

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

EROSÃO HÍDRICA RELACIONADA ÀS CONDIÇÕES FÍSICAS
DE SUPERFÍCIE E SUBSUPERFÍCIE DO SOLO, INDUZIDAS POR
FORMAS DE CULTIVO E DE MANEJO DOS RESÍDUOS CULTURAIS

Leandro Bochi da Silva Volk
Engenheiro Agrônomo
UFRGS

Porto Alegre (RS), Brasil
Março de 2002

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

EROSÃO HÍDRICA RELACIONADA ÀS CONDIÇÕES FÍSICAS
DE SUPERFÍCIE E SUBSUPERFÍCIE DO SOLO, INDUZIDAS POR
FORMAS DE CULTIVO E DE MANEJO DOS RESÍDUOS CULTURAIS

Leandro Bochi da Silva Volk
Engenheiro Agrônomo
UFRGS

Dissertação apresentada como um dos requisitos
à obtenção do grau de Mestre
em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil
Março de 2002

AGRADECIMENTOS

Ao professor Neroli Pedro Cogo, orientador e amigo, pela experiência e conhecimentos que me foram passados e pela paciência com minhas falhas.

Ao Eng^o Agr^o Dr. Edemar Valdir Streck, Especialista em Solos da EMATER/RS, por ter cedido gentilmente dados de seu experimento, complementando este estudo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), especialmente ao professor Renato Levien, pelos ensinamentos transmitidos.

À UFRGS, pelos recursos financeiros, físicos e humanos disponibilizados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

À Estação Experimental Agronômica da UFRGS, pelos recursos físicos, e aos seus funcionários, pelo apoio.

Ao projeto FINEP/PRONEX - Solos (atualmente CNPq/PRONEX – Solos), pelos recursos financeiros, e aos seus funcionários, Eng^o Agr^o Arcângelo Mondardo, Téc. Agr^a Agostinho de Oliveira e Auxiliar de Campo Eduardo, pelo auxílio na condução dos experimentos no campo.

Aos funcionários do Departamento de Solos da UFRGS que, de alguma forma, me auxiliaram.

Aos colegas de curso da pós-graduação, pelo companheirismo e amizade, que levo comigo para sempre na lembrança.

Aos bolsistas de iniciação científica Alessandra e Jair, pela dedicação e amizade, que tornaram o trabalho mais ameno.

Aos meus pais, Nelson e Sandra, meus sogros, Antonio e Jussara, meus irmãos, Pietro, Marcus, Júlio e Fernando e, em especial, a minha noiva Gabriela, pelo afeto, carinho e compreensão dedicados, incondicionalmente, durante o curso.

À DEUS.

EROSÃO HÍDRICA RELACIONADA ÀS CONDIÇÕES FÍSICAS DE SUPERFÍCIE E SUBSUPERFÍCIE DO SOLO, INDUZIDAS POR FORMAS DE CULTIVO E DE MANEJO DOS RESÍDUOS CULTURAIS ¹

Autor: Leandro Bochi da Silva Volk
Orientador: Neroli Pedro Cogo

SINOPSE

As diferentes práticas de manejo do solo resultam em diferentes níveis de qualidade da sua estrutura, os quais, por sua vez, resultam em diferentes níveis de erosão hídrica. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes formas de cultivo do solo e de manejo dos resíduos culturais em algumas condições físicas de superfície e subsuperfície do mesmo, em relação à erosão hídrica. Para isto, foi conduzido um experimento em condições de chuva simulada, na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Eldorado do Sul – RS, no período compreendido entre janeiro de 1996 e maio de 2001. Utilizou-se um solo Argissolo Vermelho Distrófico típico, bastante degradado, com declividade média de 8%. Os tratamentos consistiram do cultivo de milho-aveia preta, nos preparos de solo convencional (com e sem incorporação dos resíduos culturais) e semeadura direta; sem cultivo/sem preparo do solo (com e sem cobertura vegetal morta) e preparo convencional sem cultivo. As chuvas foram aplicadas com o simulador de chuva de braços rotativos, na intensidade de 64,0 mm h⁻¹ e duração de 90 minutos. Nas condições deste estudo, observou-se que a incorporação dos resíduos culturais reduziu a erosão hídrica, refletindo uma melhoria da estrutura do solo. O cessamento do preparo do solo permitiu sua superfície reconsolidar-se e ocasionou perda de solo decrescente no tempo, enquanto a perda de água manteve-se sempre elevada. A perda de solo observada nos testes de erosão realizados após o cultivo do milho foi maior do que a observada nos testes realizados após o cultivo da aveia preta.

¹/ Dissertação de Mestrado 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. (68 p.) – Março, 2002. Trabalho realizado com apoio financeiro do Projeto CNPq-PRONEX / Solos.

WATER EROSION RELATED TO SURFACE AND SUBSURFACE SOIL PHYSICAL CONDITIONS, INDUCED BY FORMS OF CROPPING AND CROP RESIDUE MANAGEMENT.¹

Author: Leandro Bochi da Silva Volk
Adviser: Neroli Pedro Cogo

SUMMARY

Different soil management practices result in different levels of soil's structure quality. These, in turn, result in different levels of water erosion. The objective of this research work was to evaluate the effects of different cropping practices and crop residue management on some surface and subsurface soil physical conditions, related to water erosion. To accomplish this, an experiment was carried out under simulated rainfall, at the Agronomic Experimental Station of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), in Eldorado do Sul - RS, between January, 1996 and May, 2001. The soil used was a highly deteriorated, typical dystrophic red podzolic, 8% in slope. Artificial rains were applied with a rotating-boom rainfall simulator, at the constant intensity of 64.0 mm h⁻¹ and 90 minutes duration. Treatments consisted of corn/black oats cultivation, under conventional tillage (with and without incorporation of crop residue) and no-tillage, and no cultivation/no-tillage (with and without crop residue on the surface) and under conventional tillage and without cultivation. In this study conditions, it was found that incorporation of crop residues improved soil's structure and reduced water erosion. Tillage retirement permitted the soil to reconsolidate its surface and caused decreasing soil losses with time, while water losses were always high. Soil losses observed in the erosion tests accomplished after corn cultivation were higher than those observed after black oats cultivation.

¹/ Master dissertation in Soil Science, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (68 p.) – March, 2002.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Erosão hídrica do solo	3
2.1.1. O processo erosivo pela água da chuva e suas associações	3
2.1.2. Predição da erosão hídrica pelo modelo “RUSLE”	6
2.2. Estrutura do solo	8
2.2.1. Conceito central.....	8
2.2.2. Formação dos agregados de solo	9
2.2.3. Estabilidade dos agregados de solo	10
2.2.4. Raízes e resíduos culturais incorporados e sua relação com os agregados de solo.....	11
2.2.5. Consolidação da superfície do solo	13
2.2.6. Degradação e recuperação da estrutura do solo	14
2.3. Estrutura do solo e erosão hídrica	16
2.3.1. Princípios envolvidos	16
2.3.2. Interrelações existentes	16
2.4. Hipóteses de trabalho	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. Localização, solo e características climáticas da região da área experimental	19
3.2. Histórico da área experimental	19
3.3. Tratamentos estudados e sua operacionalização	20
3.4. Unidades experimentais e aparelho simulador de chuva.....	22
3.5. Testes de erosão com chuva simulada	22
3.6. Amostragens e determinações	23
3.6.1. No campo, antes da aplicação das chuvas	23
3.6.1.1. Coleta de amostras para determinação da densidade do solo	23
3.6.1.2. Coleta de amostras para determinação do índice DMP (diâmetro médio ponderado) dos agregados de solo a úmido	23

3.6.1.3. Coleta de amostras para determinação da umidade gravimétrica atual do solo.....	24
3.6.1.4. Coleta de amostras para determinação da massa de resíduos culturais superficiais.....	24
3.6.1.5. Coleta de amostras para determinação da massa de raízes e resíduos culturais incorporados ao solo.....	24
3.6.2. No campo, durante a aplicação das chuvas	24
3.6.2.1. Tempos de início e término da enxurrada	24
3.6.2.2. Medição da taxa instantânea da enxurrada e amostragem para determinação da concentração instantânea de sedimentos na mesma	25
3.6.2.3. Velocidade do escoamento superficial da enxurrada ...	25
3.6.2.4. Amostragem de enxurrada para avaliação da distribuição de tamanho dos sedimentos transportados na mesma, nas classes de 2,000 a 0,037 mm.....	25
3.6.3. No campo, após a aplicação das chuvas	26
3.6.3.1. Checagem da intensidade das chuvas aplicadas	26
3.6.4. Em laboratório	26
3.6.4.1. Densidade do solo	26
3.6.4.2. Índice DMP dos agregados de solo a úmido	26
3.6.4.3. Umidade do solo antecedente às chuvas aplicadas	27
3.6.4.4. Massa de resíduos culturais superficiais	27
3.6.4.5. Massa de raízes e resíduos culturais incorporados ao solo.....	27
3.6.4.6. Cálculo da intensidade observada das chuvas aplicadas.	28
3.6.4.7. Quantidade total de enxurrada ou perda total de água ...	28
3.6.4.8. Concentração instantânea de sedimentos na enxurrada.	28
3.6.4.9. Taxa instantânea e perda total de solo	28
3.6.4.10. Distribuição de tamanho dos sedimentos transportados na enxurrada, nas classes de 2,000 a 0,037 mm	29
3.6.4.11. Índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada.	29
3.6.4.12. Ajustamento de resultados	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1. Condições físicas de superfície e subsuperfície do solo induzidas pelas formas de manejo estudadas	32
4.1.1. Cobertura, rugosidade, crosta e consolidação da superfície do solo.....	32
4.1.2. Densidade do solo	34
4.1.3. Massa de resíduos culturais incorporados e de raízes no solo.....	36
4.1.4. Índice DMP dos agregados de solo a úmido	38
4.1.5. Umidade do solo antecedente às chuvas aplicadas	40
4.2. Perdas de água e solo por erosão hídrica	40
4.2.1. Perda de água	40
4.2.1.1. Tempos de início e equilíbrio da enxurrada	40
4.2.1.2. Velocidade da enxurrada	44
4.2.1.3. Taxa constante de enxurrada.....	46

4.2.1.4. Perda total de água	48
4.2.2. Perda de solo	50
4.2.2.1. Taxa de perda de solo sob enxurrada constante.....	50
4.2.2.2. Índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada .	52
4.2.2.3. Perda total de solo	54
4.3. Interpretação global e sumarizada dos resultados obtidos.....	57
5. CONCLUSÕES	59
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
7. APÊNDICES	66
8. RESUMO BIOGRÁFICO.....	68

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Testes de erosão, datas de aplicação das chuvas simuladas, tipos de cultivo anterior e tratamentos em que os testes foram realizados..	23
2. Descrição qualitativa da cobertura, rugosidade, crosta e consolidação da superfície do solo nos tratamentos estudados, antes de cada teste de erosão com chuva simulada.....	32
3. Densidade do solo em duas profundidades, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.....	35
4. Massa seca de resíduos culturais incorporados mais raízes (Mr + Mz) e massa seca de raízes (Mz), em duas profundidades de solo, nos tratamentos com cultivo, antes dos testes de erosão com chuva simulada realizados.....	37
5. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados de solo, em duas profundidades, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.....	39
6. Umidade do solo antecedente às chuvas simuladas, em duas profundidades, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.....	42
7. Velocidade da enxurrada aos 30, 60 e 90 minutos de chuva simulada, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.....	45
8. Índice D ₅₀ dos sedimentos transportados na enxurrada aos 30, 60 e 90 minutos de chuva simulada, nos tratamentos estudados e nos testes de erosão com chuva simulada realizados.....	53

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Tempos de início (T_i) e equilíbrio (T_e) da enxurrada nos diferentes tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.....	43
2. Taxa constante de enxurrada (q_e) nos diferentes tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados	47
3. Perda total de água (PTA) nos diferentes tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados	49
4. Taxa de perda de solo (TPS) sob enxurrada constante nos diferentes tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.....	51
5. Perda total de solo (PTS) nos diferentes tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados	56

RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
1. Declividade média das parcelas experimentais dos tratamentos estudados	66
2. Intensidade observada das chuvas simuladas aplicadas, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados	66
3. Duração observada das chuvas simuladas aplicadas, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.....	67
4. Massa de resíduos culturais, em três tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.....	67

1. INTRODUÇÃO

Durante muitos anos, os solos gaúchos foram mal manejados, tendo sido utilizado o sistema convencional de cultivo como a forma mais comum de preparo de solo e semeadura. Neste sistema, o solo é mobilizado diversas vezes antes da semeadura, causando deterioração de sua estrutura e deixando a superfície do mesmo desprovida de cobertura vegetal. Por deixar o solo exposto à ação dos agentes erosivos, este sistema de preparo favoreceu elevadas perdas de solo por erosão hídrica no passado, a ponto de tornar muitas áreas improdutivas para a agricultura gaúcha, as quais, hoje, estão abandonadas ou são utilizadas para outro propósito.

Na última década, sistemas de preparo de solo denominados conservacionistas, como a semeadura direta, passaram a ser utilizados por expressiva parte dos produtores. Contudo, é freqüente o manejo inadequado de muitas áreas sob semeadura direta, em que o produtor abre mão das práticas conservacionistas de suporte, como terraços e preparo do solo e semeadura em contorno, fato que, associado à presença de pouca cobertura do solo por resíduos culturais, favorece as perdas de solo, água, sementes, nutrientes e agroquímicos por erosão hídrica. Esta situação traz consigo prejuízos para o ambiente e para o produtor, podendo, até, comprometer ambos.

O manejo do solo e da cobertura por resíduos culturais são fatores facilmente controlados pelo homem, por meio de sistemas de cultivo. Quando bem planejadas, as práticas de manejo do solo e culturas provocam alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo que podem resultar num solo melhor estruturado e com agregados mais estáveis, conseqüentemente mais resistente aos agentes erosivos.

Os agregados, junto com as partículas primárias, são os componentes

básicos da estrutura do solo. Os agregados são formados por processos físicos, químicos e biológicos, que interagem entre si, e o manejo dado ao solo afeta esta interação, alterando a intensidade com que cada processo atua na agregação das partículas de solo.

A estrutura original do solo é modificada sempre que este sofre intervenção antrópica. Normalmente, um solo sob sistema de cultivo convencional, devido ao fracionamento dos agregados maiores durante as operações de preparo, apresenta agregados de menor diâmetro se comparado com o mesmo solo quando não cultivado. Estes agregados de menor diâmetro serão mais facilmente transportados pela enxurrada e, estando o solo desprovido de cobertura vegetal, mais suscetível à erosão hídrica ele será. Já um solo sob sistema de cultivo com semeadura direta, possui agregados de maior diâmetro e mais estáveis, indicando uma melhor estrutura e, por estar provido com boa cobertura vegetal, será menos suscetível à erosão hídrica. Portanto, um dado conjunto de medidas adotado pelo produtor resultará em diferentes níveis de qualidade da estrutura do solo manejado. Estes diferentes níveis de qualidade da estrutura do solo podem ser relacionados com a maior ou menor resistência dos agregados ao processo erosivo pela água das chuvas, seja pelo impacto de suas gotas diretamente no solo, seja pelo cisalhamento causado pela enxurrada associada.

É neste contexto que destaca-se o objetivo deste trabalho, que consiste na avaliação dos efeitos de diferentes formas de cultivo do solo e de manejo dos resíduos culturais nas condições físicas de superfície e subsuperfície do mesmo, relacionados com as perdas de água e solo causadas por erosão hídrica.

Os dados obtidos nesta pesquisa poderão, mais tarde, serem aproveitados para derivação de valores dos coeficientes das variáveis do subfator uso anterior da terra (“PLU – prior land use”), do conhecido modelo de predição da erosão hídrica EUPSR - Equação Universal de Perda de Solo Revisada (“RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation”). A RUSLE é um modelo computadorizado, de fácil aplicação, desenvolvido nos Estados Unidos, para prever a perda de solo média anual por erosão hídrica de áreas agrícolas, principalmente, mas também outras (Renard et al., 1997).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Erosão hídrica do solo

2.1.1. O processo erosivo pela água da chuva e suas associações

Os dois principais agentes ativos de erosão hídrica são a chuva e a enxurrada associada. O solo é o agente passivo.

O processo erosivo é dividido em três fases básicas: desagregação, transporte e deposição. A desagregação consiste na separação inicial das partículas de solo (individuais ou agregados) da massa que as contém, pela ação de impacto das gotas da chuva e/ou pela ação de cisalhamento da enxurrada. O transporte das partículas de solo desagregadas se dá pelo salpicamento provocado pelo impacto das gotas da chuva e/ou pela ação da enxurrada, podendo os dois processos serem simultâneos. Em terrenos inclinados, a maior parte do transporte das partículas de solo se dá pelo movimento da enxurrada. A deposição ou sedimentação do material que foi desagregado e transportado ocorre quando a carga de sedimentos na enxurrada é maior do que a capacidade de transporte da mesma (Ellison, 1947; Foster & Meyer, 1977).

Uma vez iniciada a chuva, o processo de erosão hídrica pode se desenvolver nas formas de erosão em entressulcos, sulcos, voçorocas e dos taludes dos cursos de água. A erosão em entressulcos, que vem a ser o primeiro e mais importante estágio do processo erosivo, inicia pela ação de impacto das gotas da chuva sobre o solo, com a remoção de solo dando-se de maneira aproximadamente uniforme, sobre aquelas porções menos rugosas da superfície do terreno. Nesta forma de erosão, a desagregação das partículas de solo se dá pelo impacto direto das gotas da chuva sobre sua superfície. O transporte das partículas já desagregadas se dá pela ação combinada do impacto das gotas da

chuva com o fluxo delgado de enxurrada, o qual torna-se turbulento, devido à ação de impacto das gotas da chuva sobre o mesmo. Ocorrendo concentração do escoamento superficial, em pequenos canais formados sobre a superfície do terreno, o processo passa a ser denominado de erosão em sulcos.

A erosão em sulcos ocorre pela ação cisalhante do fluxo de água concentrado em pequenos canais, auxiliada pela ação do impacto direto das gotas da chuva, as quais podem tornar turbulento o fluxo de água. A erosão em voçorocas compartilha do mesmo princípio como na erosão em sulcos, porém é de maior magnitude. Não existe uma divisão exata entre estas duas formas de erosão, mas pode-se identificar a ocorrência da erosão em sulcos pela presença de pequenos canais nas lavouras que são facilmente eliminados pelos métodos culturais normais, enquanto a erosão em voçorocas é identificada pela presença de canais suficientemente grandes para impedirem a livre passagem dos equipamentos agrícolas.

A erosão dos taludes dos cursos de água se dá essencialmente pela ação cisalhante do escoamento concentrado nas paredes dos mesmos e, apesar de poder atingir grandes proporções, é de pouca significância em áreas agrícolas (Foster, 1982; Hudson, 1995).

