mg ha⁻¹) do resíduo cultural de milho

Número de ordem do fluxo extra	Fluxo da chuva		Fluxo extra	Fluxo total	q _c ¹	q _t ²	q _m ³	Le ⁴			
	mm h ⁻¹	-----m ³ s ⁻¹ m ⁻¹ x 10 ⁻³ -----							----m----		
1	77	0,24	0,25	0,49	0,15	0,40	0,32	29			
			0,25	0,49					0,40	0,32	29
			0,23	0,47					0,38	0,31	28
2			0,47	0,71		0,62	0,54	45			
			0,47	0,71					0,62	0,54	45
			0,49	0,73					0,65	0,57	46
3			0,90	1,14		1,05	0,98	77			
			0,99	1,23					1,14	1,06	83
			0,97	1,21					1,12	1,04	82
4			1,14	1,38		1,29	1,22	95			
			1,14	1,38					1,29	1,22	95
			1,18	1,42					1,33	1,26	97
5			1,53	1,77		1,68	1,60	123			
			1,40	1,64					1,55	1,48	114
			1,40	1,64					1,55	1,48	114
6			1,59	1,83		1,74	1,67	128			
			1,59	1,83					1,74	1,67	128
			1,58	1,82					1,73	1,66	127

¹q_c=taxa constante de descarga da enxurrada sob a aplicação somente da chuva simulada. ²q_t=taxa total global de descarga da enxurrada (chuva simulada+fluxo extra de água). ³q_m=taxa de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental. ⁴Le=comprimento equivalente de declive simulado na pesquisa pela adição dos fluxos extras de água.

APÊNDICE 5. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, metade (1/2 – 4 Mg ha⁻¹) da dose integral do resíduo cultural de milho

Número de ordem do fluxo extra	Fluxo da chuva	Fluxo extra	Fluxo total	q _c ¹	q _t ²	q _m ³	Le ⁴	
	mm h ⁻¹	-----m ³ s ⁻¹ m ⁻¹ x 10 ⁻³ -----					---- m ----	
1	70	0,21	0,38	0,59	0,092	0,47	0,42	56
			0,38	0,59		0,47	0,42	56
			0,38	0,59		0,47	0,42	56
2			0,55	0,76		0,64	0,60	77
			0,57	0,78		0,66	0,62	79
			0,59	0,80		0,68	0,63	81
3			0,83	1,04		0,92	0,88	110
			0,83	1,04		0,92	0,88	110
			0,81	1,02		0,90	0,86	108
4			0,94	1,15		1,03	0,99	123
			0,86	1,07		0,95	0,90	114
			0,81	1,02		0,90	0,86	108
5			1,33	1,54		1,42	1,37	170
			1,33	1,54		1,42	1,37	170
			1,36	1,57		1,45	1,40	174
6			1,51	1,72		1,60	1,55	191
			1,71	1,92		1,80	1,75	215
			1,78	1,99		1,87	1,82	224

¹q_c=taxa constante de descarga da enxurrada sob a aplicação somente da chuva simulada. ²q_t=taxa total global de descarga da enxurrada (chuva simulada+fluxo extra de água). ³q_m=taxa de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental. ⁴Le=comprimento equivalente de declive simulado na pesquisa pela adição dos fluxos extras de água.

APÊNDICE 6. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, um quarto ($1/4 - 2 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho

Número de ordem do fluxo extra	Fluxo da chuva	Fluxo extra	Fluxo total	q_c^1	q_t^2	q_m^3	Le^4			
	mm h^{-1}	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1} \times 10^{-3}$			----- m -----					
1	75	0,23	0,32	0,55	0,13	0,45	0,38			
			0,45	0,68				0,51		
2			0,41	0,64		0,54	0,47			
			0,82	1,05				0,95	0,88	80
			0,52	0,75				0,65	0,58	55
3			0,56	0,79		0,69	0,62			
			1,12	1,35				1,25	1,18	106
			1,03	1,26				1,16	1,09	98
4			1,16	1,39		1,29	1,22			
			1,39	1,62				1,52	1,45	129
			1,45	1,68				1,58	1,51	134
5			1,45	1,68		1,58	1,51			
			1,68	1,91				1,81	1,74	153
			1,81	2,04				1,94	1,87	164
6			1,74	1,97		1,87	1,80			
			1,81	2,04				1,94	1,87	164
			1,87	2,10				2,00	1,93	169
			1,91	2,14		2,04	1,97	173		

