

# SEÇÃO VI - MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA

## RELAÇÕES DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO SOLO COM O VOLUME DE CHUVA E COM A ESTABILIDADE DE AGREGADOS EM ÁGUA<sup>(1)</sup>

Ildegardis Bertol<sup>(2)</sup>, André Júlio do Amaral<sup>(3)</sup>, Eva Vidal Vázquez<sup>(4)</sup>,  
Antonio Paz González<sup>(5)</sup>, Fabrício Tondello Barbosa<sup>(6)</sup>  
& Leonardo Felipe Brignoni<sup>(6)</sup>

### RESUMO

A rugosidade superficial do solo é afetada, dentre outros fatores, pelo tipo de preparo, volume de chuva e estabilidade dos agregados estruturais diante da ação destrutiva da água. Em um Inceptisol, num experimento de erosão sob chuva natural realizado há 15 anos, no Sul da região do Planalto Catarinense, Brasil, avaliou-se a rugosidade superficial, a qual foi expressa por meio dos índices: rugosidade (RR), tortuosidade (T) e diferença de elevação limite (LD), no cultivo do milho, em 2003, e no cultivo da aveia, em 2004, em cujos períodos experimentais precipitaram 229 e 350 mm de chuva, respectivamente. Além disso, em 2004, entre os dois cultivos, avaliou-se a estabilidade dos agregados em água, expressa pelo diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados. Os tratamentos de sistemas de manejo do solo foram: preparo convencional (PC) com uma aração + duas gradagens; cultivo mínimo (CM) com uma escarificação + uma gradagem, e semeadura direta (SD), ambos cultivados com milho e aveia, além de um tratamento adicional sem cultivo do solo (SC) em preparo convencional com uma aração + duas gradagens. A rugosidade foi avaliada

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Mestrado do segundo autor. Trabalho executado com recursos do CNPq/UDESC. Recebido para publicação em janeiro de 2005 e aprovado em março de 2006.

<sup>(2)</sup> Professor do Departamento de Solos do Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina – CAV/UDESC. CEP 88500-000 Lages (SC). E-mail: a2ib@cav.udesc.br

<sup>(3)</sup> Mestrando do Departamento de Solos CAV/UDESC. Bolsista do CNPq. E-mail: a6aja@cav.udesc.br

<sup>(4)</sup> Pesquisadora da Universidade de Santiago de Compostela, USC, no Programa Juan de la Cierva, Ministerio de Educación y Ciencia. Espanha. E-mail: evavidal@mail2.udc.es

<sup>(5)</sup> Catedrático de Edafologia y Química Agrícola da Universidade da Coruña, UDC. Espanha. E-mail: tucho@udc.es

<sup>(6)</sup> Aluno do Curso de Agronomia, CAV/UDESC. Bolsista do CNPq de Iniciação Científica.

em cinco oportunidades no cultivo do milho e em quatro da aveia, sendo a primeira avaliação imediatamente após o preparo do solo, e as demais, em intervalos sucessivos de 15 dias. A rugosidade inicial do solo foi alta e diminuiu com o aumento do volume das chuvas nos tratamentos SC, PC e CM, enquanto, na SD, a rugosidade foi alta apenas no cultivo da aveia e apresentou variação muito pequena com o aumento da chuva. O SC apresentou a maior redução da rugosidade ao acaso, enquanto a menor redução ocorreu na SD. A rugosidade superficial foi reduzida da condição original, na qual não se retiraram os efeitos da pente e das marcas do preparo do solo, para a condição ao acaso, na qual esses efeitos foram retirados. A rugosidade superficial ao acaso relacionou-se inversamente com o volume das chuvas naturais. O decaimento máximo da rugosidade ao acaso relacionou-se inversamente com o DMP e com o DMG dos agregados estruturais.