A magnitude do processo de erosão hídrica é função de seis fatores principais, quais sejam: erosividade da chuva, erodibilidade do solo, comprimento e grau do declive, cobertura e manejo do solo e práticas conservacionistas de suporte (Wischmeier & Smith, 1978).

A erosividade da chuva representa sua habilidade potencial em causar erosão. Várias são as características de chuva que irão determinar sua erosividade, porém três delas destacam-se no estudo do processo erosivo: intensidade, duração e frequência. A intensidade da chuva é a relação entre o volume de sua precipitação e o tempo de duração da mesma. Quanto maior a intensidade, maior a energia cinética das gotas da chuva e, com isto, maior sua capacidade de desagregação de solo, reduzindo a infiltração de água e aumentando o escoamento superficial, com conseqüente aumento nas perdas de solo e água (Wischmeier, 1962). A duração da chuva irá determinar sua quantidade total, a qual se relacionará à taxa de infiltração de água no solo e à

quantidade de enxurrada. A frequência com que as chuvas ocorrem pode determinar seu maior ou menor poder erosivo, uma vez que, quanto maior o teor de umidade no solo no momento antecedente à chuva, menor será sua capacidade de infiltração de água da chuva e maiores serão a enxurrada e os riscos de erosão.

A erodibilidade do solo é caracterizada pela vulnerabilidade do mesmo à ação dos agente erosivos. O fator erodibilidade do solo é a resultante da interação de suas características e propriedades físicas, químicas, mineralógicas e biológicas (Smith & Wischmeier, 1962; Wischmeier & Smith, 1978). Entre os parâmetros físicos relacionados com a erodibilidade do solo, destacam-se a textura, a estrutura e o teor de umidade no solo antes da chuva. Solos argilosos possuem agregados mais estáveis, o que lhes confere maior resistência à desagregação de suas partículas, porém, devido sua textura mais fina, quando desagregados suas partículas são facilmente transportadas pela enxurrada. O oposto é verdadeiro para solos de textura mais arenosa. O teor de matéria orgânica no solo é a característica química que possui maior impacto no processo erosivo. A sua presença confere ao solo maior agregação de suas partículas, o que se traduz em menor erosão; por outro lado, quando presente em elevadas quantidades, pode baixar a densidade dos agregados e facilitar seu transporte (Wischmeier & Mannering, 1969). As principais características mineralógicas relacionadas com a agregação das partículas de solo e, conseqüentemente, com sua erodibilidade, são os grupos funcionais de superfície, a carga nas camadas, a área superficial específica, o espaçamento entre camadas e a expansividade. Nos solos altamente intemperizados, como os principais solos brasileiros, atenção especial é dada à presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, os quais funcionam como material cimentante, propiciando melhor agregação entre as partículas de solo (McBride, 1994).

Quanto ao efeito da topografia, expresso em termos simples, solos em áreas mais declivosas são mais vulneráveis à erosão hídrica do que solos em áreas planas. A topografia do terreno é composta pelo comprimento, grau e curvatura do declive. Estes fatores influenciam a velocidade e o volume de enxurrada, os quais, por sua vez, irão determinar o tamanho e a quantidade de

partículas em suspensão na mesma (Wischmeier & Smith, 1978).

A cobertura vegetal e o manejo do solo constituem a principal forma de se reduzir a erosão hídrica. A cobertura vegetal se caracteriza pela cobertura da superfície do solo pela vegetação viva ou por resíduos culturais remanescentes. Sua função é a de proteger o solo contra o impacto direto das gotas da chuva, dissipando, parcial ou totalmente, a energia cinética das mesmas, além de contribuir para uma melhor estrutura de solo e servir como obstáculo físico ao livre escoamento da água (Cogo, 1981; Amado et al., 1989).

Dentro do manejo que é dado ao solo, os sistemas de preparo e plantio/semeadura são de suma importância do ponto de vista de controle da erosão. Os diferentes sistemas de preparo e plantio/semeadura resultam em diferentes condições físicas internas e de superfície do solo. Grande mobilização do solo, característica do sistema convencional de preparo, promove incorporação parcial ou total dos resíduos culturais, deixando o solo parcial ou totalmente descoberto e promovendo grande perda de carbono, desestabilizando sua estrutura e aumentando sua suscetibilidade à erosão (Wischmeier, 1973; Cogo, 1981).

As práticas conservacionistas de suporte (preparo e plantio/semeadura em contorno, culturas em faixas em contorno e sistemas de terraceamento) têm a função principal de limitar a ação erosiva da enxurrada por meio da diminuição de sua energia cinética (Hudson, 1995; Cogo & Bertol, 1998). O princípio fundamental envolvido nestas práticas é diminuir o comprimento de rampa e/ou aumentar a rugosidade superficial do solo (orientada e ao acaso). Deste modo, tem-se um aumento na capacidade de retenção e armazenamento superficial da água, reduzindo a quantidade e a velocidade da enxurrada e, conseqüentemente, sua capacidade de desagregação e transporte de solo (Cogo, 1981). A combinação de fatores de clima, solo, topografia e manejo é que irá determinar a eficácia de controle da erosão das práticas conservacionistas de suporte, indicando, assim, a necessidade ou não de ser adotada uma ou mais delas.

2.1.2. Predição da erosão hídrica pelo modelo “RUSLE”

A Equação Universal de Perda de Solo Revisada (“RUSLE – Revised

Universal Soil Loss Equation”) é um modelo de erosão empírico, designado a prever a perda média anual de solo, sobre um longo período de tempo, transportado pela enxurrada de declives específicos, em sistemas específicos de cultivo e manejo agrícolas, assim como de terras de pastejo (Renard et al., 1997). A RUSLE é um modelo de operacionalização totalmente computadorizado, retendo na sua estrutura os mesmos fatores da “USLE - Universal Soil Loss Equation” (Wischmeier & Smith, 1978), tendo a seguinte expressão matemática:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P ,$$

onde A = erosão média anual estimada, R = fator chuva e enxurrada associada (índice de erosividade), K = fator solo (índice de erodibilidade), L = fator comprimento de declive, S = fator grau de declive, C = fator cobertura e manejo e P = fator prática conservacionista de suporte.

O fator C – cobertura e manejo é o mais complexo de ser obtido e para o qual converge o assunto principal tratado na presente pesquisa. Este fator reflete o efeito combinado da cobertura e das práticas de manejo do solo sobre a erosão hídrica, sendo o fator mais adequado para comparar os impactos relativos das opções de manejo nos planos de conservação do solo. Para a obtenção do fator C, é necessário o valor da razão de perda de solo (“SLR – Soil Loss Ratio”), o qual é obtido pelo produto de cinco subfatores, da seguinte forma

$$SLR = PLU \cdot CC \cdot SC \cdot SR \cdot SM ,$$

onde SLR = razão de perda de solo; PLU = subfator uso anterior da terra; CC = subfator cobertura do solo pela copa da planta; SC = subfator cobertura superficial do solo; SR = subfator rugosidade superficial do solo; e SM = subfator umidade do solo. Estando o objetivo da presente pesquisa relacionado com o uso anterior da terra sobre a erosão hídrica, será enfatizado aqui o subfator PLU (prior land use).

O subfator PLU expressa, concomitantemente, o efeito residual subsuperficial das culturas anteriores na estrutura do solo e o efeito das práticas anteriores de preparo de solo na consolidação de sua superfície, ambos

relacionados à erosão hídrica. As raízes das plantas e os resíduos culturais podem controlar a erosão hídrica mecanicamente, agindo como barreira física ao movimento de água e solo. Uma vez incorporados, os resíduos culturais passam a se decompor junto com as raízes mortas e a exsudar substâncias orgânicas que atuam como agentes ligantes e, ao mesmo tempo, servem como fonte de alimento para os microrganismos do solo, os quais também produzem substâncias orgânicas ligantes, contribuindo para o aumento da agregação do solo, melhorando sua estrutura e, assim, reduzindo sua suscetibilidade à erosão hídrica. As práticas de preparo de solo tendem a romper as ligações entre os seus agregados e acelerar a decomposição da matéria orgânica, conseqüentemente diminuindo a estabilidade dos agregados de solo. Uma vez cessados os preparos, o solo tende a consolidar-se e torna-se menos erodível (Renard et al., 1997).

2.2. Estrutura do solo

2.2.1. Conceito central

A estrutura do solo foi definida por Dexter (1988) como “a heterogeneidade espacial dos diferentes componentes e das propriedades do solo”. Dito de outro modo, a estrutura do solo é o arranjo das partículas primárias (areia, silte e argila) e secundárias (agregados) em certos padrões estruturais, que incluem, necessariamente, o espaço poroso entre elas. A unidade básica estrutural do solo é denominada agregado, sendo este definido como um agrupamento de partículas primárias do solo, que ocorre naturalmente, e no qual as forças que mantêm as partículas unidas são mais fortes do que aquelas existentes entre os agrupamentos adjacentes (Kemper & Chepil, 1965).

A estrutura do solo é melhor caracterizada qualitativamente, não existindo um parâmetro simples que a caracterize adequadamente em termos quantitativos (Sanchez, 1976). Para uma quantificação comparativa, são medidos parâmetros indiretos, tais como: grau de estabilidade dos agregados, distribuição de seus tamanhos e volume total e distribuição de tamanho de poros (Kiehl, 1979).

A estrutura do solo tem pronunciado efeito sobre alguns atributos do solo, tais como: porosidade, permeabilidade, infiltração de água e capacidade de retenção de água. Em geral, um solo com boa estrutura possui agregados mais

estáveis e, conseqüentemente, boa distribuição do espaço poroso, boa permeabilidade, elevada capacidade de infiltração de água e boa capacidade de retenção de umidade, o que se reflete em menor erodibilidade, ou seja, o solo fica menos suscetível à erosão hídrica (Schwab et al.,1981).

2.2.2. Formação dos agregados de solo

A formação dos agregados no solo, a partir das partículas minerais simples, ocorre em duas etapas, simultaneamente, sendo a primeira a formação dos agregados em si e, a segunda, sua estabilização (Allison, 1973; Tisdall & Oades, 1982). A formação dos agregados no solo é influenciada por vários fatores, destacando-se as argilas, os íons trocáveis, os óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, as plantas e seus resíduos culturais, os compostos orgânicos, os macro e microrganismos, o ar, a água, a temperatura e a pressão mecânica sobre ele exercida (Allison, 1968).

Os processos de agregação do solo podem ser classificados como sendo de natureza física, química e biológica, os quais, normalmente, ocorrem simultaneamente. No processo físico, os agregados podem ser formados por ciclos de umedecimento e secagem, que promovem a aproximação e o afastamento entre partículas, por fragmentação, em que agregados menores são formados a partir do rompimento de unidades maiores, e por compressão, quando ocorre a aproximação das partículas. O processo químico compreende a floculação e dispersão de argila, a precipitação de óxidos de ferro e alumínio sobre a superfície dos minerais de argila e a ligação entre os compostos orgânicos e as partículas minerais do solo. O processo biológico contempla as ações dos micro e macrorganismos do solo e das plantas, associadamente.

O processo de formação e estabilização dos agregados de solo é possível devido não só aos processos físicos, químicos e biológicos, como também à presença de substâncias agregantes ou, também assim denominadas, substâncias cimentantes. Estas substâncias são responsáveis pelo desencadeamento dos processos, uma vez que promovem a união entre as diferentes partículas primárias e secundárias do solo (Kiehl, 1979). Estas substâncias são : argila, sílica coloidal, compostos orgânicos, metais polivalentes,

carbonatos e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Allison, 1973; Tisdall & Oades, 1982).

Existe uma vasta bibliografia que evidencia a importância da matéria orgânica na formação dos agregados de solo e, conseqüentemente, na estrutura do solo. A adoção de sistemas de cultura e manejo que mantenham a proteção do solo e o contínuo aporte de resíduos orgânicos é fundamental para manutenção da boa estrutura do solo (Lal & Greenland, 1979; Tisdall & Oades, 1982). Ao mesmo tempo, este aporte de compostos orgânicos, quer por secreções radiculares, quer por renovação do sistema radicular e da parte aérea das plantas, ou pelos resíduos da colheita, serve como suprimento de energia para a atividade microbiana, cujos subprodutos, constituídos de moléculas orgânicas em diversas fases de decomposição, atuam também como agentes de formação e estabilização dos agregados (Allison, 1973; Harris et al., 1966). Dentre os compostos orgânicos, os principais agentes ligantes são os polisacarídeos e as substâncias húmicas (Allison, 1968; Tisdall & Oades, 1982; Chaney & Swyft, 1986).

Com base no conhecimento dos processos discutidos, pode-se inferir que as práticas de preparo de solo e as seqüências de cultura provocam alterações na estabilidade estrutural do solo, podendo esta vir a decair ou a melhorar.

2.2.3. Estabilidade dos agregados de solo

A presença ou distribuição de tamanho dos agregados de solo, por si só, não é parâmetro suficiente para identificar uma boa ou uma má estrutura de solo. Para uma correta avaliação da mesma, deve-se também determinar a estabilidade dos agregados de solo e do espaço poroso entre eles.

Martin et al. (1955) salientaram a importância dos agentes cimentantes, já que, uma vez formados, os agregados de solo rapidamente desapareceriam e se recombinariam com outras partículas, se não fossem estabilizados.

A presença de plantas, cultivadas ou nativas, é de suma importância no processo de estabilização. O material orgânico liberado pelas raízes pode estabilizar os agregados de forma direta e indireta. Diretamente porque as raízes exsudam compostos orgânicos que ajudam na estabilização dos agregados de

solo, ao mesmo tempo em que o envolvimento físico destes pelas raízes os estabilizam. Indiretamente porque as raízes funcionam como fonte de energia para os microrganismos da rizosfera, os quais podem produzir substâncias estabilizantes (Tisdall & Oades, 1979). Com isto, a estabilidade dos agregados tende a aumentar em solos sob cultivo com espécies de grande produção de raízes. Isto foi verificado por Tisdall & Oades (1979), Paladini & Mielniczuk (1991), Silva (1993) e Campos et al. (1999).

A estabilidade dos agregados de solo pode ser dividida em dois tipos. O primeiro diz respeito à capacidade do solo de conservar sua estrutura sob a ação da água, principalmente quando do rápido umedecimento dos agregados, os quais tendem a romper, enquanto o segundo está relacionado à capacidade do solo em conservar sua estrutura quando submetido à pressões mecânicas externas (Dexter, 1988).

As práticas de manejo, como preparo de solo, adição de materiais orgânicos e histórico de cultivo da área, têm significativa influência sobre a agregação quando considerados longos períodos de tempo (Harris et al., 1966).

Segundo Tisdall & Oades (1982), uma boa estrutura de solo, que proporcione um bom desenvolvimento das culturas, deve conter agregados de solo que se mantenham estáveis quando sujeitos à alterações bruscas de umidade e, ao mesmo tempo, boa qualidade do espaço poroso, que se caracteriza pela continuidade e estabilidade dos poros e boa distribuição de macro e microporos. Além disso, solos bem agregados proporcionam tração estável aos equipamentos e implementos de cultivo, condições físicas adequadas à penetração e crescimento de raízes e boa drenagem, com retenção moderada de água, o que se reflete diretamente numa diminuição da vulnerabilidade do solo à erosão hídrica.

2.2.4. Raízes e resíduos culturais incorporados e sua relação com os agregados de solo

As plantas se diferenciam quanto sua influência sobre a estrutura do solo, principalmente os dois grandes grupos gramíneas e leguminosas. As gramíneas têm recebido atenção especial, face ao grande efeito que exercem na

agregação e estabilização dos agregados, devido sua maior capacidade de regeneração, maior produção de matéria seca e denso sistema radicular. Já as leguminosas se destacam pela qualidade de sua matéria seca, de fácil decomposição pelos microrganismos do solo.

A estabilidade dos agregados de solo depende diretamente da ação das raízes e hifas e, deste modo, do crescimento do sistema radicular. As raízes das plantas estimulam a agregação estável no solo, tanto pela promoção de uma alta população microbiana na rizosfera, como pelo suprimento de resíduos orgânicos. As gramíneas perenes e algumas plantas invasoras, por meio de seu sistema radicular fasciculado, têm efeito positivo na agregação e na estabilidade dos agregados de solo (Silva & Mielniczuk, 1997). Algumas leguminosas, como o tremoço-azul (*Lupinus angustifolius*), não diferem das gramíneas em termos de produção de matéria seca de raízes, tendo assim o mesmo efeito sobre os agregados de solo (Campos et. al., 1999). Dissmeyer & Foster (1981) destacam a importância de raízes finas - na camada de solo até cinco centímetros - que, junto com a matéria orgânica, envolvem os microagregados de solo, formando e estabilizando os macroagregados. Deste modo, o número de macroagregados declina com a diminuição do conteúdo de matéria orgânica do solo e com a compactação pelo tráfego (Tisdall & Oades, 1982; Allison, 1968). Esta situação se agrava com a queima ou remoção dos resíduos culturais, com o preparo de solo em condições inadequadas de umidade, com as excessivas operações de revolvimento da camada arável e com a não reposição dos nutrientes retirados do solo pelos cultivos (Allison, 1968).

Silva (1993), estudando a formação, estabilidade e qualidade dos agregados de solo afetadas pelo uso agrícola, encontrou elevada correlação entre densidade de raízes e formação e estabilização dos agregados.

Campos et. al. (1999) observaram que a cobertura de solo invernal tem importante influência sobre a estabilidade da estrutura do solo, uma vez que ela dissipa a energia cinética do impacto direto das gotas da chuva, diminui a amplitude térmica e mantém a umidade do solo. Estes fatores favorecem o desenvolvimento do sistema radicular e a atividade microbiana, conseqüentemente, a formação de um ambiente benéfico à agregação do solo.

Os sistemas de rotações culturais que incluem a combinação de pastagens perenes de gramíneas e leguminosas, além de culturas anuais, são os mais eficientes na manutenção de uma boa estrutura do solo. As pastagens perenes atuam por período mais prolongado, em que as gramíneas influenciam pelo sistema radicular extenso e em constante renovação, e as leguminosas pelo nitrogênio biologicamente fixado e baixa relação C/N, elevando sua taxa de decomposição (Harris et al., 1966; Lal & Greenland, 1979).

Os resíduos culturais, além de servirem como fonte de carbono para os microrganismos do solo, possuem grande importância pela cobertura que propiciam a sua superfície, impedindo a ação desagregante das gotas de chuva, diminuindo a amplitude térmica e mantendo a umidade. Esta condição irá favorecer o desenvolvimento do sistema radicular e a atividade microbiana e, conseqüentemente, a formação de um ambiente benéfico à agregação do solo. Os resíduos de gramíneas se destacam pela menor taxa de decomposição em comparação às leguminosas, mantendo por mais tempo a cobertura do solo (Campos et al., 1999). Ao mesmo tempo, os resíduos de leguminosas possuem menor relação C/N, o que favorece a atividade microbiana e, com isto, a liberação de compostos orgânicos em diferentes estágios de decomposição, auxiliando o processo de agregação.