¹ q_c =taxa constante de descarga da enxurrada sob a aplicação somente da chuva simulada. ² q_t =taxa total global de descarga da enxurrada (chuva simulada+fluxo extra de água). ³ q_m =taxa de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental. ⁴ Le =comprimento equivalente de declive simulado na pesquisa pela adição dos fluxos extras de água.

APÊNDICE 7. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, dose integral (1/1 – 8 Mg ha⁻¹) do resíduo cultural de milho

Número de ordem do fluxo extra	Fluxo da chuva	Fluxo extra	Fluxo total	q _c ¹	q _t ²	q _m ³	Le ⁴			
	mm h ⁻¹	-----m ³ s ⁻¹ m ⁻¹ x 10 ⁻³ -----					---- m ----			
1	77	0,24	0,26	0,50	0,046	0,31	0,28			
			0,23	0,47				0,28	0,25	66
			0,24	0,48				0,29	0,26	68
2			0,52	0,76		0,57	0,54			
			0,55	0,79				0,60	0,57	142
			0,58	0,82				0,63	0,60	150
3			0,74	0,98		0,79	0,76			
			0,70	0,94				0,75	0,72	178
			0,77	1,01				0,82	0,79	195
4			0,89	1,13		0,94	0,91			
			0,89	1,13				0,94	0,91	224
			1,32	1,56				1,37	1,34	327
5			1,18	1,42		1,23	1,20			
			1,27	1,51				1,32	1,29	315
			1,18	1,42				1,23	1,20	293
6			1,46	1,70		1,51	1,48			
			1,46	1,70				1,51	1,48	360
			1,41	1,65				1,46	1,43	348

¹q_c=taxa constante de descarga da enxurrada sob a aplicação somente da chuva simulada. ²q_t=taxa total global de descarga da enxurrada (chuva simulada+fluxo extra de água). ³q_m=taxa de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental. ⁴Le=comprimento equivalente de declive simulado na pesquisa pela adição dos fluxos extras de água.

APÊNDICE 8. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, metade (1/2 – 4 Mg ha⁻¹) da dose integral do resíduo cultural de milho

Número de ordem do fluxo extra	Fluxo da chuva	Fluxo extra	Fluxo total	q _c ¹	q _t ²	q _m ³	Le ⁴	
	mm h ⁻¹	-----m ³ s ⁻¹ m ⁻¹ x 10 ⁻³ -----					---- m ----	
1	70	0,21	0,63	0,84	0,067	0,70	0,66	114
			0,63	0,84				114
			0,59	0,80				108
2			0,72	0,93		0,79	0,76	129
			0,72	0,93				129
			0,72	0,93				129
3			0,83	1,04		0,90	0,87	147
			0,83	1,04				147
			0,83	1,04				147
4			0,96	1,17		1,03	0,99	168
			0,96	1,17				168
			1,00	1,21				175
5			1,35	1,56		1,42	1,38	233
			1,29	1,50				223
			1,35	1,56				233
6			1,80	2,01		1,87	1,83	306
			1,74	1,95				297
			1,67	1,88				285

¹q_c=taxa constante de descarga da enxurrada sob a aplicação somente da chuva simulada. ²q_t=taxa total global de descarga da enxurrada (chuva simulada+fluxo extra de água). ³q_m=taxa de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental. ⁴Le=comprimento equivalente de declive simulado na pesquisa pela adição dos fluxos extras de água.