**Termos de indexação:** preparo do solo, índice de rugosidade, microrrelevo superficial.

**SUMMARY:** *RELATIONS OF SOIL SURFACE ROUGHNESS WITH THE RAINFALL VOLUME AND WATER AGGREGATE STABILITY*

*Soil surface roughness is, among other factors, affected by soil tillage, cumulative rainfall and aggregate stability in relation to destructive water action. The soil surface roughness of a soil classified as a Haplumbrept was evaluated in an area where a water erosion experiment under natural rainfall has been carried out over the course of 15 years in the South of the Planalto Catarinense, Santa Catarina State, Brazil. The soil microrelief was characterized by the indices: roughness (RR), tortuosity (T) and limiting elevation difference (LD) and was measured in 2003 in a corn crop, and in 2004 in an oat crop (cumulative rainfall during the experimental periods was 229 and 350 mm, respectively). Moreover, water aggregate stability was evaluated and expressed by the mean weight diameter (DMP) and mean geometric diameter (DMG) of aggregates between the two crops, in 2004. The studied soil tillage system treatments were: plowing plus disking (PC), chisel plow plus disking (CM), and no-tillage (SD), both under corn and oat crops. One additional treatment used as reference consisted of bare soil tillage with plowing plus disking (SC). The surface roughness was evaluated five times under corn and four times under oat. The first evaluation was carried out immediately after soil tilling and the others every other week. The initial values of the RR, T, and LD indices were high and decreased with increasing rainfall on SC, PC AND CM treatments, while in the SD treatment the afore-mentioned indices were only high for oat and varied very little as the rainfall increased. The reduction in the random RR index was the highest in the BS treatment, while the lowest reduction occurred in the SD treatment. The values of all indices under study were reduced in comparison to that of the original microrelief condition, where the slope effects and the soil tillage marks had not been removed, with the condition where they were not considered. The RR, T, and LD indices evaluated in random conditions, were inversely correlated with the natural rainfall volume. The cumulative decay of the random RR index towards the end of the experiment was inversely correlated with the DMP and DMG of the soil structure aggregates.*

*Index terms:* soil tillage, roughness indices, surface microrelief.

## INTRODUÇÃO

A rugosidade da superfície do solo é representada pela ondulação do terreno, mais precisamente pelas variações de altura das microelevações e de profundidade das microdepressões superficiais, bem como pela sua distribuição espacial (Kuipers, 1957; Allmaras et al., 1966). O aumento da rugosidade superficial do solo é responsável pelo aumento da

armazenagem de água na superfície (Paz González & Taboada Castro, 1996), da infiltração de água no solo e da retenção de sedimentos e, por isso, pela redução da erosão hídrica. Este efeito é potencializado quando está presente na superfície do solo a cobertura por resíduos vegetais (Cogo, 1981).

A rugosidade superficial depende do tipo e intensidade do preparo e da umidade do solo antecedente ao preparo, da quantidade e tipo de

resíduo vegetal e do tipo de solo (Allmaras et al., 1966; Cogo, 1981; Römken & Wang, 1986; Kamphorst et al., 2000; Schick et al., 2000; Vidal Vázquez, 2002), bem como da declividade do terreno. A persistência da rugosidade no tempo é influenciada pelo volume e intensidade das chuvas, pela enxurrada e tipo de solo (Dexter, 1977; Cogo, 1981; Paz González & Taboada Castro, 1996; Eltz & Norton, 1997; Schick et al., 2000; Vidal Vázquez, 2002). A rugosidade é, ainda, afetada pela estabilidade dos agregados, densidade e porosidade do solo (Lehrsch et al., 1987), as quais determinam, em parte, a qualidade da estrutura e regulam a velocidade e o grau de sua degradação. Assim, a rugosidade superficial ao acaso diminui com o aumento do volume e intensidade da chuva (Cogo, 1981; Eltz & Norton, 1997; Vidal Vázquez, 2002), enquanto a rugosidade orientada aumenta com o aumento da enxurrada (Bertol, 1995).