Como ficou evidenciado, gramíneas e leguminosas atuam em processos distintos de agregação do solo, onde uma complementa a atuação da outra, fazendo com que a combinação gramínea-leguminosa seja a mais eficiente na manutenção de uma boa estrutura do solo.

2.2.5. Consolidação da superfície do solo

Uma vez que o solo não seja mais mobilizado pelas operações de preparo e plantio/semeadura, este entra em processo de reconsolidação de sua superfície.

O processo de consolidação natural do solo consiste no rearranjo de suas partículas pela ação combinada de forças de natureza química, física e biológica. É um processo de alteração de sua estrutura, com aumento da sua densidade e, também, da resistência ao cisalhamento causado pelos agentes

erosivos (Dexter, 1988; Nearing et al., 1988; Renard et al., 1997).

No solo em processo de reconsolidação, quando não cultivado e não mobilizado, a reagregação das partículas primárias e secundárias é ocasionada somente por forças de adesão e coesão, não conferindo ao mesmo um aumento considerável na estabilidade de seus agregados. Contudo, quando cultivado, o solo em processo de reconsolidação tem sua agregação e estabilidade de seus agregados consideravelmente aumentadas, devido à influência do sistema radicular da cultura, que atua como agente de agregação e estabilização destes (Utomo & Dexter, 1982).

O solo em processo de reconsolidação apresenta alterações em algumas de suas características e propriedades físicas, como densidade, agregação, estabilidade de agregados e rugosidade superficial, as quais influem diretamente sobre a erosão hídrica (Utomo & Dexter, 1982; Nearing et al., 1988). Consequentemente, quando um solo entra em processo de reconsolidação, as perdas de solo tendem, progressivamente, a diminuir (Renard et al., 1997).

A presença de crosta superficial, dependendo do seu estado de consolidação, também pode ajudar na estabilização da superfície do solo, tornando-o menos erodível (Nearing et al., 1988).

2.2.6. Degradação e recuperação da estrutura do solo

A degradação da estrutura do solo é caracterizada pela perda de estabilidade dos agregados que a formam, assim como da qualidade do seu espaço poroso. Isto implica em menores taxas de infiltração de água e dificuldades à penetração de raízes no solo (Machado & Brum, 1978; D'Agostini, 1981).

O processo de degradação da estrutura normalmente está associado ao solo cultivado com práticas de manejo inadequadas, tais como: intensa mobilização do solo durante o preparo, principalmente sob umidade baixa ou alta; tráfego de máquinas freqüente e/ou com peso excessivo, igualmente em umidade de solo inadequada; perda de matéria orgânica por oxidação, principalmente devido à mobilização do solo; retirada ou queima, total ou parcial, dos resíduos vegetais, permanecendo o solo sem cobertura; sucessão de culturas com pouca produção da parte aérea e raízes pouco agressivas e falta de contínuo aporte de

matéria orgânica ao solo, principalmente pelos resíduos da cultura anterior. Tisdall & Oades (1982) confirmaram que a estabilização de macroagregados aumenta sob pastagem e diminui quando o solo é arado.

O processo de recuperação da estrutura do solo é o inverso do processo de degradação, porém muito mais difícil e de lenta resposta. Isto passa, necessariamente, por práticas mecânicas e biológicas associadas, adequadas à realidade específica de cada solo e situação. Estas práticas mecânicas e biológicas associadas visam criar condições para que o solo volte a produzir e, com a adoção de práticas de manejo adequadas, possa recuperar sua estrutura original ou chegar o mais próximo possível dela.

Práticas como descompactação de camadas adensadas no solo, recuperação e manutenção da fertilidade do solo, manutenção da cobertura do solo, aporte contínuo de matéria orgânica, rotação de culturas com plantas recuperadoras e o adequado preparo de solo, são de fundamental importância no processo de recuperação da sua estrutura, visto que proporcionarão um ambiente favorável ao bom desenvolvimento das culturas a serem implantadas.

O efeito das plantas na recuperação da estrutura do solo se manifesta de diferentes modos: (i) elas protegem a superfície do solo contra o efeito do salpicamento provocado pelo impacto das gotas da chuva e outros efeitos do clima; (ii) suas raízes, ao penetrarem no solo, promovem pressão sobre as partículas de solo primárias e secundárias, favorecendo a agregação; (iii) elas continuamente retiram água do solo por meio das raízes que estão em contato ou próximas dos grânulos de solo, sendo que este secamento localizado promove a aproximação das partículas; (iv) elas são fonte de alimento para os microrganismos da rizosfera que, diretamente ou indiretamente, liberam compostos orgânicos que servem como substância cimentante e (v) elas são uma constante fonte de matéria orgânica, além de propiciarem a reciclagem de nutrientes (Allison, 1968).

Cabe salientar que as práticas de recuperação do solo com estrutura degradada devem ser adotadas em conjunto e permanentemente, para que o processo seja contínuo e o objetivo alcançado.

2.3. Estrutura do solo e erosão hídrica

2.3.1. Princípios envolvidos

A erosão hídrica é um processo de desagregação e transporte de solo de um local para outro, pela ação da água da chuva e enxurrada associada, que ocorre em três fases básicas: desagregação inicial das partículas de solo da massa que as contém, transporte das mesmas e, por fim, sua deposição em um novo local. Não ocorrendo o processo de desagregação, é natural que não ocorram os outros dois processos.

Como já foi visto, um solo com boa estrutura possui agregados mais estáveis e, conseqüentemente, boa distribuição do espaço poroso. Isto se traduz em solo com agregados mais resistentes ao processo de desagregação pelo impacto das gotas da chuva e cisalhamento da enxurrada, ou pelo seu rápido umedecimento, assim como com boa permeabilidade, elevada taxa de infiltração de água e boa capacidade de retenção de umidade para as plantas. Assim, o solo bem estruturado apresenta condições que dificultam os processos de desagregação e transporte de suas partículas, minimizando o processo de erosão hídrica como um todo. Ellsworth et al. (1991) verificaram que a variação nas propriedades estruturais do solo, ou seus agregados, se reflete diretamente na suscetibilidade do mesmo à erosão. Segundo Bertoni & Lombardi Neto (1990), a maior estabilidade dos agregados de solo em condição úmida possibilita maior resistência dos mesmos à erosão hídrica e maior infiltração de água no solo, uma vez que agregados não estáveis em condição úmida tendem a dispersar e colapsam.

2.3.2. Interrelações existentes

McIntyre (1958) observou que um agregado estável na superfície do solo aumenta significativamente a infiltração de água ao seu redor, uma vez que, não ocorrendo seu rompimento, seja pelo impacto das gotas da chuva, seja pelo seu rápido umedecimento, não ocorre a obstrução do espaço poroso ao seu redor, permitindo a livre passagem de água.

Wilson & Browning (1945), estudando sistemas de cultivo de milho em rotação de culturas e continuamente, observaram que existe uma relação inversa

entre percentagem de agregados maiores do que 0,25 mm de diâmetro e perdas de solo e água. Sistemas de cultivo que promovem o aumento da percentagem de agregados com diâmetro maior do que 0,25 mm, induzem a diminuição das perdas de solo e água por erosão hídrica.

Em experimento de dez anos, com diferentes sistemas de cultivo, Johnston et al. (1942) observaram que a distribuição de tamanho dos agregados de solo foi influenciada pelos sistemas de cultivo. Sistemas que incluem rotação de culturas propiciam aumento na percentagem dos agregados de solo de maior diâmetro, o que se entende como melhoria da estrutura do solo. Em consequência disso, as perdas de solo e água são minimizadas, devido à influência benéfica da nova condição estrutural do solo.

Le Bissonais (1996), estudando diferentes metodologias de avaliação da estabilidade dos agregados de solo, incluindo diferentes velocidades de umedecimento dos mesmos, identificou boa correlação entre diâmetro médio ponderado dos agregados e sua estabilidade frente ao rompimento por impacto das gotas de chuva e formação de crosta superficial. Solo com maior diâmetro médio ponderado de seus agregados apresenta maior resistência ao rompimento quando exposto ao impacto das gotas de chuva, o que se reflete em menor erosão hídrica.

Le Bissonais & Arrouyas (1997) mostraram que a estabilidade dos agregados de solo possui boa correlação com a capacidade deste em sofrer selamento e ter sua taxa de infiltração diminuída sob chuva.

A estabilidade dos agregados de solo, não só frente ao impacto das gotas de chuva e cisalhamento da enxurrada, mas também ao rápido umedecimento, é de suma importância do ponto de vista do estudo da erosão hídrica. Um solo com agregados pouco resistentes ao rápido umedecimento seria facilmente erodível quando exposto à chuva (Yoder, 1936), estando também sujeito ao selamento de sua superfície, já que as partículas desagregadas podem obstruir os poros, limitando a infiltração de água da chuva (Tisdall & Oades, 1982) e facilitando o processo erosivo pela enxurrada.

Albuquerque et al. (2000) observaram que, em solos com maior estabilidade de seus agregados, a resistência dos mesmos à desagregação pelo

impacto das gotas de chuva foi maior. Com base nesta correlação, concluíram que o índice DMP obtido pelo o método de Kemper & Chepil (1965) pode ser utilizado para prever a resistência do solo à erosão hídrica em entressulcos.

Normalmente, em solos sob sistema de cultivo convencional, os agregados maiores são fracionados em unidades menores e mais estáveis. Para Tisdall & Oades (1982), a estabilidade dos agregados também está relacionada ao seu tamanho, onde agregados de menor diâmetro possuiriam maior estabilidade. Contudo, mesmo mais estáveis, por possuírem menor tamanho, esta fração é mais facilmente transportada pela enxurrada.

Solos bem estruturados, com boa estabilidade dos seus agregados, são, normalmente, menos propensos ao processo erosivo pela água da chuva (Wischmeier & Mannering, 1969). Contudo, Levy et al. (1986) salientam que, sob chuva muito intensa, elevada enxurrada pode ocorrer mesmo sem formação de selo na superfície do solo, quando então agregados de maior tamanho e partículas de areia podem ser transportados ou erodidos. Assim, a estabilidade de agregados não deve ser considerada como único indicador da erodibilidade do solo ou risco de erosão em todas as situações. Ela deve ser associada à outras características e propriedades do solo, assim como às condições de sua superfície.

2.4. Hipóteses de trabalho

- 1) A incorporação dos resíduos culturais ao solo, somada ao efeito das raízes das plantas, melhora sua estrutura e reduz as perdas de solo e água por erosão hídrica, comparada à remoção dos mesmos, quando então o efeito resultante é somente das raízes, devido ao maior aporte de material vegetal ao solo na primeira situação.
- 2) O cessamento do preparo de solo permite sua superfície reconsolidar-se no tempo e tornar-se mais resistente à desagregação pela ação dos agentes erosivos, consequentemente reduzindo a perda de solo por erosão hídrica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização, solo e características climáticas da região da área experimental

O estudo foi realizado na Estação Experimental Agronômica (EEA) da UFRGS, localizada no km 146 da rodovia BR 290, município de Eldorado do Sul (RS), entre as latitudes 30° e 30°15' sul e longitudes 51°30' e 51°45', a oeste de Greenwich. O experimento foi instalado sobre um solo Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck et al., 1999), com textura franco arenosa no horizonte superficial, moderadamente profundo e moderadamente drenado, apresentando horizontes A moderado e B textural, com 0,08 m m⁻¹ de declividade média e profundidade efetiva inferior a 80 cm (Lopes, 1984).

A EEA situa-se na região fisiográfica da Depressão Central, a qual caracteriza-se por relevo constituído de amplas planícies aluviais e pendentes sedimentares onduladas de dezenas de metros. Segundo a classificação de Köeppen, o clima da região é classificado como “Cfa” – subtropical úmido sem estiagem, com a temperatura do mês mais frio oscilando entre -3 °C e 18 °C e a do mês mais quente superior a 22 °C (Mota, 1961). A precipitação pluviométrica média anual é de, aproximadamente, 1400 mm, com média mensal de 120 mm (Bergamaschi & Guadagnin, 1990).

3.2 Histórico da área experimental

A área experimental utilizada para esta pesquisa havia já sido estabelecida em 1996, por Streck (1999), sobre solo, intencional e completamente, desestruturado, degradado em termos físicos, químicos e biológicos, por meio do cessamento do cultivo e freqüentes realizações de araços e gradagens, durante

o ano de 1995. Desde o início do experimento, foram mantidos os preparos de solo e a seqüência cultural utilizados por aquele autor, como descrito a seguir.

3.3. Tratamentos estudados e sua operacionalização

Na área experimental acima referida, sobre as dez parcelas de erosão com chuva simulada constituintes da mesma, foram instalados os tratamentos principais para este estudo, com uma repetição, exceto um tratamento que, mais tarde, foi subdividido em dois, ficando sem repetição, cujos resultados foram aproveitados para a realização do presente trabalho, assim descritos:

- a) sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados (parcelas 1 e 2);
- b) sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos (parcelas 3 e 4);
- c) sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos antes das chuvas e posteriormente retornados (parcelas 5 e 6);
- d) sem cultivo, sem preparo de solo, resíduos culturais adicionados, removidos antes das chuvas e posteriormente retornados (parcela 7);
- e) sem cultivo, sem preparo de solo, continuamente descoberto (parcela 8); e
- f) sem cultivo, preparo convencional, continuamente descoberto – tratamento padrão ou testemunha (parcelas 9 e 10);

No tratamento preparo convencional com resíduos culturais incorporados (a), após a colheita das culturas os resíduos culturais das mesmas eram uniformemente distribuídos sobre a superfície do solo e incorporados no dia anterior aos testes de erosão com chuva simulada. No tratamento preparo convencional com resíduos culturais removidos (b), os resíduos culturais eram removidos das parcelas antes do preparo de solo.

Nos tratamentos semeadura direta (c) e sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados (d), os resíduos culturais eram removidos antes dos

testes de erosão com chuva simulada e retornados logo após o término dos mesmos.

As operações de preparo de solo e semeadura foram efetuadas sempre no sentido do declive, conforme filosofia de obtenção do fator C – cobertura e manejo do modelo “RUSLE” (Renard et al., 1997). O preparo convencional das parcelas consistiu de uma aração e duas gradagens, tendo sido feito com arado reversível de três discos, com 28 polegadas de diâmetro, em velocidade próxima a $4,5 \text{ km h}^{-1}$, seguido de grade niveladora excêntrica, com 36 discos de 20 polegadas de diâmetro, em velocidade próxima a $5,0 \text{ km h}^{-1}$, ambos montados no trator. A cultura do milho foi estabelecida com espaçamento entre fileiras de 0,9 m e densidade de 5 plantas por metro, com semeadora manual (saraquá), efetuando-se adubação de 300 kg ha^{-1} (de 1996 a 1998) e 250 kg ha^{-1} (1999 a 2000) da fórmula 5-20-20, distribuída superficialmente na linha. A adubação de cobertura foi feita com 100 kg ha^{-1} de N (na forma de uréia), em duas aplicações, sendo a primeira aos 45 dias após a semeadura e a segunda aos 60 dias após. A cultura da aveia preta foi estabelecida com semeadora-adubadora provida de sulcador tipo discos duplos excêntricos, de fluxo contínuo, para distribuição das sementes e adubo, com espaçamento de 0,17 m entre fileiras e densidade de 350.000 plantas por hectare. Efetuou-se a adubação de manutenção com 150 kg ha^{-1} da fórmula 5-20-20 e aplicação única de 50 kg ha^{-1} de N (na forma de uréia) como adubação de cobertura.

A colheita do milho foi feita manualmente e o corte da parte aérea do milho e da aveia foi efetuado com roçadora costal, sendo as plantas cortadas rentes à superfície do solo, retiradas das parcelas e picadas em trilhadora estacionária, em frações de tamanho entre 15 e 20 cm de comprimento. Os resíduos culturais do tratamento preparo convencional com resíduos culturais incorporados retornavam às parcelas para sua incorporação ao solo antes dos testes com chuva simulada, enquanto os dos tratamentos semeadura direta e sem cultivo/sem preparo, resíduos culturais adicionadas retornavam somente após a realização dos testes de chuva simulada, para o cumprimento das finalidades dos mesmos.

3.4. Unidades experimentais e aparelho simulador de chuva

As unidades experimentais foram constituídas por pares de parcelas de erosão, com dimensões de 3,5 m de largura por 11,0 m de comprimento (área útil de 38,5 m²), segundo recomendações constantes em IAPAR (1975), espaçadas entre si de 3,5 m, apropriadas para estudos de erosão com o aparelho simulador de chuva de braços rotativos, conforme descrito em Swanson (1965), o qual distribui gotas de chuva sobre duas parcelas, simultaneamente. As parcelas foram delimitadas nas suas laterais e porção superior por chapas galvanizadas com 2,0 m de comprimento e 0,2 m de altura, sendo cravadas no solo cerca de 0,1 m. Na parte inferior de cada parcela foi instalado um sistema de calha coletora do material erodido, sendo acoplada à mesma uma conexão tubular com declividade suficiente para permitir o livre escoamento da enxurrada até uma trincheira localizada poucos metros abaixo, onde eram realizadas as coletas de amostras da enxurrada proveniente das chuvas simuladas, intermitentemente, a cada três minutos.

3.5. Testes de erosão com chuva simulada

Cada teste de erosão consistiu da realização de uma única chuva simulada, com intensidade constante planejada de 64,0 mm h⁻¹ e duração de 90 minutos, sendo aplicada logo após as operações de colheita da cultura em questão e do preparo de solo para a cultura subsequente. As intensidades de chuva observadas em cada teste de erosão podem ser vistas no apêndice 2, enquanto as durações são vistas no apêndice 3. Foram realizados dez testes de erosão com chuva simulada, de julho de 1996 a maio de 2001, com algumas omissões.

Na tabela 1, estão expressas a denominação de cada teste, a data em que o mesmo foi realizado, a cultura do cultivo anterior e os tratamentos nos quais o teste foi realizado. Nos testes 5, 7 e 8, devido a outras atividades de pesquisa e falta de pessoal, não foi possível avaliar todos os tratamentos. No ano de 1999, pelos mesmos motivos, não foi efetuado o teste de chuva simulada após a colheita da cultura do milho, tendo sido feito apenas um teste neste ano.

TABELA 1. Testes de erosão, datas de aplicação das chuvas simuladas, tipos de cultivo anterior e tratamentos em que os testes foram realizados.