APÊNDICE 9. Entradas e saídas de água nas parcelas experimentais, sob diversas formas, no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, um quarto (1/4 – 2 Mg ha⁻¹) da dose integral do resíduo cultural de milho

Número de ordem do fluxo extra	Fluxo da chuva	Fluxo extra	Fluxo total	q _c ¹	q _t ²	q _m ³	Le ⁴	
	mm h ⁻¹	-----m ³ s ⁻¹ m ⁻¹ x 10 ⁻³ -----					---- m ----	
1	75	0,23	0,28	0,51	0,046	0,32	0,30	78
			0,28	0,51		0,32	0,30	78
			0,26	0,49		0,30	0,27	71
2			0,88	1,11		0,92	0,90	221
			0,88	1,11		0,92	0,90	221
			0,84	1,07		0,88	0,86	212
3			0,82	1,05		0,86	0,84	207
			0,86	1,09		0,90	0,88	217
			0,95	1,18		0,99	0,97	238
4			1,16	1,39		1,20	1,18	288
			1,21	1,44		1,25	1,23	300
			1,21	1,44		1,25	1,23	300
5			1,44	1,67		1,48	1,46	355
			1,51	1,74		1,55	1,53	372
			1,44	1,67		1,48	1,46	355
6			1,83	2,06		1,87	1,85	449
			1,89	2,12		1,93	1,91	463
			1,89	2,12		1,93	1,91	463

¹q_c=taxa constante de descarga da enxurrada sob a aplicação somente da chuva simulada. ²q_t=taxa total global de descarga da enxurrada (chuva simulada+fluxo extra de água). ³q_m=taxa de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental. ⁴Le=comprimento equivalente de declive simulado na pesquisa pela adição dos fluxos extras de água.

APÊNDICE 10. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, dose integral (1/1 – 8 Mg ha⁻¹) do resíduo cultural de milho

Nível de fluxo extra	Amostra n ^o	q_m	D_p	CSE
		m ³ s ⁻¹ m ⁻¹ * 10 ⁻³	kg m ⁻² h ⁻¹	g g ⁻¹
01	1	0,32	0,139	0,0011
	2	0,32	0,104	0,0008
	3	0,31	0,073	0,0006
02	1	0,54	0,142	0,0007
	2	0,54	0,102	0,0005
	3	0,57	0,050	0,0002
03	1	0,98	0,327	0,0009
	2	1,06	0,288	0,0008
	3	1,04	0,313	0,0009
04	1	1,22	0,285	0,0007
	2	1,22	0,339	0,0008
	3	1,26	0,147	0,0003
05	1	1,60	0,196	0,0004
	2	1,48	0,069	0,0001
	3	1,48	0,145	0,0003
06	1	1,67	0,127	0,0002
	2	1,67	0,075	0,0001
	3	1,66	0,058	0,0001

APÊNDICE 11. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, metade ($1/2 - 4 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho

Nível de fluxo extra	Amostra n°	q_m $\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1} * 10^{-3}$	D_p $\text{Kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	CSE g g^{-1}
01	1	0,42	1,094	0,007
	2	0,42	0,863	0,006
	3	0,42	1,000	0,007
02	1	0,60	1,020	0,005
	2	0,62	0,845	0,004
	3	0,63	0,814	0,004
03	1	0,88	1,488	0,005
	2	0,88	0,694	0,002
	3	0,86	0,698	0,002
04	1	0,99	1,663	0,005
	2	0,90	1,948	0,006
	3	0,86	1,739	0,006
05	1	1,37	2,963	0,006
	2	1,37	2,193	0,005
	3	1,40	0,987	0,002
06	1	1,56	3,797	0,006
	2	1,76	0,954	0,002
	3	1,82	1,113	0,002

APÊNDICE 12. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta sem hastes sulcadoras ou facões, um quarto ($1/4 - 2 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho

Nível de fluxo extra	Amostra n°	q_m $\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1} * 10^{-3}$	D_p $\text{Kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	CSE g g^{-1}
01	1	0,38	0,801	0,007
	2	0,51	1,076	0,008
	3	0,47	1,430	0,011
02	1	0,88	1,843	0,008
	2	0,58	1,602	0,010
	3	0,62	1,903	0,012
03	1	1,18	2,329	0,008
	2	1,09	0,644	0,002
	3	1,22	1,640	0,005
04	1	1,45	0,828	0,002
	2	1,51	0,499	0,001
	3	1,51	0,611	0,002
05	1	1,74	0,798	0,002
	2	1,87	0,816	0,002
	3	1,80	0,520	0,001
06	1	1,87	0,559	0,001
	2	1,93	0,391	0,001
	3	1,97	0,706	0,001

APÊNDICE 13. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, dose integral (1/1 – 8 Mg ha⁻¹) do resíduo cultural de milho

Nível de fluxo extra	Amostra n ^o	q_m	D_p	CSE
		m ³ s ⁻¹ m ⁻¹ * 10 ⁻³	Kg m ⁻² h ⁻¹	g g ⁻¹
01	1	0,28	0,135	0,0013
	2	0,25	0,329	0,0037
	3	0,26	0,123	0,0014
02	1	0,54	0,344	0,0019
	2	0,57	0,118	0,0006
	3	0,60	0,373	0,0018
03	1	0,76	1,126	0,0044
	2	0,72	0,382	0,0015
	3	0,79	0,583	0,0022
04	1	0,91	0,750	0,0024
	2	0,91	0,495	0,0016
	3	1,34	0,479	0,0011
05	1	1,20	0,580	0,0015
	2	1,29	0,941	0,0022
	3	1,20	0,897	0,0022
06	1	1,48	1,279	0,0026
	2	1,48	0,654	0,0013
	3	1,43	0,324	0,0007

APÊNDICE 14. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, metade ($1/2 - 4 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho

Nível de fluxo extra	Amostra n°	q_m	D_p	CSE
		$\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1} * 10^{-3}$	$\text{Kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	g g^{-1}
01	1	0,66	2,07	0,0091
	2	0,66	3,95	0,0174
	3	0,63	3,10	0,0143
02	1	0,76	1,89	0,0073
	2	0,76	2,56	0,0099
	3	0,76	4,03	0,0156
03	1	0,87	3,13	0,0156
	2	0,87	2,78	0,0139
	3	0,87	1,81	0,0090
04	1	0,99	2,52	0,0104
	2	0,99	1,64	0,0068
	3	1,03	1,82	0,0078
05	1	1,38	10,06	0,0216
	2	1,32	7,02	0,0158
	3	1,38	8,16	0,0175
06	1	1,83	34,21	0,0522
	2	1,77	30,97	0,0473
	3	1,70	17,03	0,0260

APÊNDICE 15. Níveis de fluxo extra de água e correspondentes taxas de descarga da enxurrada no ponto médio da parcela experimental (q_m), taxas de erosão (D_p) e concentrações de sedimento na enxurrada (CSE), no tratamento semeadura direta com hastes sulcadoras ou facões, um quarto ($1/4 - 2 \text{ Mg ha}^{-1}$) da dose integral do resíduo cultural de milho

Nível de fluxo extra	Amostra n°	q_m	D_p	CSE
		$\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1} * 10^{-3}$	$\text{Kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	g g^{-1}
01	1	0,30	5,72	0,0741
	2	0,30	4,62	0,0599
	3	0,27	3,06	0,0431
02	1	0,90	17,27	0,0781
	2	0,90	25,56	0,1156
	3	0,86	11,13	0,0528
03	1	0,84	11,09	0,0539
	2	0,88	8,38	0,0388
	3	0,97	14,51	0,0613
04	1	1,18	15,77	0,0548
	2	1,23	2,25	0,0076
	3	1,23	6,37	0,0214
05	1	1,46	1,50	0,0042
	2	1,53	7,12	0,0192
	3	1,46	3,01	0,0085
06	1	1,85	8,71	0,0195
	2	1,91	4,80	0,0104
	3	1,91	8,78	0,0190