A forma mais usual de modificar a rugosidade superficial do solo é por meio do preparo. Assim, o solo, quando é submetido a um sistema de manejo conservacionista, em que seu preparo é executado por meio de escarificador, seguido ou não de gradagem, apresenta a superfície mais rugosa do que quando submetido a um sistema de manejo convencional, em que o preparo é executado por meio de aração com arado de discos seguida de gradagens. No preparo convencional do solo, por sua vez, a superfície apresenta-se mais rugosa do que quando o solo é mantido por algum tempo sem preparo, como é o caso do sistema de manejo em semeadura direta (Cogo, 1981; Bertol, 1995; Bertol et al., 1997; Schick et al., 2000). Portanto, nos sistemas de manejo conservacionistas, com exceção da semeadura direta, a rugosidade superficial do solo é maior do que nos sistemas convencionais. Em alguns casos, no entanto, a semeadura direta pode apresentar alta rugosidade superficial, por causa dos resíduos vegetais remanescentes dos cultivos anteriores. No caso deste sistema de manejo, grande parte da rugosidade superficial é representada pelos resíduos vegetais que, normalmente, estão na superfície, enquanto pequena parte da rugosidade é representada pela superfície do solo propriamente dita. A rugosidade superficial formada por resíduos vegetais, embora mais persistente no tempo, apresenta menor capacidade de retenção da água de enxurrada na superfície do solo do que a rugosidade formada pelo preparo do solo, a qual, embora menos persistente no tempo, é composta por microdepressões e microelevações da superfície.

A ocorrência de enxurrada e, conseqüentemente, de transporte de material por erosão hídrica, é dependente do volume e intensidade da chuva, da infiltração de água no solo, da capacidade de armazenagem superficial de água (Cogo, 1981), da declividade do terreno (Wischmeier & Smith, 1978) e da capacidade de interceptação da cobertura vegetal (Huggins, 1981; Eltz & Norton, 1997). A capacidade de armazenagem superficial da água, por sua vez,

depende, quase que exclusivamente, da rugosidade superficial (Cogo, 1981; Onstad, 1984; Kamphorst et al., 2000) e, em parte, da cobertura vegetal na superfície. Assim, superfícies de solo rugosas e, ou, cobertas armazenam maior volume de água do que superfícies lisas e, principalmente, do que lisas e descobertas.

A rugosidade da superfície do solo pode ser expressa por diversos índices (Kamphorst et al., 2000). O índice de rugosidade ao acaso, RR, o qual descreve a distribuição casual dos torrões do solo em uma superfície submetida a determinado sistema de manejo (Allmaras et al., 1966), é o mais tradicional e antigo índice proposto para descrever a rugosidade superficial do solo (Kuipers, 1957). O índice RR descreve apenas o intervalo na componente vertical da rugosidade, ou seja, a distribuição de altura dos torrões e das depressões, sem levar em conta a componente espacial, ou seja, a localização dos torrões e depressões no espaço do microrrelevo. Portanto, duas superfícies com o mesmo RR podem apresentar morfologias completamente distintas e, conseqüentemente, diferentes capacidades para armazenar água na superfície (Huang & Bradford, 1992).

O índice de tortuosidade, T, como proposto por Boiffin (1984), também pode ser utilizado como um indicador de rugosidade. Este índice descreve a relação entre a extensão do perfil de uma superfície de solo rugosa e a distância entre o ponto inicial e final da referida superfície. Portanto, o índice T pode representar a capacidade de determinada superfície para dificultar a enxurrada. No entanto, este índice depende da escala em que foram tomadas as medidas da rugosidade superficial (Skidmore, 1997). Assim, duas superfícies de solo com a mesma rugosidade, em que, na sua avaliação, foram utilizadas escalas distintas, apresentarão índices T completamente diferentes e, portanto, apresentarão diferentes capacidades para dificultar a enxurrada (Kamphorst et al., 2000).