Teste	Data	Cultivo anterior	Tratamento					Padrão ⁶
			Mi/Av-PC-res. inc. ¹	Mi/Av-PC-res. rem. ²	Mi/Av –SD ³	S/c, s/p res. adic. ⁴	S/c, s/p ⁵	
1	18/07/96	milho	x	x	x	NE	x	x
2	21/11/96	aveia	x	x	x	NE	x	x
3	30/05/97	milho	x	x	x	NE	x	x
4	07/11/97	aveia	x	x	x	NE	x	x
5	23/05/98	milho	NR	NR	NR	NE	x	NR
6	26/11/98	aveia	x	x	x	x	x	x
7	10/11/99	aveia	NR	NR	x	x	x	x
8	25/05/00	milho	NR	NR	x	x	x	NR
9	28/11/00	aveia	x	x	x	x	x	x
10	10/05/01	milho	x	x	x	x	x	x

x – realizado o teste de chuva. NR – não realizado o teste de chuva.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos e retornados.

⁴ Sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados, removidos e retornados.

⁵ Sem cultivo, sem preparo, continuamente descoberto.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional, continuamente descoberto.

3.6. Amostragens e determinações

3.6.1. No campo, antes da aplicação das chuvas

3.6.1.1. Coleta de amostras para determinação da densidade do solo

Antes da aplicação das chuvas simuladas, foram coletadas duas amostras de solo em cada parcela, nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, utilizando-se a metodologia do anel volumétrico, conforme consta em Forsythe (1975), sendo acondicionadas em latas de alumínio, vedadas e levadas para laboratório para secagem e determinação.

3.6.1.2. Coleta de amostras para determinação do índice DMP (diâmetro médio ponderado) dos agregados de solo a úmido

Foi feita antes da aplicação das chuvas simuladas, com a retirada de duas amostras de solo em cada parcela, nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, as quais foram passadas em peneira com malha de 7,96 mm de diâmetro, na umidade de campo, sendo após acondicionadas em baldes plásticos e levadas ao laboratório para secagem e determinação.

3.6.1.3. Coleta de amostras para determinação da umidade gravimétrica atual do solo

Foi efetuada imediatamente antes da aplicação das chuvas simuladas, retirando-se duas amostras por parcela, nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, sendo colocadas em latas de alumínio, vedadas, identificadas e levadas para laboratório para secagem e determinação.

3.6.1.4. Coleta de amostras para determinação da massa de resíduos culturais superficiais

Foram coletadas duas amostras de resíduos culturais em cada parcela, antes da aplicação das chuvas simuladas, numa área de 0,24 m², compreendida em um quadro de madeira com dimensões de 0,60 m de comprimento por 0,40 m de largura, arremessado ao acaso sobre a superfície do solo dentro da parcela experimental. O material coletado, com o auxílio de tesoura, era ensacado, identificado e levado ao laboratório para secagem e pesagem, sendo posteriormente retornado ao mesmo local de onde foi retirado.

3.6.1.5. Coleta de amostras para determinação da massa de raízes e resíduos culturais incorporados ao solo

Para determinação da massa de raízes e massa de resíduos culturais incorporados mais raízes, foram coletadas duas amostras em cada parcela, antes da aplicação das chuvas simuladas, nas profundidades de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm. Cada amostra foi composta de seis subamostras, sendo três retiradas próximo às fileiras da cultura e três na posição intermediária das fileiras. As amostras foram retiradas com trado de ferro de formato cilíndrico, com diâmetro de 1,5 polegadas (3,81 cm), sendo acondicionadas em baldes plásticos. Após a coleta, as mesmas foram levadas para laboratório para secagem e determinação.

3.6.2. No campo, durante a aplicação das chuvas

3.6.2.1. Tempos de início e término da enxurrada

O tempo de início da enxurrada foi registrado com cronômetro, no exato momento em que a enxurrada chegava à extremidade inferior do cano acoplado à

calha coletora da mesma, proveniente da parcela experimental. O término da enxurrada também foi registrado com cronômetro, no exato momento em que, após a paralisação da chuva, cessara o fluxo da enxurrada na extremidade inferior do cano acoplado à calha coletora da mesma. Tais tempos foram expressos em minutos.

3.6.2.2. Medição da taxa instantânea de enxurrada e amostragem para determinação da concentração instantânea de sedimentos na mesma.

Para a medição da taxa instantânea de enxurrada, foram coletadas amostras do escoamento superficial a cada três minutos, a partir do início da mesma, durante tempos de coleta de três a dez segundos, conforme a intensidade do escoamento, utilizando-se provetas graduadas de 500, 1000 ou 2000 mL. No mesmo momento, eram também coletadas amostras de enxurrada, em frascos plásticos de 1 L, para posterior determinação, em laboratório, da concentração instantânea de sedimentos na mesma. A taxa instantânea de enxurrada foi expressa em mm h^{-1} .

3.6.2.3. Velocidade do escoamento superficial da enxurrada

A velocidade do escoamento superficial da enxurrada foi medida aos 30, 60 e 90 minutos de decorrência das chuvas simuladas, cronometrando-se o tempo gasto para seu deslocamento sobre um segmento de seis metros de comprimento, demarcado dentro das unidades experimentais. Para tal, era adicionado um corante (azul de metileno a 2%) ao escoamento superficial, jogando-o na extremidade superior do segmento e anotando-se o tempo gasto pelo mesmo para atingir a extremidade inferior do segmento. A velocidade do escoamento superficial foi expressa em m s^{-1} .

3.6.2.4. Amostragem de enxurrada para avaliação da distribuição de tamanho dos sedimentos transportados na mesma, nas classes de 2,000 a 0,037 mm

No mesmo momento em que era feita a medição da velocidade da

enxurrada, eram também recolhidas amostras da mesma, na saída do cano que a conduzia, para determinação da distribuição de tamanho dos sedimentos transportados, acoplando-se um conjunto de peneiras com malhas de 2,000; 1,000; 0,500; e 0,250 mm de diâmetro sobre um balde plástico com capacidade de um litro, posicionando-o sob o fluxo da enxurrada e coletando-se material até atingir mais da metade do volume do balde. Os sedimentos que ficavam retidos em cada peneira eram transferidos com jatos de água produzidos por uma bisnaga plástica para potes plásticos com capacidade de 0,5 Kg. O material que, no momento da coleta, passava pela peneira de 0,250 mm e depositava-se no balde, era levado ao laboratório para posterior fracionamento, até a classe de tamanho menor do que 0,037 mm.

3.6.3. No campo, após a aplicação das chuvas

3.6.3.1. Checagem da intensidade das chuvas aplicadas

Para checagem da intensidade das chuvas simuladas aplicadas, foram distribuídos vinte pluviômetros sob a área de projeção do simulador de chuva, nas laterais e entre parcelas.

3.6.4. Em laboratório

3.6.4.1. Densidade do solo

No laboratório, as amostras coletadas no campo foram colocadas em estufa à 105°C por 24 a 48 horas, ou até atingirem massa constante. Após pesadas, dividiu-se o valor da massa de solo seco pelo volume do anel utilizado na amostragem, segundo metodologia descrita em Forsythe (1975), sendo o resultado expresso em kg dm^{-3} .

3.6.4.2. Índice DMP dos agregados de solo a úmido

As amostras de solo trazidas do campo foram secas ao ar e novamente passadas em peneira de 7,960 mm para homogeneização. Foram tomadas 50 g de cada amostra e colocadas sobre um conjunto de peneiras com malhas de diâmetros iguais a 4,760; 2,000; 1,000; 0,500; e 0,250 mm, submergindo-as por três segundos em água. Após, colocou-se o conjunto de peneiras com as

amostras de solo no aparelho de oscilação, de modo que o nível de água ficasse 1 cm acima do fundo da peneira superior, deixando-as imersas por dez minutos, após o que o aparelho era acionado por mais dez minutos. O material que ficou retido nas peneiras foi transferido para latas de alumínio e levados à estufa à 105°C por 24 horas. A distribuição percentual dos agregados nas diferentes classes de tamanho foi obtida pela razão entre a quantidade de material retido em cada peneira e a quantidade total de solo na amostra, expressando-a em termos de diâmetro médio ponderado (DMP), conforme descrito por (Kemper & Chepil, 1965), em unidades de mm.

3.6.4.3. Umidade do solo antecedente às chuvas aplicadas

Uma vez no laboratório, as amostras trazidas do campo para determinação da umidade do solo antecedente às chuvas foram pesadas e colocadas em estufa à 105°C, por 24 a 48 horas, ou até atingirem massa constante. A umidade gravimétrica foi obtida pela razão entre a massa de água contida no solo da amostra e a massa de solo seco da amostra, sendo expressa em kg kg^{-1} (Forsythe, 1975).

3.6.4.4. Massa de resíduos culturais superficiais

No laboratório, as amostras foram secas em estufa à 60°C, por 24 horas, ou até atingirem massa constante, sendo obtida a massa de resíduos culturais em termos de massa de matéria seca por unidade de área. O valor da massa de matéria seca obtido para a área de 0,24 m² foi extrapolado para kg ha^{-1} .

3.6.4.5. Massa de raízes e resíduos culturais incorporados ao solo

Após a coleta das amostras no campo, as mesmas eram levadas para o laboratório e secas ao ar. A seguir, as amostras eram imersas em balde com água, sendo manualmente destorroadas e, com o auxílio de duas peneiras com malhas de 0,5 e 1,0 mm, retirou-se o sobrenadante contendo as raízes e/ou resíduos culturais incorporados. O material retido nas peneiras era lavado em água corrente, seco em estufa à 60°C e pesado. A massa de raízes

correspondente ao volume total de solo amostrado para cada profundidade foi convertida para massa de raízes por unidade de área, sendo expressa em kg ha^{-1} .

3.6.4.6. Cálculo da intensidade observada das chuvas aplicadas

O cálculo da intensidade observada das chuvas aplicadas foi efetuado por meio da razão entre o volume médio coletado e a área de captação dos pluviômetros, para a duração da chuva aplicada. A intensidade das chuvas simuladas foi expressa em mm h^{-1} .

3.6.4.7. Quantidade total de enxurrada ou perda total de água

Foi obtida integrando-se as taxas instantâneas de enxurrada no tempo, sendo expressa em % da chuva aplicada.

3.6.4.8. Concentração instantânea de sedimentos na enxurrada

Os frascos plásticos contendo as amostras de enxurrada coletadas no campo, a cada três minutos, durante a realização dos testes de chuva simulada, foram trazidos ao laboratório e imediatamente pesados. Após, adicionou-se em cada amostra 3 mL de uma solução saturada de alúmen de potássio, a 5%, deixando-as em repouso por 24 a 48 horas, até que o sedimento em suspensão decantasse e pudesse ser sifonado o sobrenadante. Uma vez retirado o sobrenadante, os frascos com os sedimentos eram levados à estufa com circulação de ar forçado, à temperatura de 60°C , permanecendo nela por cerca de 48 horas, ou até que atingissem massa constante. A concentração instantânea de sedimentos na enxurrada foi obtida pela razão entre a massa de solo seco em estufa e a massa total de enxurrada na amostra, para posterior utilização nos cálculos de perda de solo.

3.6.4.9. Taxa instantânea e perda total de solo

A taxa instantânea de perda de solo foi obtida multiplicando-se a concentração instantânea de sedimentos na enxurrada pela taxa instantânea de enxurrada no momento da coleta e dividindo-se o resultado pela área da parcela. A perda total de solo foi obtida integrando-se os valores da taxa de perda do solo

em relação ao tempo. A taxa instantânea de perda de solo foi expressa em $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. A perda total de solo foi expressa em Mg ha^{-1} .

3.6.4.10. Distribuição de tamanho dos sedimentos transportados na enxurrada, nas classes de 2,000 a 0,037 mm

Os sedimentos que passaram pela peneira de 0,250 mm no momento da amostragem da enxurrada no campo, ao chegarem no laboratório foram agitados com bastão de vidro para que ficassem em suspensão e, então, novamente fracionados, utilizando-se para isto um conjunto de peneiras com malhas de 0,105; 0,053 e 0,037 mm de diâmetro, acoplado a um balde plástico com capacidade de 0,5 kg. Os sedimentos retidos nas peneiras foram transferidos com jatos de água produzidos por uma bisnaga plástica para potes plásticos. O material que passou pela peneira com malha de 0,037 mm ficou armazenado em um outro pote plástico para decantação, assim como os demais. Para facilitar a sedimentação, foi adicionada uma solução saturada de alúmen de potássio, a 5%, nas quantidades de 1 mL para os potes e de 5 mL para os baldes plásticos, deixando-os em repouso por, pelo menos, 24 horas. Posteriormente, o sobrenadante foi sifonado e o material sólido levado à estufa a 60°C, permanecendo nela por 24 a 48 horas, ou até atingir massa constante. A caracterização final da distribuição de tamanho dos sedimentos transportados na enxurrada constou das seguintes classes: >2,000; 2,000 a 1,000; 1,000 a 0,500; 0,500 a 0,250; 0,250 a 0,105; 0,105 a 0,053; 0,053 a 0,037 e <0,037 mm de diâmetro. Ao dividir-se a massa seca dos sedimentos em cada classe de tamanho pelo somatório das massas secas de todas as classes e multiplicando-se o resultado por 100, foi obtida a proporção de sedimentos em cada classe, expressa em porcentagem (%).

3.6.4.11. Índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada

O índice D_{50} expressa o tamanho das partículas de solo em que 50% da massa das mesmas é superior e 50% é inferior ao referido tamanho. Este índice foi determinado aos 30, 60 e 90 minutos de decorrência das chuvas simuladas, por meio de interpolação linear entre os valores da distribuição acumulada para as

porcentagens imediatamente inferior e superior a 50%, usando-se a expressão:

$$D_{50} = \frac{(50 - y_1) \cdot x_2 + (y_2 - 50) \cdot x_1}{(y_2 - y_1)}$$

onde y_1 é o valor da massa de partículas de solo imediatamente superior a 50%, x_1 é o valor da classe de tamanho de sedimentos correspondente a y_1 e x_2 é o maior valor da classe de tamanho de sedimentos correspondente a y_2 . O índice D_{50} foi calculado com base nos resultados da distribuição dos sedimentos transportados na enxurrada nas classes $> 2,000$ a $< 0,037$ mm (item 3.6.4.10).

3.6.4.12. Ajustamento de resultados

Em função da variação ocorrida nas intensidades das chuvas simuladas aplicadas, os valores de enxurrada total e infiltração total de água no solo foram ajustados para a intensidade de chuva planejada ($64,0 \text{ mm h}^{-1}$). Da mesma forma, este ajuste foi feito também para a perda total de solo e a taxa média de perda de solo sob enxurrada constante. Além do ajuste para a intensidade de chuva planejada, os dados de perda de solo foram também ajustados para a declividade média das unidades experimentais, para nivelar o efeito da variação na declividade existente entre as mesmas (apêndice 1). Estes ajustes foram efetuados conforme consta em Cogo (1981) e descritos a seguir.

A enxurrada total ou perda total de água ajustada foi obtida subtraindo-se a quantidade total de infiltração observada (chuva total aplicada – enxurrada total observada) da quantidade total de chuva planejada (intensidade planejada x duração observada).

A perda total de solo e a taxa média de perda de solo sob enxurrada constante foram ajustadas para a intensidade de chuva planejada, multiplicando-se os valores observados de perda de solo pelo quadrado do valor da razão intensidade de chuva planejada/intensidade de chuva observada. Depois de ajustadas as perdas de solo para a intensidade de chuva planejada, as mesmas foram também ajustadas para a declividade média de solo de $0,08 \text{ m m}^{-1}$, devido à variação observada na declividade entre as parcelas experimentais (apêndice 1). Este novo ajuste foi efetuado multiplicando-se os valores de perda de solo

ajustados para a intensidade de chuva planejada pelo resultado da divisão do valor “S” de um declive médio de 0,08 m m⁻¹ pelo valor de “S” do declive de cada unidade experimental, por meio da fórmula:

$$S = 0,065 + 4,65 \text{ sen } \theta + 65,41 (\text{sen } \theta)^2,$$

onde θ é o ângulo do declive (Wischmeier & Smith, 1978).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Condições físicas de superfície e subsuperfície do solo induzidas pelas formas de manejo estudadas

4.1.1. Cobertura, rugosidade, crosta e consolidação da superfície do solo

A condição física de superfície do solo nos tratamentos estudados foi avaliada qualitativamente, antes de cada teste de erosão com chuva simulada. Os resultados desta avaliação estão apresentados na tabela 2.

TABELA 2. Descrição qualitativa da cobertura, rugosidade, crosta e consolidação da superfície do solo nos tratamentos estudados, antes de cada teste de erosão com chuva simulada.

Condição física de superfície do solo	Tratamentos					
	Mi/Av-PC res. inc. ¹	Mi/Av-PC res. rem. ²	Mi/Av-SD ³	S/c s/p res. adic. ⁴	S/c s/p. ⁵	Padrão ⁶
Cobertura superficial	Resquícios	Ausente	Resquícios	Ausente	Ausente	Ausente
Rugosidade superficial	Baixa	Baixa	Muito baixa	Muito baixa	Muito baixa	Baixa
Crosta superficial	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Presente	Ausente
Consolidação superficial	Ausente	Ausente	Presente	Presente	Presente	Ausente

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos e retornados.

⁴ Sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados, removidos e retornados.

⁵ Sem cultivo, sem preparo, continuamente descoberto.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional, continuamente descoberto.

A cobertura superficial do solo por resíduos culturais é fundamental na redução das perdas de solo por erosão hídrica. Ela dissipa a energia cinética das gotas de chuva e serve como barreira física ao livre escoamento da enxurrada, reduzindo, assim, a desagregação de partículas de solo e a capacidade de

transporte da enxurrada. Isto se refletirá em menor escoamento superficial e menor concentração de sedimentos no mesmo, reduzindo grandemente as perdas de solo (Ellison, 1947; Cogo, 1981).

Devido ao objetivo do trabalho, os tratamentos estudados foram operacionalizados de tal modo que não apresentassem cobertura do solo por resíduos culturais. Assim sendo, mesmo com resquícios de resíduos culturais em dois tratamentos, a cobertura do solo por resíduos culturais não foi fator influente nas perdas de solo e água por erosão hídrica, neste estudo (tabela 2).

A rugosidade superficial do solo, orientada ou ao acaso, é produzida pela elevação de sua superfície durante as operações de preparo de solo e/ou plantio/semeadura. Operações de preparo primário do solo que promovem grande mobilização do mesmo, como a aração e a escarificação, resultam em elevada rugosidade superficial. Já operações que promovem pouca ou quase nenhuma mobilização de solo, como a semeadura direta ou sem preparo de solo, resultam em mínima rugosidade superficial. Por fim, operações de preparo secundárias, como a gradagem, tendem a diminuir a elevada rugosidade superficial do solo originada pela aração ou escarificação, deixando o mesmo com uma rugosidade superficial intermediária.

A rugosidade superficial do solo, qualitativamente observada (tabela 2), foi considerada intermediária (baixa) nos tratamentos com preparo convencional e muito baixa nos tratamentos onde o solo praticamente não foi mobilizado (semeadura direta) ou não foi mais mobilizado (em processo de reconsolidação). Estas observações qualitativas da rugosidade superficial do solo coincidem com os resultados observados por Bertol et al. (1997), em tratamentos de preparo de solo similares.

A formação de crosta superficial, normalmente, ocorre em solo preparado e desprovido de cobertura, uma vez que, sob esta condição, o mesmo fica diretamente exposto à ação de impacto das gotas da chuva e, assim, ao selamento e adensamento de sua superfície. Dentre os tratamentos estudados, apenas o solo sob processo de reconsolidação, sem cultivo, sem preparo e continuamente descoberto apresentou crosta superficial (tabela 2).

A reconsolidação da camada superficial do solo se fez presente no

tratamento com semeadura direta, devido à mínima mobilização do mesmo no tempo, e nos tratamentos onde o solo não foi mais mobilizado e se encontrava em processo de reconsolidação. Em função da mobilização do solo, os tratamentos com preparo convencional não apresentaram reconsolidação de sua camada superficial no momento dos testes com chuva simulada.

4.1.2. Densidade do solo

Alterações na densidade do solo refletem alterações em propriedades físico-hídricas importantes, como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração de raízes. Estas propriedades do solo, por sua vez, afetam diretamente o desenvolvimento e a produção das culturas agrícolas (Konkhe, 1968).

Os relativamente escassos valores de densidade do solo, obtidos antes de cada teste de erosão com chuva simulada, estão apresentados na tabela 3.

Os valores médios de densidade do solo se apresentaram, de modo geral, muito semelhantes entre os tratamentos estudados (tabela 3), indicando que esta propriedade do solo teve pouca influência nas diferenças entre os valores de perdas de solo e água por erosão hídrica observadas neste estudo. Vários autores (Machado & Brum, 1978; Vieira & Muzilli, 1984; Corrêa, 1985) encontraram diferenças marcantes de densidade do solo para o cultivo convencional em comparação à semeadura direta. Porém, estes tratamentos em semeadura direta possuíam maior tráfego de máquinas e equipamentos do que neste estudo, justificando a maior densidade de solo encontrada por aqueles autores para o cultivo em semeadura direta.

Ao comparar os valores médios de densidade do solo entre as duas profundidades estudadas, observa-se que a camada de 10 a 20 cm apresentou valores sempre superiores aos da camada de 0 a 10 cm, indicando um certo adensamento da camada subsuperficial (tabela 3).

Os valores de densidade do solo, no tempo (entre testes de erosão), apresentaram pouca variação (tabela 3), indicando que a ausência ou presença de culturas não alterou muito a densidade de solo, neste estudo. Resultados

TABELA 3. Densidade do solo, em duas profundidades, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

Teste	Cultivo anterior	Tratamento									
		Mi/Av-PC-res. inc. ¹		Mi/Av-PC-res. rem. ²		Mi/Av-SD ³		Rec. s/c s/p res. adic. ⁴		Rec. s/c s/p. ⁵	
		0-10cm	10-20cm	0-10cm	10-20cm	0-10cm	10-20cm	0-10cm	10-20cm	0-10cm	10-20cm
----- kg dm ⁻³ -----		----- kg dm ⁻³ -----		----- kg dm ⁻³ -----		----- kg dm ⁻³ -----		----- kg dm ⁻³ -----			
1	milho	*	*	*	*	1,61	*	NE	NE	1,49	*
2	aveia	*	*	*	*	1,72	*	NE	NE	1,61	*
3	milho	*	*	*	*	*	*	NE	NE	1,44	*
4	aveia	*	*	*	*	1,66	*	NE	NE	1,53	*
5	milho	*	*	*	*	*	*	NE	NE	1,53	1,66
6	aveia	*	*	*	*	1,67	1,75	1,66	1,55	1,55	1,57
7	aveia	*	*	*	*	1,61	*	1,51	1,56	1,53	1,66
8	milho	1,61	*	*	*	1,66	*	1,47	*	1,55	*
9	aveia	1,45	1,62	1,52	1,66	1,61	1,71	1,58	1,69	1,48	1,69
10	milho	1,53	1,64	1,56	1,74	1,75	1,98	1,79	1,92	1,66	1,83
Média		1,53	1,63	1,54	1,70	1,66	1,81	1,60	1,68	1,54	1,68

* não determinada.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta.

⁴ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados.

⁵ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo.

semelhantes foram encontrados por Machado et al. (1981), onde o aumento da densidade do solo sob cultivo somente se fez presente após o oitavo ano. Os valores elevados de densidade do solo presentes no último teste de erosão (teste 10), nos tratamentos cultivo em semeadura direta, sem cultivo, sem preparo com adição de resíduos culturais e padrão, na profundidade de 10 a 20 cm, são devidos, provavelmente, à erro de amostragem.

4.1.3. Massa de resíduos culturais incorporados e de raízes no solo

Os resíduos culturais incorporados ao solo e as raízes podem reduzir a erosão hídrica de duas maneiras: por processos físicos, ligando as partículas de solo entre si e agindo como barreira mecânica ao movimento de água e solo, e por processos bioquímicos, exsudando substâncias orgânicas que servem como agentes cimentantes dos agregados de solo (Renard et al., 1997).

Os valores de massa seca de resíduos culturais incorporados mais raízes e de massa de raízes no solo, nos tratamentos estudados, antes de cada teste de erosão com chuva simulada, estão apresentados na tabela 4. No teste 5, por falta de pessoal e outros problemas, não foi possível fazer-se as determinações de massa de resíduos culturais incorporados mais raízes e de massa de raízes no solo.

Os valores de massa seca de resíduos culturais incorporados mais raízes e de massa seca de raízes no solo após o cultivo de milho (testes 1, 3, 8 e 10) e aveia preta (testes 2, 4, 6, 7 e 9), principalmente após o cultivo de milho, apresentaram grande variação entre os testes de erosão realizados (tabela 4). Esta variação se deveu à operacionalização dos tratamentos, os quais não eram conduzidos com o objetivo das culturas alcançarem seu máximo potencial produtivo, ficando assim, sujeitos à adversidades como deficiência hídrica e ataque de pragas e moléstias. Devido a isto, os valores de massa seca de resíduos culturais incorporados mais raízes e de massa seca de raízes de milho e aveia preta no solo foram inferiores aos apresentados por Bertol et al. (1997) e Bertol (1994). A mesma explicação é válida para a variação entre os valores de massa seca de raízes de milho e aveia, entre os testes de erosão realizados.

TABELA 4. Massa seca de resíduos culturais incorporados mais raízes (Mr + Mz) e massa seca de raízes (Mz), em duas profundidades de solo, nos tratamentos com cultivo, antes dos testes de erosão com chuva simulada realizados.

Teste	Cultivo anterior	Tratamento					
		Mi/Av-PC-res. inc. ¹ (Mr + Mz)		Mi/Av-PC-res. rem. ² (Mz)		Mi/Av-SD. ³ (Mz)	
		0 – 10cm	10 – 20cm	0 – 10cm	10 – 20cm	0 – 10cm	10 – 20cm
----- kg ha ⁻¹ -----							
1	Milho	4722	2236	3114	1243	3231	1608
2	Aveia	4371	1184	2369	761	2675	585
3	Milho	9297	2185	3019	2127	3611	1535
4	Aveia	4845	4122	1038	717	1155	892
5	Milho	*	*	*	*	*	*
6	Aveia	4978	892	4225	1148	4246	895
7	Aveia	6825	2394	4605	1869	5825	1492
8	Milho	13874	2953	3948	2286	3869	1028
9	Aveia	5687	4408	3077	1805	2870	892
10	Milho	4233	3494	3596	1345	6162	1724

* Não determinada;

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos e retornados.

Os valores de massa seca de resíduos culturais incorporados mais raízes e de massa de raízes no solo apresentaram grande variação entre as profundidades de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm, como já era esperado, com maior concentração de massa de resíduos culturais mais raízes e massa de raízes na camada de solo de 0 a 10 cm.

A cultura do milho mostrou tendência em produzir maior massa seca das partes aérea e raízes, em relação à cultura da aveia preta, nas duas profundidades e nos três tratamentos com cultivo. Comparando o tratamento preparo convencional e resíduos culturais removidos com o tratamento semeadura direta, os valores de massa seca de raízes em cada teste de erosão e nas duas profundidades se mostraram semelhantes (tabela 4).

No tratamento com preparo convencional e incorporação dos resíduos culturais, a incorporação promoveu maior aporte de material orgânico ao solo nas duas profundidades, se comparado aos tratamentos preparo convencional com remoção dos resíduos culturais e semeadura direta (tabela 4).

4.1.4. Índice DMP dos agregados de solo a úmido

O índice DMP (diâmetro médio ponderado) dos agregados de solo expressa, de certa forma, a resistência do solo à desagregação, podendo, assim, indicar o grau de suscetibilidade do mesmo à erosão hídrica (Forsythe, 1975). Os valores do índice DMP obtidos pelo peneiramento a úmido dos agregados de solo nos tratamentos estudados, antes de cada teste de erosão com chuva simulada, estão apresentados na tabela 5.

Os valores médios do índice DMP dos agregados de solo apresentaram elevada variação entre os tratamentos estudados e testes de erosão realizados (tabela 5). O tratamento preparo convencional com incorporação dos resíduos culturais foi o que apresentou os maiores valores médios do índice DMP, nas duas profundidades (tabela 5). Os tratamentos preparo convencional com remoção dos resíduos culturais e semeadura direta apresentaram valores intermediários do índice DMP, enquanto os dois tratamentos sem cultivo, sem preparo, com e sem resíduos na superfície apresentaram os menores valores, nas duas profundidades (tabela 5). Estas diferenças ressaltam a importância do cultivo e do aporte de material vegetal ao solo, seja pela incorporação dos resíduos culturais, seja pela ação das raízes das culturas, na formação e estabilização dos agregados de solo, conforme Tisdall & Oades (1982) e Allison (1968).

O índice DMP dos agregados de solo apresentou variação muito pequena entre as duas profundidades estudadas, nos tratamentos estudados (tabela 5).

Os três tratamentos com cultivo apresentaram valores do índice DMP dos agregados de solo crescentes ao longo do tempo (tabela 5). Esta tendência indica melhoria da estrutura do solo durante o tempo de condução do estudo (cinco anos), devido ao contínuo aporte de material vegetal ao solo, seja pela incorporação de resíduos culturais mais raízes, seja apenas pela ação das raízes das culturas, o qual promove a agregação das partículas de solo em unidades de maior diâmetro, bem como melhora a estabilidade das mesmas. Por outro lado, nos dois tratamentos sem cultivo, sem preparo, com e sem resíduos superficiais, os valores do índice DMP se mantiveram baixos ao longo do tempo (tabela 5),

TABELA 5. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados de solo, em duas profundidades, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

Teste	Cultivo anterior	Tratamento									
		Mi/Av-PC-res. inc. ¹		Mi/Av-PC-res. rem. ²		Mi/Av-SD ³		Rec. s/c s/p res. adic. ⁴		Rec. s/c s/p ⁵	
		0-10cm	10-20cm	0-10cm	10-20cm	0-10cm	10-20cm	0-10cm	10-20cm	0-10cm	10-20cm
mm		mm		mm		mm		mm			
1	milho	1,15	*	0,94	*	1,06	*	NE	NE	0,71	*
2	aveia	1,43	1,64	0,92	1,04	1,54	1,75	NE	NE	0,72	0,94
3	milho	*	*	*	*	0,91	1,08	NE	NE	0,49	0,54
4	aveia	*	*	*	*	1,24	1,16	NE	NE	0,64	*
5	milho	*	*	*	*	*	*	NE	NE	0,78	0,71
6	aveia	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
7	aveia	1,94	*	1,82	*	1,78	*	0,69	*	0,95	*
8	milho	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
9	aveia	2,77	2,50	1,73	1,70	2,51	1,67	0,84	0,86	1,31	0,88
10	milho	2,45	2,50	2,35	2,00	3,10	2,45	1,00	0,90	1,30	0,80
Média		1,95	2,21	1,55	1,58	1,73	1,62	0,84	0,88	0,86	0,77

* não determinada.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta.

⁴ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados.

⁵ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo.

provavelmente devido à ausência de cultivo e à diminuição da atividade microbiana, fatores importantes na formação e manutenção da estabilidade dos agregados de solo.

Dentre os tratamentos com preparo convencional, o com incorporação dos resíduos culturais apresentou valores médios de DMP maiores do que o com resíduos culturais removidos (tabela 5). Isto porque o tratamento com resíduos culturais removidos, mesmo com o efeito agregador das raízes, teve sempre menor aporte de material vegetal ao solo, o que não possibilitou a mesma melhoria na estrutura do mesmo. Dentre os tratamentos com o solo em processo de reconsolidação, os tratamentos sem cultivo, sem preparo, com e sem adição de resíduos culturais apresentaram valores de DMP inferiores ao tratamento com semeadura direta (tabela 5). Este tratamento, também se encontrava em processo de reconsolidação, porém com cultivo. Assim, devido à presença das raízes das culturas e dos resíduos culturais na superfície do solo, as partículas de solo foram reagregadas em partículas maiores, melhorando a estrutura do mesmo. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva & Mielniczuk (1997).

4.1.5. Umidade do solo antecedente às chuvas aplicadas

Na tabela 6 estão apresentados os valores de umidade do solo antecedente às chuvas simuladas aplicadas. Verifica-se que a umidade do solo antecedente aos testes de erosão com chuva simulada variou muito pouco entre os tratamentos estudados e entre os vários testes de erosão com chuva simulada realizados. Devido a esta pequena variação, a umidade do solo antecedente às chuvas aplicadas não foi fator de grande influência nas diferenças encontradas nas perdas de solo e água entre os tratamentos e testes, neste estudo.

4.2. Perdas de água e solo por erosão hídrica

4.2.1. Perda de água

4.2.1.1. Tempos de início e equilíbrio da enxurrada

Os valores dos tempos de início e equilíbrio da enxurrada, em cada tratamento estudado e nos testes de erosão com chuva simulada realizados, estão

apresentados na figura 1.

Os tempos de início e equilíbrio da enxurrada apresentaram considerável variação entre os tratamentos estudados. Os tratamentos preparo convencional com incorporação e remoção dos resíduos culturais e o padrão apresentaram valores de tempos de início e equilíbrio da enxurrada relativamente elevados. Já o tratamento semeadura direta apresentou valores de tempos de início e equilíbrio da enxurrada menores, mas maiores do que nos tratamentos sem cultivo e sem preparo, com e sem adição de resíduos culturais, os quais apresentaram valores de tempos de início e equilíbrio da enxurrada muito baixos (figura 1). Estas diferenças se devem às condições de superfície do solo em cada tratamento, como pode ser visto na tabela 2. Os tratamentos preparo convencional com incorporação e remoção dos resíduos culturais e o tratamento padrão apresentaram rugosidade superficial do solo maior do que os tratamentos com semeadura direta e os tratamentos sem cultivo, sem preparo, com e sem adição de resíduos culturais. Assim, os três tratamentos com preparo convencional possuíam melhores condições para retenção e infiltração de água no solo, retardando o tempo de início do escoamento da enxurrada bem, como o tempo necessário para que esta atingisse o equilíbrio.

Nos tratamentos com solo sem preparo, com e sem cultivo, em processo de reconsolidação, os valores do tempo de início da enxurrada foram relativamente baixos e muito semelhantes entre si e entre testes, porém os valores do tempo de equilíbrio da enxurrada no tratamento com cultivo em semeadura direta foram muito superiores aos valores correspondentes aos tratamentos sem cultivo (figura 1). Isto se deve à presença das raízes das culturas no tratamento com cultivo em semeadura direta, as quais propiciaram maior estabilidade dos agregados do solo (tabela 5) e, provavelmente, melhor qualidade do espaço poroso, o que propiciou melhores condições para infiltração da água da chuva no solo, retardando o início da enxurrada neste tratamento, em relação aos tratamentos sem cultivo e sem preparo.

TABELA 6. Umidade do solo antecedente às chuvas simuladas, em duas profundidades, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

Teste	Tratamento											
	Mi/Av-PC-res. inc. ¹		Mi/Av-PC-res. rem. ²		Mi/Av-SD ³		Rec. s/c s/p res. adic. ⁴		Rec. s/c s/p. ⁵		Padrão ⁶	
	0 – 10cm	10 – 20cm	0 – 10cm	10 – 20cm	0 – 10cm	10 – 20cm	0 – 10cm	10 – 20cm	0 – 10cm	10 – 20cm	0 – 10cm	10 – 20cm
	----- kg kg ⁻¹ -----		----- kg kg ⁻¹ -----		----- kg kg ⁻¹ -----		----- kg kg ⁻¹ -----		----- kg kg ⁻¹ -----		----- kg kg ⁻¹ -----	
1	0,095	0,138	0,090	0,131	0,105	0,126	NE	NE	0,090	0,132	0,100	0,137
2	0,052	0,131	0,070	0,127	0,082	0,127	NE	NE	0,099	0,147	0,079	0,147
3	0,112	0,142	0,112	0,132	0,122	0,133	NE	NE	0,130	0,152	0,095	0,132
4	0,113	0,137	0,115	0,145	0,145	0,153	NE	NE	0,140	0,160	0,105	0,148
5	*	*	*	*	*	*	NE	NE	0,116	0,147	*	*
6	0,100	0,133	0,087	0,119	0,123	0,116	**	**	**	**	**	**
7	*	*	*	*	0,113	0,129	0,083	0,135	0,057	0,127	0,126	0,134
8	*	*	*	*	0,126	0,138	0,096	0,150	0,090	0,138	*	*
9	0,168	0,172	0,132	0,115	0,102	0,125	0,114	0,147	0,105	0,127	0,073	0,126
10	0,151	0,151	0,141	0,160	0,152	0,154	0,148	0,154	0,115	0,150	0,117	0,149

* teste não efetuado.

** não medido antes do teste.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta.

⁴ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados.

⁵ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional.