A diferença de elevação limite, LD, é outro índice que pode ser utilizado para auxiliar a descrição da rugosidade superficial do solo (Linden & Van Doren, 1986), o qual foi desenvolvido levando em conta o aspecto espacial da rugosidade. O índice LD é baseado na relação entre a diferença de elevação absoluta média dos pontos representados pelo pico dos torrões e pela base das depressões da superfície do solo e o intervalo entre os referidos pontos. Assim, o índice LD está relacionado com o índice RR (Kamphorst et al., 2000) e pode representar a capacidade da superfície do solo de armazenar a enxurrada.

O objetivo deste trabalho foi quantificar a rugosidade superficial do solo submetido à chuva natural e relacioná-la com o volume de chuvas e com a estabilidade estrutural do solo, em diferentes sistemas de manejo do solo durante dois períodos de cultivo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi executado no campo, sob chuva natural, em um experimento localizado no Sul do Planalto Catarinense, situado entre 27 ° 49 ' de latitude ao Sul e 50 ° 20 ' de longitude, a Oeste de Greenwich, a 937 m de altitude média. O clima é do tipo Cfb, segundo a classificação de Köppen, com precipitação média anual de, aproximadamente, 1.600 mm e erosividade média anual de aproximadamente, 6.000 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (Bertol et al., 2002a).

Estudou-se um Inceptisol argiloso horizonte A moderado, substrato de siltitos + argilitos. Na camada de 0–20 cm de profundidade, o solo apresenta 421 g kg<sup>-1</sup> de argila, 437 g kg<sup>-1</sup> de silte, 142 g kg<sup>-1</sup> de areia e densidade do solo 1,28 kg dm<sup>-3</sup>. A erodibilidade do solo é de 0,0115 t ha h ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> (Bertol et al., 2002b) e a declividade média do terreno é de 0,10 m m<sup>-1</sup> no local do experimento. A área experimental vem sendo utilizada, desde novembro de 1988, em estudos de erosão hídrica sob chuva natural.

Neste trabalho, feito entre maio de 2003 e abril de 2004, foram estudados, durante dois cultivos, os seguintes tratamentos de manejo do solo, em parcelas de 3,5 x 22,1 m, distribuídas ao acaso: preparo convencional (PC), executado com uma aração + duas gradagens: cultivo mínimo (CM), executado com uma escarificação + uma gradagem, e semeadura direta (SD), sem preparo do solo. No período experimental, cultivaram-se milho, durante o primeiro cultivo, e aveia, durante o segundo. Outro tratamento de manejo constou de solo sem cultivo (SC), executado com uma aração + duas gradagens, mantido em pousio. O preparo do solo, nos tratamentos pertinentes, foi executado no sentido paralelo ao declive, do seguinte modo. Nos tratamentos PC e SC, a aração fez-se com um arado de discos na profundidade de 0,20 m e a gradagem com uma grade de discos na profundidade de 0,15 m. No CM, a escarificação fez-se com um escarificador com 15 hastes distanciadas 0,20 m na profundidade de 0,15 m e a gradagem com a mesma grade utilizada no PC e SC. Os preparos do solo foram executados em final de abril de 2003, para instalar as culturas de inverno e, em final de novembro de 2003, para instalar as culturas de verão. Na SD, a operação de semeadura das culturas fez-se manualmente, utilizando-se um equipamento denominado “saraquá” ou “matraca”. As semeaduras das culturas foram feitas imediatamente após os preparos do solo.

As chuvas naturais ocorridas durante o período experimental totalizaram 229 mm no cultivo do milho e 350 mm da aveia.

A rugosidade superficial do solo foi avaliada em cinco oportunidades durante o cultivo de milho e em quatro durante o cultivo de aveia, em quatro parcelas experimentais, resultando num total de 36 avaliações. Em ambos os cultivos, a primeira avaliação foi feita

imediatamente após o preparo do solo, e as demais, em intervalos de aproximadamente 15 dias.