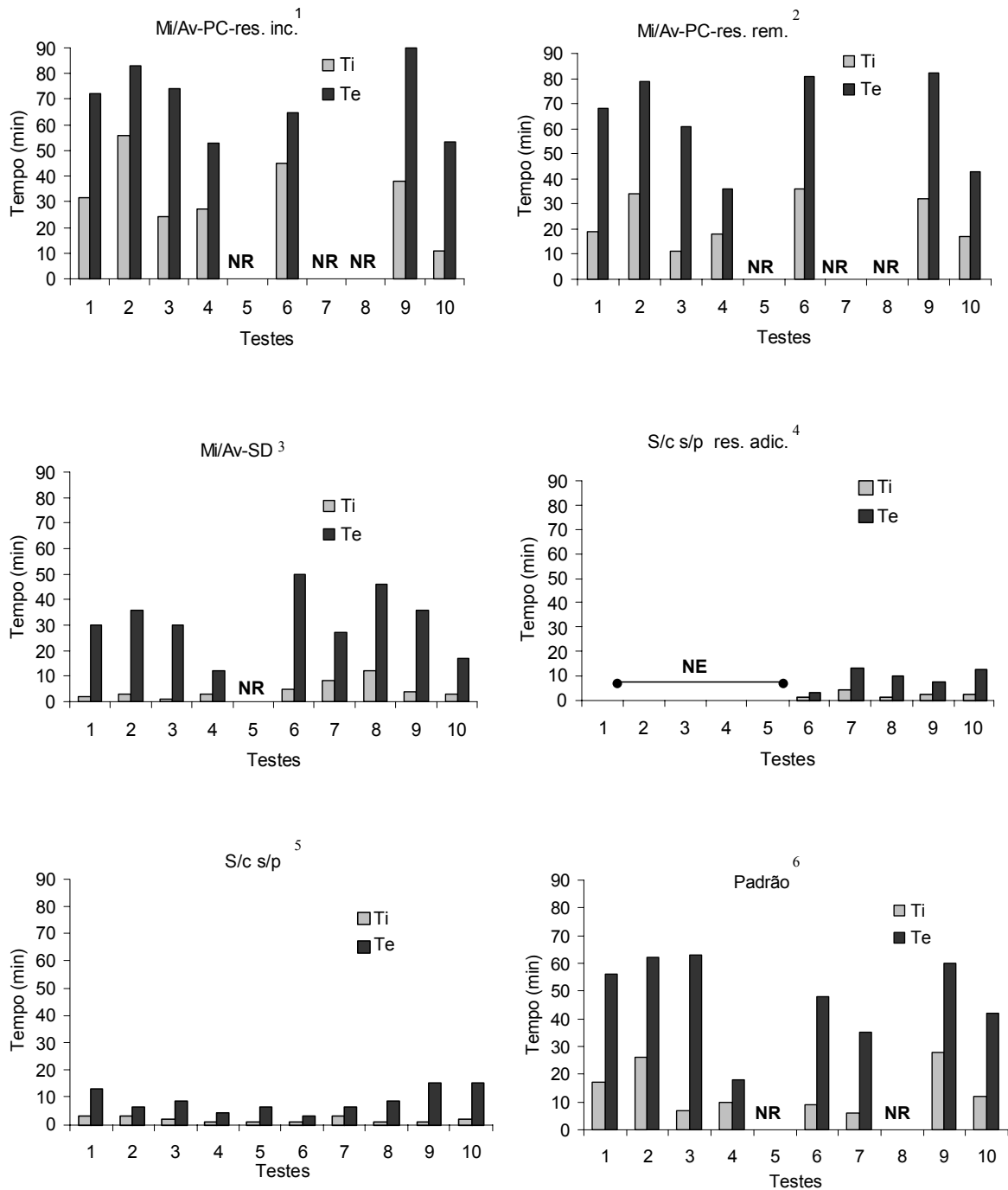


FIGURA 1. Tempos de início (Ti) e de equilíbrio (Te) da enxurrada nos diferentes tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

NR – não realizado.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos e retornados.

⁴ Sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados, removidos e retornados.

⁵ Sem cultivo, sem preparo, continuamente descoberto.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional, continuamente descoberto.

4.2.1.2. Velocidade da enxurrada

Os valores de velocidade da enxurrada, obtidos durante os testes de erosão com chuva simulada, estão apresentados na tabela 7.

Os valores médios da velocidade da enxurrada apresentaram considerável variação entre os tratamentos estudados (tabela 7). O tratamento preparo convencional com incorporação dos resíduos culturais apresentou os menores valores médios de velocidade da enxurrada, enquanto o tratamento sem cultivo, sem preparo, com resíduos culturais adicionados apresentou os maiores valores. Os demais tratamentos apresentaram valores médios intermediários e semelhantes (tabela 7). A variação entre tratamentos foi devido às condições de superfície do solo nos tratamentos. O tratamento preparo convencional com resíduos culturais incorporados, junto com os tratamentos preparo convencional com resíduos removidos e padrão, apresentaram uma rugosidade superficial considerada média (tabela 2), a qual dificultou o livre escoamento da enxurrada. Ao mesmo tempo, o tratamento preparo convencional com incorporação de resíduos culturais apresentou os maiores valores do índice DMP (tabela 5), o que, provavelmente, auxiliou para que a rugosidade superficial do solo, neste tratamento, se mantivesse mais próxima da sua condição inicial durante os testes com chuva simulada. Esta melhor condição física de superfície (em termos de rugosidade superficial) e de subsuperfície do solo (em termos de estabilidade de agregados) neste tratamento, não permitiu que o escoamento da enxurrada, durante todo o teste com chuva simulada, atingisse valores altos de velocidade. Já o tratamento sem cultivo, sem preparo, com adição de resíduos culturais foi o que apresentou a superfície do solo mais lisa, uma vez que a mesma era varrida para a remoção dos resíduos culturais antes da aplicação das chuvas simuladas, sendo esta, então, a pior condição superficial do solo, com vistas à diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada. Estes dados não concordam com os obtidos por Bertol et al. (1997), porém o tratamento semeadura direta com remoção dos resíduos culturais utilizado por estes autores apresentava ainda alguma cobertura superficial do solo, diferente da condição utilizada no presente estudo.

Os valores médios de velocidade da enxurrada variaram muito pouco

TABELA 7. Velocidade da enxurrada aos 30, 60 e 90 minutos de chuva simulada, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

Teste	Tratamento																	
	Mi/Av – PC res. inc. ¹			Mi/Av – PC res. rem. ²			Mi/Av – SD ³			Rec. s/c s/p res. adic. ⁴			Rec. s/c s/p ⁵			Padrão ⁶		
	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min
	----- m s ⁻¹ -----			----- m s ⁻¹ -----			----- m s ⁻¹ -----			----- m s ⁻¹ -----			----- m s ⁻¹ -----			----- m s ⁻¹ -----		
1	0,077	0,133	*	0,115	0,146	*	0,221	0,201	*	NE	NE	NE	0,220	0,240	*	0,133	0,230	*
2	*	0,065	0,095	0,080	0,175	0,198	0,175	0,175	*	NE	NE	NE	0,210	0,220	0,214	0,211	0,240	*
3	0,080	0,150	0,161	0,214	0,279	*	0,250	0,250	0,260	NE	NE	NE	0,240	0,240	0,240	0,240	0,280	0,280
4	0,175	0,205	0,220	0,260	0,300	0,300	0,248	0,241	0,241	NE	NE	NE	0,230	0,230	0,230	0,270	0,300	0,300
5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	NE	NE	NE	0,330	0,270	*	*	*	*
6	*	*	*	*	0,088	0,125	0,075	0,095	0,105	0,270	0,290	0,320	0,290	0,330	0,290	0,160	0,245	0,235
7	*	*	*	*	*	*	*	0,133	*	*	0,240	*	*	0,240	*	*	0,180	*
8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	*	*	0,195	*	0,221	0,240	0,250	0,240	*	*	0,200	0,250	*	0,180	0,230	*	0,255	0,260
Média	0,111	0,138	0,168	0,167	0,202	0,216	0,203	0,191	0,202	0,270	0,243	0,285	0,253	0,244	0,241	0,203	0,247	0,269

* não efetuado.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta.

⁴ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados.

⁵ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional.

entre os tempos de coleta (30, 60 e 90 minutos), principalmente nos tratamentos sem preparo, em que o solo se encontrava em processo de reconsolidação de sua superfície (tabela 7), os quais apresentavam rugosidade superficial muito baixa (tabela 2) e o escoamento da enxurrada atingia o equilíbrio já ao início da chuva (figura 1).

4.2.1.3. Taxa constante de enxurrada

Na figura 2 estão apresentados os valores da taxa constante de enxurrada, obtidos durante os testes de erosão com chuva simulada.

A taxa constante de enxurrada variou pouco entre os tratamentos e testes de erosão com chuva simulada. Contudo, os tratamentos com preparo convencional e cultivo apresentaram os menores valores médios de taxa constante de enxurrada, enquanto os tratamentos sem cultivo, sem preparo, com e sem adição de resíduos culturais, os maiores valores. Os tratamentos com semeadura direta e padrão apresentaram valores intermediários. Bertol et al. (1987) e Castro (1998) também encontraram valores de taxa constante de enxurrada com pouca variação entre os preparos de solo.

Analisando os resultados na figura 2, nota-se que, nos tratamentos com preparo convencional e cultivo, a taxa constante de enxurrada foi um pouco menor onde os resíduos culturais foram incorporados, em comparação ao tratamento onde os resíduos culturais foram removidos. Estes tratamentos apresentaram, respectivamente, valores médios de taxa constante de enxurrada iguais a 43 mm h⁻¹ e 46 mm h⁻¹. O tratamento padrão apresentou valor médio de taxa constante de enxurrada igual a 49 mm h⁻¹, um pouco maior do que nos tratamentos com preparo convencional e cultivo. Por apresentarem condições físicas de superfície semelhantes (tabela 2), esta diferença entre os tratamentos com preparo convencional, possivelmente, deve-se às melhores condições físicas de subsuperfície do tratamento em que os resíduos culturais foram incorporados, principalmente o índice DMP (tabela 5), onde, então, a infiltração de água no solo foi maior. Os tratamentos com o solo em processo de reconsolidação com cultivo em semeadura direta, sem cultivo, sem preparo, com e sem resíduos culturais adicionados apresentaram, respectivamente, valores médios de taxa constante

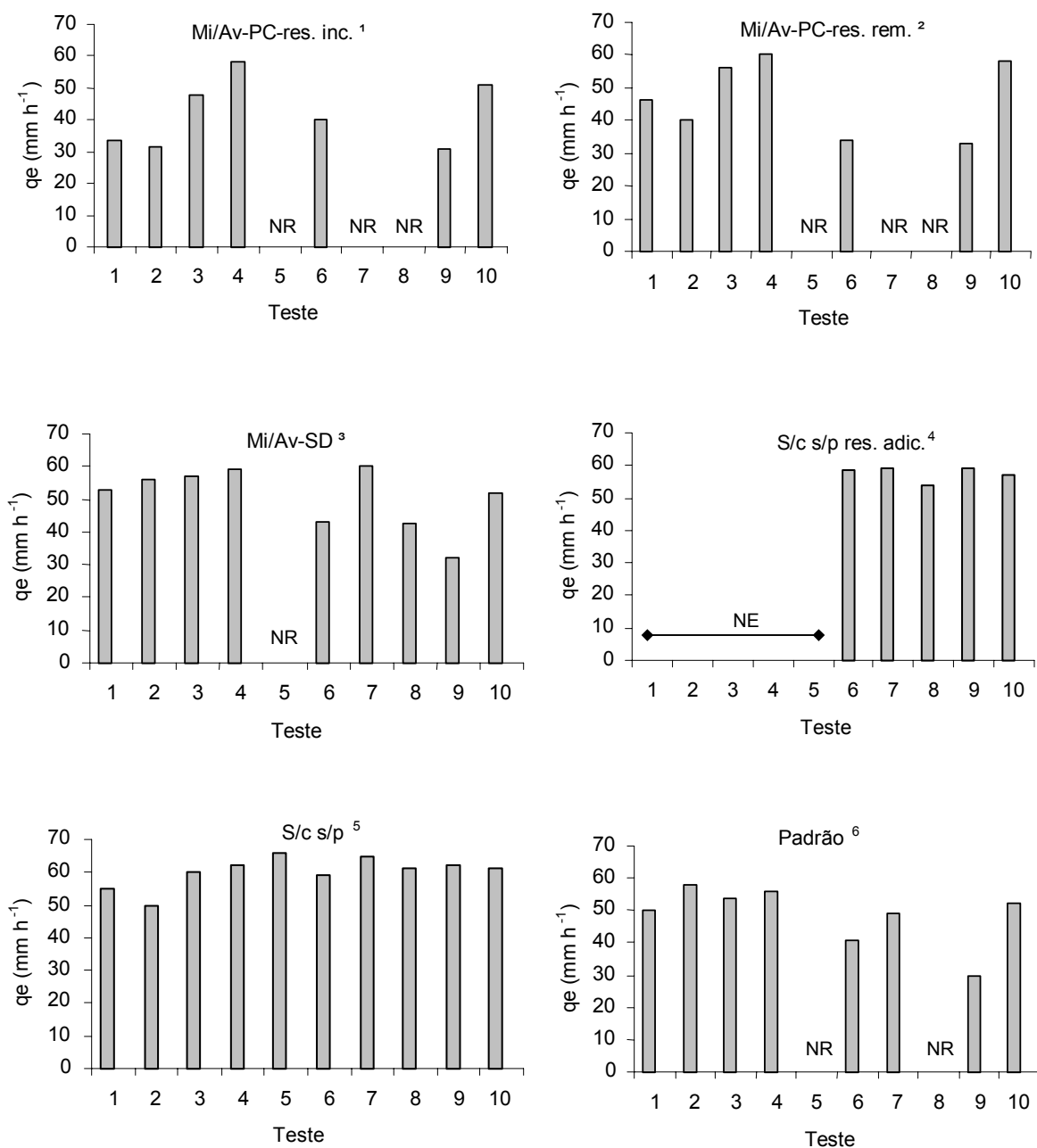


FIGURA 2. Taxa constante de enxurrada (q_e) nos diferentes tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

NR – não realizado.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos e retornados.

⁴ Sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados, removidos e retornados.

⁵ Sem cultivo, sem preparo, continuamente descoberto.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional, continuamente descoberto.

de enxurrada iguais a 52 mm h^{-1} , 60 mm h^{-1} e 58 mm h^{-1} . Isto evidencia que, durante o processo de reconsolidação do solo, o cultivo influenciou a taxa constante de enxurrada, diminuindo-a, o que difere do resultado encontrado por Streck (1999), no mesmo experimento. Este autor não encontrou diferença entre estes tratamentos para os valores médios da taxa constante de enxurrada, porém seu estudo abrangeu apenas os dois primeiros anos do experimento.

4.2.1.4. Perda total de água

Os valores de perda total de água, obtidos durante os testes de erosão com chuva simulada, estão apresentadas na figura 3. Verifica-se que os mesmos variaram consideravelmente entre os tratamentos, mas pouco entre os testes. Os tratamentos com preparo convencional apresentaram valores de perda total de água consideravelmente inferiores aos valores de perda total de água dos tratamentos com solo em processo de reconsolidação. Resultados semelhantes foram observados por Eltz et al. (1984).

O tratamento preparo convencional com incorporação dos resíduos culturais apresentou valor médio de perda total de água um pouco menor (44% do total da chuva aplicada) do que os tratamentos preparo convencional com resíduos culturais removidos e padrão (51% e 54% do total da chuva aplicada, respectivamente). Isto porque o tratamento com incorporação dos resíduos culturais apresentou melhores condições para infiltração da água da chuva no solo, devido à maior estabilidade de seus agregados (tabela 5) e, assim, melhor qualidade da porosidade, e maior permanência de sua rugosidade superficial durante os testes de chuva simulada (tabela 2), do que os tratamentos com resíduos culturais removidos e padrão.

Nos tratamentos com solo em processo de reconsolidação, verifica-se que a perda total média de água foi elevada e similar nos tratamentos sem cultivo, sem preparo, com e sem adição de resíduos culturais (84% e 87%, respectivamente), possivelmente por possuírem as mesmas condições físicas de superfície (rugosidade superficial mínima) e de subsuperfície (porosidade e estabilidade de agregados baixas). Já o tratamento com cultivo em semeadura direta, apresentou valor de perda total média de água igualmente elevada (70%),

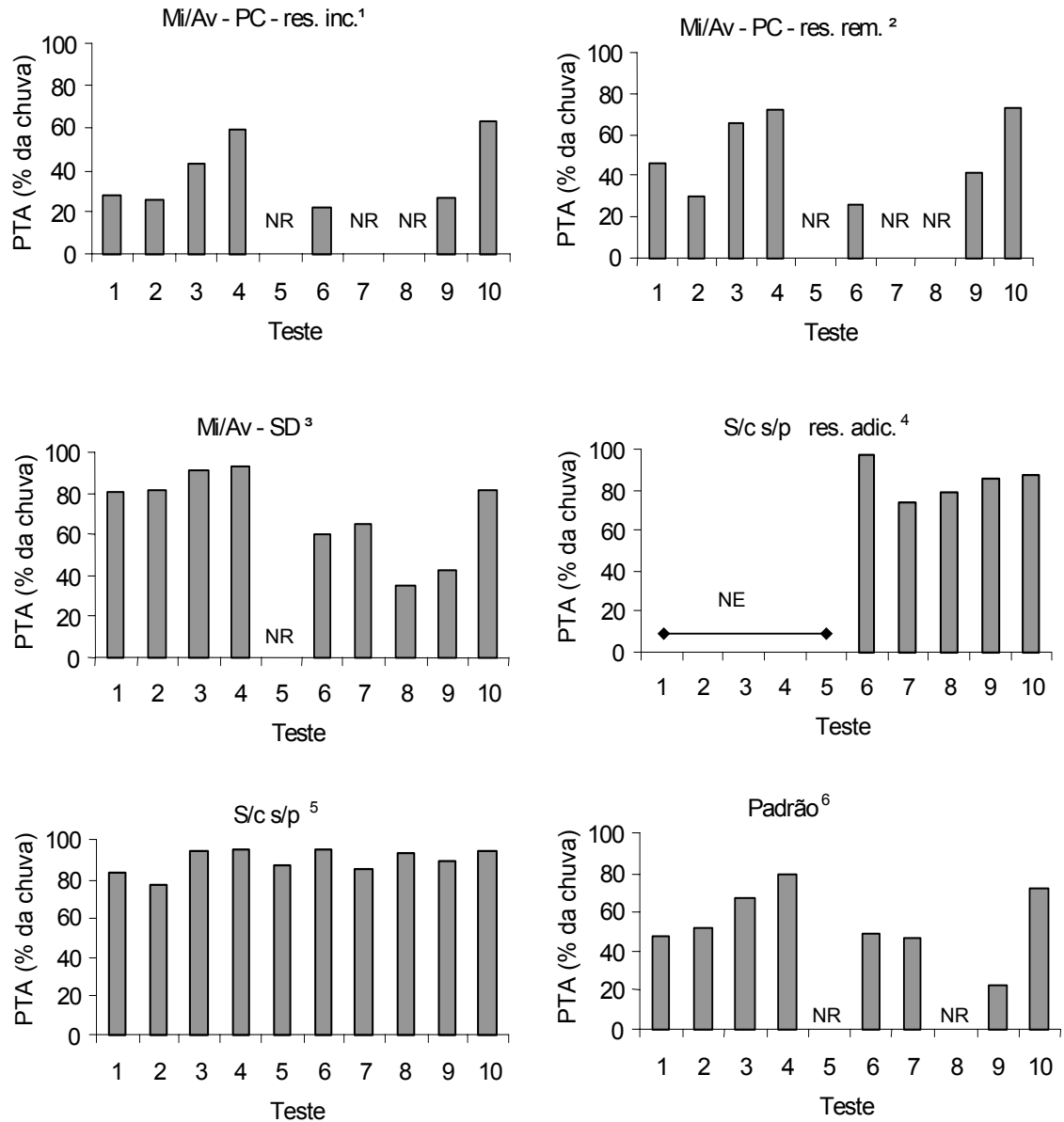


FIGURA 3. Perda total de água (PTA) nos diferentes tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

NR – não realizado.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos e retornados.

⁴ Sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados, removidos e retornados.

⁵ Sem cultivo, sem preparo, continuamente descoberto.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional, continuamente descoberto.

porém inferior aos dos tratamentos sem cultivo. Isto porque, mesmo com condições físicas de superfície do solo semelhantes, este tratamento, possivelmente, apresentava melhores condições físicas de subsuperfície (qualidade do espaço poroso), as quais promoveram maior infiltração de água. Streck (1999), trabalhando com os mesmos tratamentos, não encontrou diferença na perda total de água entre os tratamentos com solo em reconsolidação com e sem cultivo. Porém, como já mencionado, seu estudo compreendeu apenas os dois primeiros anos do experimento. Nota-se na figura 3 que a perda total de água no tratamento com cultivo em semeadura direta foi menor do que a perda total de água no tratamento sem preparo, sem cultivo, sem adição de resíduos culturais, a partir do teste 6 (26/11/98), quando já havia terminado o estudo do referido autor.

4.2.2. Perda de solo

4.2.2.1. Taxa de perda de solo sob enxurrada constante

Os valores das taxas de perda de solo sob enxurrada constante, obtidos durante os testes de erosão com chuva simulada, estão apresentados na figura 4.

Contrariamente às taxas constantes de enxurrada, que variaram pouco (figura 2), as taxas de perda de solo sob enxurrada constante variaram bastante entre os tratamentos estudados e testes de erosão realizados.

O tratamento preparo convencional com incorporação dos resíduos culturais foi o que apresentou o menor valor médio de taxa de perda de solo sob enxurrada constante ($0,73 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). O tratamento preparo convencional com resíduos culturais removidos e o tratamento padrão apresentaram, respectivamente, valores médios de taxa de perda de solo sob enxurrada constante iguais a $2,95 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $7,40 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ou seja, quatro e dez vezes maiores do que o tratamento anterior. Esta diferença se deve às melhores condições físicas de superfície e subsuperfície do solo no tratamento com incorporação dos resíduos culturais, as quais permitiram menor desagregação das partículas de solo e diminuíram a capacidade de transporte da enxurrada, resultando em baixo valor médio de taxa de perda de solo sob enxurrada constante. Estas observações concordam com as obtidas por Allmaras et al. (1967) e Castro (1998).

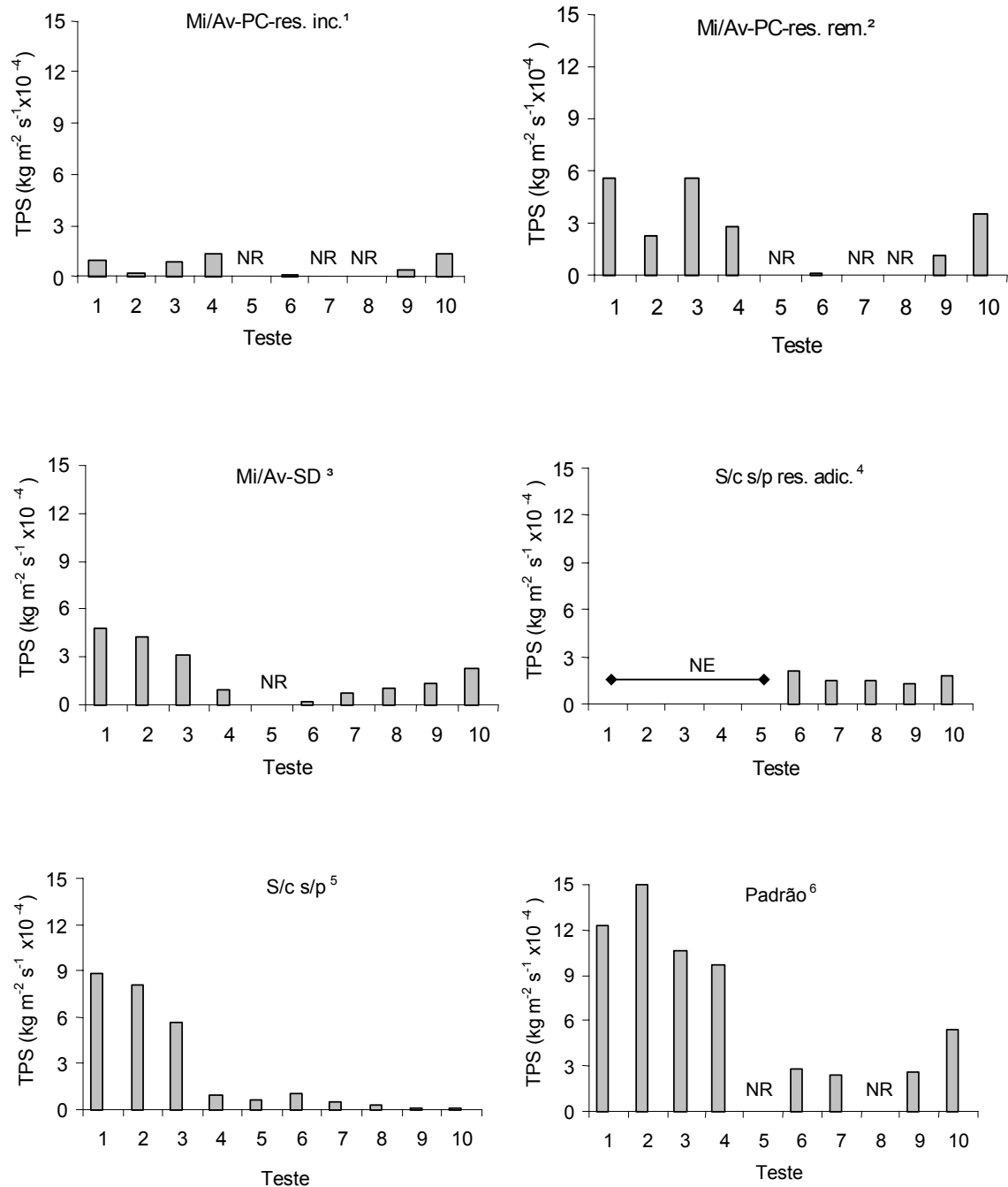


FIGURA 4. Taxa de perda de solo (TPS) sob enxurrada constante nos diferentes tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

NR – não realizado.

NE – tratamento não estabelecido até então.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos e retornados.

⁴ Sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados, removidos e retornados.

⁵ Sem cultivo, sem preparo, continuamente descoberto.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional, continuamente descoberto.

No tratamento com solo em processo de reconsolidação, sem cultivo, sem preparo e continuamente descoberto, a taxa de perda de solo sob enxurrada constante diminuiu ao longo do tempo, sendo elevada no primeiro teste de chuva simulada ($8,89 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e estabilizando a partir do teste 4, num valor médio (entre os testes 4 e 10) de $0,42 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Este comportamento também foi observado no tratamento com cultivo em semeadura direta, exceto que a taxa de perda de solo sob enxurrada constante, a partir do teste 4, estabilizou em um valor médio ligeiramente superior ($1,28 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), mas semelhante ao valor médio (do teste 6 a 10) da taxa de perda de solo sob enxurrada constante ($1,82 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) do tratamento sem cultivo, sem preparo e com adição de resíduos culturais. Esta diferença, possivelmente, se deve ao aumento, ao longo do tempo, da espessura e da força de coesão entre as partículas de solo da crosta superficial, presente no tratamento sem cultivo, sem preparo e continuamente descoberto (tabela 2), o que torna-o mais resistente à desagregação e, assim, diminui muito a taxa de perda de solo (figura 4). Já nos tratamentos com cultivo em semeadura direta e sem cultivo, sem preparo e com adição de resíduos culturais, esta crosta superficial não se formou (tabela 2), facilitando a desagregação das partículas de solo expostas, o que se refletiu em taxas de perda de solo ligeiramente superiores.

4.2.2.2. Índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada

Na tabela 8, estão apresentados os valores do índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada, obtidos durante os testes de erosão com chuva simulada. Verifica-se que tais valores variaram bastante entre os tratamentos estudados, porém pouco entre os tempos de coleta (30, 60 e 90 minutos) e testes de erosão realizados.

O tratamento preparo convencional com incorporação de resíduos culturais foi o que apresentou os menores valores médios do índice D_{50} , aos 30, 60 e 90 minutos do início da aplicação das chuvas simuladas, sendo estes, em média, cinco vezes menores do que os observados no tratamento preparo convencional com resíduos culturais removidos, seis vezes menores do que os observados no tratamento com semeadura direta e nove vezes menores do que os

TABELA 8. Índice D₅₀ dos sedimentos transportados na enxurrada aos 30, 60 e 90 minutos de chuva simulada, nos tratamentos estudados e nos testes de erosão com chuva simulada realizados.

Teste	Tratamento																	
	Mi/Av – PC res. inc. ¹			Mi/Av – PC res. rem. ²			Mi/Av – SD ³			Rec. s/c s/p res. adic. ⁴			Rec. s/c s/p ⁵			Padrão ⁶		
	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min
	mm			mm			mm			mm			mm			mm		
1	0,08	0,11	*	0,35	0,60	*	0,50	0,50	*	NE	NE	NE	0,880	0,69	*	0,18	0,55	*
2	*	0,04	0,04	0,03	0,21	0,61	0,43	0,35	0,39	NE	NE	NE	0,470	0,39	0,40	0,09	0,81	0,74
3	*	*	*	*	*	*	0,31	0,27	0,25	NE	NE	NE	0,540	0,37	0,58	0,26	0,49	0,36
4	0,02	0,02	0,03	0,03	0,6	0,3	0,13	0,38	0,33	NE	NE	NE	0,400	0,37	0,35	0,03	0,50	0,34
5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	NE	NE	NE	0,375	0,38	*	*	*	*
6	*	0,04	0,04	*	0,04	0,04	0,090	0,04	0,04	*	*	*	0,375	0,39	0,38	0,24	0,38	0,38
7	*	*	*	*	*	*	*	0,38	*	*	0,750	*	*	0,75	*	*	*	*
8	*	*	*	*	*	*	*	0,13	0,38	*	0,375	0,375	*	0,38	0,38	*	0,21	*
9	*	*	0,09	*	0,17	*	*	0,47	*	*	0,371	0,413	*	0,37	0,41	*	*	*
10	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,14	0,52	0,47	*	0,453	0,290	*	0,45	0,29	*	0,04	0,18	0,56
Média	0,05	0,05	0,05	0,11	0,24	0,27	0,33	0,33	0,29	0,45	0,45	0,40	0,50	0,44	0,42	0,14	0,45	0,48

* não efetuado.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta.

⁴ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados.

⁵ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional.

encontrados nos tratamentos sem cultivo, sem preparo, com e sem adição de resíduos culturais e no padrão. As melhores condições físicas de superfície e subsuperfície do solo foi o fator responsável por estes baixos valores do índice D_{50} no primeiro tratamento. A rugosidade superficial do solo neste tratamento (tabela 2), bem como a provável persistência da mesma ao longo dos testes de erosão realizados, a baixa taxa constante de enxurrada (figura 2) e a baixa velocidade de escoamento desta (tabela 7), propiciaram baixa capacidade de transporte da enxurrada. Esta situação propiciou a sedimentação das partículas de solo desagregadas de maior diâmetro, ocorrendo apenas o transporte das partículas de menor diâmetro. Isto está de acordo com o observado por Cogo et al. (1983) e Bertol et al. (1997).

O tratamento com cultivo em semeadura direta apresentou valores médios do índice D_{50} aproximadamente 30% menores do que os valores médios dos tratamentos sem cultivo, sem preparo, com e sem adição de resíduos culturais. Esta diferença, provavelmente, se deve à presença de raízes, atividade microbiana e tráfego de pessoas e máquinas, que promoveram maior estabilidade de agregados (tabela 5) e maior infiltração de água da chuva no solo (figura 3) no primeiro tratamento referido, o que se refletiu em desagregação de partículas de solo de menor tamanho e em menor capacidade de transporte da enxurrada, comparado aos dois últimos tratamentos.

4.2.2.3. Perda total de solo

As perdas totais de solo estão apresentadas na figura 5. Contrariamente às perdas totais de água (figura 3), as perdas totais de solo variaram bastante entre os tratamentos estudados e testes de erosão realizados.

O tratamento com preparo convencional e resíduos culturais incorporados foi o que apresentou o menor valor médio de perda total de solo entre todos tratamentos estudados. A perda total média de solo neste tratamento foi de $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto os tratamentos preparo convencional com resíduos culturais removidos e padrão apresentaram, respectivamente, perdas totais médias de solo de quatro ($12,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) e oito ($23,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) vezes maiores. Isto porque o tratamento preparo convencional com incorporação dos resíduos culturais

apresentou boa condição física de superfície do solo (tabela 2), apresentou maior aporte de material vegetal ao solo (tabela 4) e maior índice DMP (tabela 5). Estas condições físicas de superfície e subsuperfície do solo favoráveis promoveram diminuição dos processos de desagregação e transporte das partículas de solo, o que promoveu esta menor perda total média de solo, neste tratamento.

Nos três tratamentos com solo em processo de reconsolidação, o mesmo comportamento da taxa de perda de solo sob enxurrada constante (figura 4) foi observado para a perda total de solo, ao longo do tempo. Devido ao processo de reconsolidação, a superfície do solo adquiriu maior resistência à desagregação de suas partículas, o que se refletiu em perda total de solo decrescente ao longo do tempo. No tratamento sem preparo, sem cultivo e continuamente descoberto, além da reconsolidação superficial, a presença de crosta superficial no mesmo foi responsável pela grande diminuição da perda total de solo. O mesmo foi observado por Streck (1999).

Devido à diminuição da perda total de solo ao longo do tempo nos tratamentos com solo em processo de reconsolidação, para a comparação destes com os tratamentos em preparo convencional utilizou-se a perda total média de solo dos últimos cinco testes (testes 6 a 10), quando, então, as perdas totais de solo nos tratamentos com solo em processo de reconsolidação se apresentavam com valores similares entre os testes. Considerando, então, apenas os últimos cinco testes de erosão, os tratamentos preparo convencional com incorporação dos resíduos culturais, semeadura direta e sem cultivo, sem preparo, continuamente descoberto apresentaram, respectivamente, valores de perda total média de solo iguais a 3,0, 4,8 e 2,3 Mg ha⁻¹. Estes valores mais ou menos similares ocorreram porque, apesar do tratamento preparo convencional com incorporação de resíduos culturais apresentar melhores condições físicas de superfície e subsuperfície, como já discutido, devido ao processo de reconsolidação da superfície do solo os tratamentos com semeadura direta e sem cultivo, sem preparo e continuamente descoberto sofreram menor desagregação de partículas de solo, o que pode ser verificado, também, com a taxa de perda de solo sob enxurrada constante (figura 4), para os últimos cinco testes de erosão realizados.

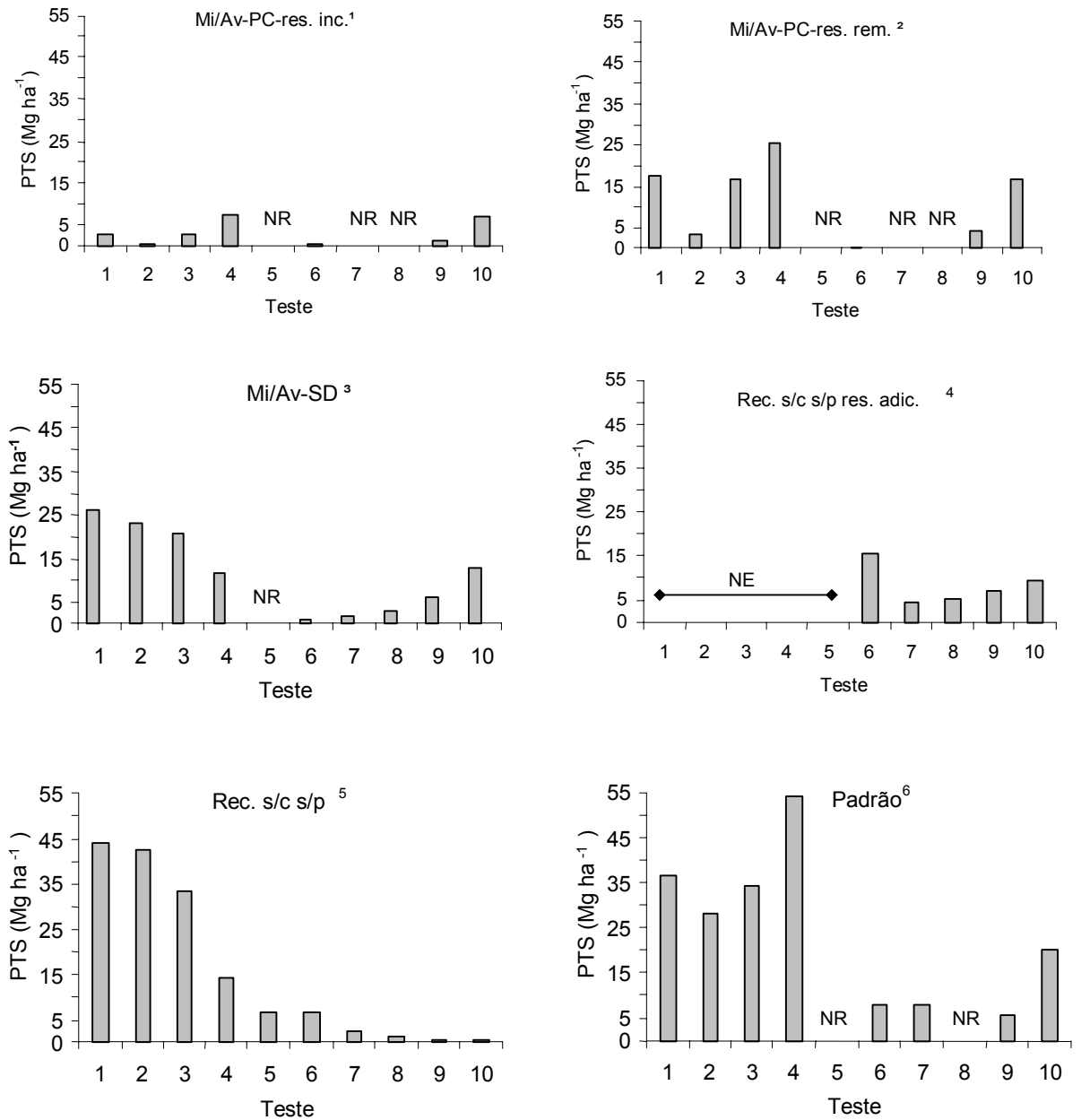


FIGURA 5. Perda total de solo (PTS) nos diferentes tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

NR – não realizado.

NE – tratamento não estabelecido até então.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta.

⁴ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados.

⁵ Reconsolidação do solo, sem cultivo, sem preparo.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional.

Nos testes de erosão com chuva simulada efetuados após o cultivo do milho (testes 1, 3, 5, 8 e 10), os tratamentos preparo convencional com resíduos culturais incorporados, preparo convencional com resíduos culturais removidos e semeadura direta apresentaram, respectivamente, perdas totais médias de solo iguais a 3,9 , 17,2 e 15,7 Mg ha⁻¹. Após o cultivo da aveia preta (testes 2, 4, 6, 7 e 9), estes mesmos tratamentos apresentaram, respectivamente, perdas totais médias de solo iguais a 2,3 , 8,2 e 8,7 Mg ha⁻¹, ou seja, praticamente a metade dos valores anteriores. Devido ao maior aporte de biomassa pela cultura do milho, seja pela parte aérea, seja pelas raízes, poderia ser esperado que a perda total média de solo, após o cultivo desta cultura, fosse menor do que após o cultivo da aveia preta. Porém, foi observado o oposto. Possivelmente, além da influência de outros fatores ligados à condições físicas de superfície e subsuperfície do solo, não medidos, mas que possuem influência no processo erosivo pela água da chuva, a cultura da aveia preta promoveu melhor agregação e estabilidade dos agregados de solo durante seu cultivo, devido à melhor distribuição espacial das plantas, onde estas ficam mais próximas entre si do que as de milho, e o menor diâmetro de suas raízes, que, mesmo com menor massa em relação às raízes de milho, acabam abrangendo maior volume de solo. Contudo, estas considerações devem ser melhor investigadas.

4.3. Interpretação global e sumarizada dos resultados obtidos

Com base nos resultados apresentados e discutidos e considerando apenas a primeira chuva aplicada imediatamente após o preparo do solo, foi possível observar que os três tratamentos com preparo convencional apresentaram os maiores valores de infiltração de água e os menores valores de perda total de água, enquanto os três tratamentos onde houve o cessamento do preparo de solo e se encontravam em processo de reconsolidação de suas superfícies apresentaram valores elevados de perda total de água, evidenciando a importância da manutenção de uma condição física de superfície de solo favorável à infiltração de água da chuva e à diminuição do escoamento superficial.

Com base nos resultados de densidade do solo (tabela 3), índice DMP (tabela 5), perda total de água (figura 3) e perda total de solo (figura 5),

evidenciou-se que o tratamento preparo convencional com incorporação dos resíduos culturais apresentou os melhores resultados de recuperação física da estrutura do solo, o que se refletiu em baixa perda total de água (figura 3) e baixa perda total de solo (figura 5).

Os tratamentos em processo de reconsolidação de sua superfície, por seis anos, com ênfase no tratamento com cultivo em semeadura direta, apresentaram valores de perda total de solo decrescentes ao longo do tempo, quase igualando-se aos valores de perda total de solo do tratamento preparo convencional com incorporação de resíduos culturais nos últimos cinco testes de erosão realizados. Porém, a perda total de água nestes tratamentos manteve-se sempre com valores elevados. Estes resultados devem-se ao aumento da resistência do solo à desagregação de suas partículas por impacto das gotas da chuva causado pela reconsolidação de sua superfície e às condições físicas de superfície destes tratamentos, com solo em processo de reconsolidação, os quais apresentavam baixa rugosidade superficial, não favorável à retenção e infiltração da água da chuva no solo.

5. CONCLUSÕES

Nas condições deste estudo, chegou-se às conclusões abaixo descritas.

A incorporação dos resíduos culturais ao solo, comparada a não incorporação, provocou uma considerável redução das perdas de solo e água por erosão hídrica, refletindo melhorias da estrutura do solo .

O cessamento do preparo de solo efetivamente reconsolidou sua superfície e se refletiu em valores decrescentes de perda de solo por erosão hídrica no tempo; no entanto, a perda de água manteve-se sempre elevada.

O preparo convencional do solo produziu boa rugosidade superficial e, com isso, maior retenção e infiltração da água da chuva no solo, o que se refletiu em menor perda de água.

A perda de solo observada nos testes de erosão com chuva simulada realizados após o cultivo do milho foi maior do que a observada nos testes realizados após o cultivo da aveia preta, evidenciando que o tipo de cultivo efetivamente influenciou a erosão hídrica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J.A.; CASSOL, E.A. & REINERT, D.J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, p.141-151, 2000.
- ALLISON, F.E. Soil aggregation – some facts and fallacies as seen by a microbiologist. **Soil Science**, Baltimore, v.106, n.2, p.136-143, 1968.
- ALLISON, F.E. **Soil organic matter and its role in crop production**. Amsterdam, Elsevier, 1973. p. 315-345.
- ALLMARAS, R.R.; BURWELL, R.E.; HOLT, R.F. Plow-layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, v.31, n.4, p.550-556, 1967.
- AMADO, T.J.C.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa do manejo do resíduo cultural de soja na redução das perdas de solo por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p.251-253, 1989.
- BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R. **Agroclima da Estação Experimental Agrônômica**. Porto Alegre: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da Faculdade de Agronomia/UFRGS, 1990. 96p.
- BERTOL, I. Erosão hídrica em Cambissolo húmico distrófico sob diferentes preparos do solo e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p.267-271, 1994.
- 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.; MIQUELLUTI, D.J. Sedimentos transportados pela enxurrada relacionados à cobertura e rugosidade superficial do solo e taxa de

- descarga. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, RS. v.3, n.2, p. 199-206, 1997.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo, SP. Ed. Ícone, 1990. 355p.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R. & CASSOL, L.C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Campinas, v.23, p.383-391, 1999.
- CASTRO, L.G. **Erosão hídrica relacionada à rugosidade superficial do solo na ausência e na presença de cobertura por resíduos de aveia**. Porto Alegre, 1998. 120f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- CHANEY, K.; SWYFT, R.S. Studies on aggregate stability. I. Reformation of soil aggregates. **Journal of Soil Science**, London, v. 37, p.329-335, 1986.
- COGO, N.P. **Effect of residue cover, tillage-induced roughness and slope length on erosion and related parameters**. Purdue University. PhD – Thesis, 1981. 346f.
- COGO, N.P. & BERTOL, I.; O papel das práticas mecânicas e não-mecânicas no controle da erosão hídrica do solo: conceitos e princípios. In: NURENBERG, N.J. **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages, SC: Sociedade Bras. de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 1998. 160p.
- COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C.; FOSTER, G.R. Effect of crop residue, tillage-induced roughness, and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.47, p.1005-1008, 1983.
- CORRÊA, J.C. Características físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso do Estado do Amazonas, sob diferentes métodos de preparo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.20, n.12, p.1381-1387, 1985.
- D'AGOSTINI, L.R. **Recuperação física do solo por sistemas de cultivo**. Porto Alegre, 1981. 76p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1981.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam v.11, n.3, p199-238. 1988.
- DISSMEYER, G.E. & FOSTER, G.R. Estimating the cover-management factor (C) in the soil loss equation for forest conditions. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.36, n. 4, p. 235-240, 1981.

- 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.
- ELLSWORTH, T.R.; CLAPP, C.E. & BLAKE, G.R. Temporal variations in soil structural properties under corn and soybean cropping. **Soil Science**, v.151, p.405-416, 1991.
- ELTZ, F.L.F.; CASSOL, E.A.; GUERRA, M.; ABRÃO, P.U.R. Perdas de solo e água por erosão em diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetais em solo São Pedro (Podzólico Vermelho-Amarelo) sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.8, p.245-249, 1984.
- FORSYTHE, W. **Física de suelos: manual de laboratorio**. San José, Costa Rica: IICA. 1975. 212p.
- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T. **Hydrologic modeling of small watersheds**. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, 1982. p.297-380.
- FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. Soil erosion and sedimentation by water – an overview. In: Proceedings of the National Symposium on Soil Erosion and Sedimentation by water, 1977, Illinois. **ASAE**, St. Joseph, p. 1-13, 1977.
- HARRIS, R.F.; CHESTERS, G. & ALLEN, O.N. Dynamics of soil aggregation. **Advances in Agronomy**, New York, v.18, p.107-169. 1966.
- HUDSON, N.W. **Soil conservation**. 3 ed. Ames: Iowa State University Press, 1995. 391p.
- IAPAR. Recomendações gerais do encontro sobre o uso do simulador de chuva em pesquisa de Conservação do Solo no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE PESQUISA DE EROSIÃO COM SIMULADOR DE CHUVA, Londrina, 1975. **Resumos...** Londrina: IAPAR, 1975. p. 107-120.
- JOHNSTON, J.R.; BROWNING, G.M.; RUSSEL, M.B. The effect of cropping practices on aggregation, organic matter content and loss of soil and water in the Marshall silt loam. **Soil Science Society of America Proceedings**. Madison, v.7, p. 105-107, 1942.
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. **Methods of soil Analysis, physical and mineralogical properties, including statistics, measurement and sampling**. 1 ed. Madison, American Society Agronomy, 1965. p. 499-510.
- KIEHL, J.E. **Manual de edafologia**. São Paulo, SP. Editora Agronômica Ceres, 1979. 262p.

- KONKHE, H. **Soil physics**. New York: Mc Graw – Hill, 1968. 224p.
- LAL, R.; GREENLAND, B.J. **Soil physical properties and crop production in tropics**. Chichester, John Willey, p.7-85, 1979.
- LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. **European Journal of Soil Science**, v. 47, p. 425-437. 1996.
- LE BISSONNAIS, Y. & ARROUYAS, D. Aggregate stability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. **European Journal of Soil Science**, v.48, p. 39-49, 1997.
- LEVY, G.; SHAINBERG, I. & MORIN, J. Factors affecting the stability of soil crusts in subsequent storm. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 50, p. 196-201. 1986.
- LOPES, P.R.C. **Relações da erosão com tipos e quantidades de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo**. Porto Alegre, 1984. 116f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1984.
- MACHADO, J.A.; BRUM, A.C.R. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 2, p.81-84, 1978.
- MACHADO, J.A.; PAULA SOUZA, D.M. de; BRUM, A.C.R. Efeitos de anos de cultivo convencional em propriedades físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.5, p.187-189, 1981.
- MARTIN, J.P.; MARTIN, W.P.; PAGE, J.B.; RANEY, W.A.; DEMENT, J.D. Soil aggregation. **Advances in Agronomy**, New York, v.7, p.1-37. 1955.
- McBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994.
- McINTYRE, D.S. Permeability measurement of soil crusts formed by raindrop impact. **Soil Science**, v. 85, p.185-189, 1958.
- MOTA, F.S. Estudos do clima do Estado do Rio Grande do Sul, segundo o sistema de W. Koepen. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v.8, p.107-116, 1961.
- NEARING, M.A.; WEST, L.T.; BROWN, L.C. Consolidation model for estimating changes in rill erodibility. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.31, n.3, p.696-700, 1988.

- PALADINI, F.L.S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, SP, v.15, p.135-140, 1991.
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; McCOOL, D.K.; YODER, D.C. **Predicting soil erosion by water: a guide conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)**: Agriculture Handbook n^o. 537. United States Department of Agriculture USDA, 1997.
- SANCHEZ, P.A. **Properties and management of soil in the tropics**. New York, J. Willey, 1976.
- SCHWAB, G.O.; FREVERT, R.K.; EDMINSTER, T.W.; **Soil and water conservation engineering**. New York: J. Willey, 1981. 525p, cap.4: Runoff.
- SILVA, I.F. **Formação, estabilidade e qualidade de agregados do solo afetados pelo uso agrícola**. Porto Alegre, 1993. 126f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.
- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**. Campinas, v.21, p.113-117, 1997.
- SMITH, D.D.; WISCHMEIER, W.H. Rainfall erosion. **Advances in Agronomy**, New York, v.14, p.109-148, 1962.
- STRECK, E.V. **Erosão hídrica do solo relacionada com o subfator uso anterior da terra do modelo "RUSLE"**. Porto Alegre, 1999. 195f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- STRECK, E.V.; KÂMPF, N.; KLAMT, E. **Atualização da classificação taxonômica das unidades de mapeamento do levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Informativo da EMATER/RS. Série: solos. Porto Alegre, v.16, n.9, 5p. 1999.
- SWANSON, N.P. A rotating-boom rainfall simulator. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.26, p.1738-1743, 1965.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. **Australian Journal of Soil Research**, Vitória, v.17, p.429-441, 1979.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, London, v.33, p.141-163, 1982.

- UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil. **Journal of Soil Science**, London, v.33, n.4, p.623-637, 1982.
- VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo vermelho-escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n.7, p.873-882, 1984.
- WILSON, H.A.; BROWNING, G.M. Soil aggregation yields, runoff and erosion as affected by cropping systems. **Soil Science Society of America Proceedings**. v.10, p. 51-57, 1945.
- WISCHMEIER, W.H. Storms and soil conservation. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.17, n.2, p.55-59, 1962.
- WISCHMEIER, W.H. Conservation tillage to control water erosion. In: NATIONAL CONSERVATION TILLAGE CONFERENCE, 1973, Ankeny. **Proceedings ...** Ankeny: Soil Conservation American Society, p133-141. 1973.
- WISCHMEIER, W.H.; MANNERING, J.V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, v. 33, n. 1, p131-137, 1969.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning**. Agr. Handbook N° 537. U.S., Dept. Agr., Washington, D.C., 58p, 1978.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**. Washington, v.28, n.337-351, 1936.

APÊNDICE 1. Declividade média das parcelas experimentais dos tratamentos estudados.

Parcela	Declividade média
	----- m m ⁻¹ -----
1	0,071
2	0,073
3	0,082
4	0,081
5	0,079
6	0,077
7	0,076
8	0,076
9	0,096
10	0,093
Média	0,081

APÊNDICE 2. Intensidade observada das chuvas simuladas aplicadas, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

Teste	Data	Tratamento					
		Mi/Av-PC-res. inc. ¹	Mi/Av-PC-res. rem. ²	Mi/Av –SD ³	S/c, s/p res. adic. ⁴	S/c, s/p ⁵	Padrão ⁶
----- mm h ⁻¹ -----							
1	18/07/96	59,9	61,2	62,3	NE	62,4	65,8
2	21/11/96	55,1	62,0	64,0	NE	64,4	64,3
3	30/05/97	58,4	64,9	60,8	NE	63,0	61,2
4	07/11/97	60,8	63,8	61,3	NE	64,5	63,3
5	23/05/98	NR	NR	NR	73,7	73,7	NR
6	26/11/98	64,8	62,7	58,4	60,7	60,7	62,8
7	10/11/99	NR	NR	70,6	74,8	74,8	71,6
8	25/05/00	NR	NR	66,7	64,1	64,1	NR
9	28/11/00	55,7	55,7	63,4	67,5	67,5	63,2
10	10/05/01	57,8	57,4	60,4	62,8	62,8	56,2

NR – não realizado o teste de chuva.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos e retornados.

⁴ Sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados, removidos e retornados.

⁵ Sem cultivo, sem preparo, continuamente descoberto.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional, continuamente descoberto.

APÊNDICE 3. Duração observada das chuvas simuladas aplicadas, nos tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

Teste	Data	Tratamento					
		Mi/Av-PC-res. inc. ¹	Mi/Av-PC-res. rem. ²	Mi/Av –SD ³	S/c, s/p res. adic. ⁴	S/c, s/p ⁵	Padrão ⁶
		----- min -----					
1	18/07/96	75	75	75	NE	75	75
2	21/11/96	105	90	90	NE	90	90
3	30/05/97	90	75	90	NE	90	90
4	07/11/97	90	90	90	NE	90	90
5	23/05/98	NR	NR	NR	90	90	NR
6	26/11/98	90	90	90	90	90	90
7	10/11/99	NR	NR	60	60	60	75
8	25/05/00	NR	NR	60	60	60	NR
9	28/11/00	105	105	45	60	90	90
10	10/05/01	90	90	75	75	75	90

NR – não realizado o teste de chuva.

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais removidos.

³ Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos e retornados.

⁴ Sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados, removidos e retornados.

⁵ Sem cultivo, sem preparo, continuamente descoberto.

⁶ Sem cultivo, preparo convencional, continuamente descoberto.

APÊNDICE 4. Massa de resíduos culturais, em três tratamentos estudados e testes de erosão com chuva simulada realizados.

Teste	Data	Cultura anterior	Tratamento		
			Mi/Av-PC-res. inc. ¹	Mi/Av –SD ²	S/c, s/p res. adic. ³
			----- Mg ha ⁻¹ -----		
1	18/07/96	Milho	7,0	4,8	NE
2	21/11/96	Aveia	5,6	3,3	NE
3	30/05/97	Milho	11,5	5,1	NE
4	07/11/97	Aveia	9,0	2,3	NE
5	23/05/98	Milho	x	x	NE
6	26/11/98	Aveia	4,9	x	5,9
7	10/11/99	Aveia	4,1	4,4	4,4
8	25/05/00	Milho	3,9	6,0	3,8
9	28/11/00	Aveia	5,2	7,7	4,6
10	10/05/01	Milho	5,1	6,6	6,4

x – não avaliado

NE - tratamento até então não estabelecido.

¹ Sucessão milho/aveia preta, preparo convencional, resíduos culturais incorporados.

² Sucessão milho/aveia preta, semeadura direta, resíduos culturais removidos e retornados.

³ Sem cultivo, sem preparo, resíduos culturais adicionados, removidos e retornados.

RESUMO BIOGRÁFICO

Leandro Bochi da Silva Volk, filho de Nelson Volk e Sandra Maria Bochi da Silva Volk, nasceu no dia 10 de setembro de 1973, em Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul. Concluiu o curso de segundo grau no ano de 1989, no Colégio Anchieta, em Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul. No ano de 1993, iniciou o Curso de Agronomia na Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul, onde recebeu o título de Engenheiro Agrônomo, em 1998. Em 2000, iniciou o Curso de Mestrado em Ciência do Solo junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul.

Casou-se com Gabriela Lemos em Janeiro de 2002.