Para avaliar a rugosidade, foi utilizado um rugosímetro que continha 40 varetas de alumínio, com 6 mm de diâmetro, distribuídas ao longo de uma linha. O aparelho possibilitou a tomada de 40 leituras de elevações da superfície do solo em cada posição na área central da parcela experimental. Movendo o conjunto de varetas, em distâncias de 5 cm, em cinco posições sobre o suporte do equipamento, foram tomadas 200 leituras de elevações da superfície do solo em cada parcela. Nas avaliações feitas durante o cultivo do milho, a distância entre as varetas do rugosímetro era de 3 cm, na linha, e a distância entre as linhas, de 5 cm, totalizando uma área de amostragem de 0,234 m<sup>2</sup> por parcela. No cultivo da aveia, a distância entre as varetas do rugosímetro, na linha, era de 2 cm e, entre as linhas, também de 5 cm, o que perfazia uma área de amostragem de 0,156 m<sup>2</sup> por parcela.

A rugosidade superficial do solo foi calculada por meio de três métodos, tendo sido obtidos três índices. O índice de rugosidade (RR) foi calculado pelo método proposto por Allmaras et al. (1966), modificado por Currence & Lovely (1970), ou seja, utilizando-se o desvio-padrão das alturas e não o erro-padrão, e modificado, ainda, por Kamphorst et al. (2000), ou seja, sem transformar os dados originais para logaritmo e sem eliminar os seus valores extremos. Com os mesmos dados de elevação da superfície do solo, calculou-se o índice de tortuosidade (T), conforme o método proposto por Boiffin (1984), modificado por Kamphorst et al. (2000), fazendo-se a relação entre a extensão do perfil da superfície rugosa (considerando as ondulações superficiais do terreno) e a extensão da mesma superfície em linha reta (desconsiderando as referidas ondulações). Com os mesmos dados, calculou-se, ainda, o índice diferença de elevação limite (LD), conforme proposto por Linden & Van Doren (1986). Ambos os índices foram calculados com os dados em três condições, a saber: (1) condição original, como lidos diretamente no campo; (2) condição em que se retirou o efeito da declividade do terreno, mediante o uso de um modelo de tendência linear, e (3) condição em que se retiraram simultaneamente os efeitos da declividade do terreno e das marcas do preparo do solo (rugosidade ao acaso).

A estabilidade dos agregados estruturais em água, expressa pelo diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG), foi determinada pelo método proposto por Yoder (1936) e modificado por Kemper & Chepil (1965). Para isso, utilizou-se um conjunto de quatro peneiras com aberturas de malhas de 4,76; 2,00; 1,00; e 0,25 mm, com 40 oscilações verticais por minuto, dentro da água, durante 10 min. As amostras do solo destinadas a estas determinações, deformadas, foram coletadas na profundidade de 0–10 cm, em dois locais em cada parcela experimental, ao final do ciclo de cada um dos cultivos e antes do preparo do solo.

Os dados foram correlacionados por análise de regressão linear de segunda ordem. Foram feitas correlações entre o índice RR ao acaso e o volume de chuvas, entre o índice T ao acaso e o volume de chuvas, entre o índice LD ao acaso e o volume de chuvas e entre o decaimento máximo de DMP e DMG e o índice RR ao acaso.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os índices RR e LD ao acaso foram altos em todos os tratamentos (Quadro 1). Nos tratamentos com mobilização do solo, SC, PC e CM, os valores de RR e LD foram, na média dos tratamentos, respectivamente, 38 e 46 % maiores do que na SD, revelando a importância do preparo do solo no aumento da rugosidade superficial e, conseqüentemente, na capacidade de armazenagem de água e retenção de sedimentos na superfície do solo. Os altos valores de RR e

LD, nos tratamentos com mobilização do solo, são explicados pelo efeito do preparo, o qual elevou a superfície do solo acima do seu nível original, criando, conseqüentemente, espaços porosos internos no solo e na superfície (microdepressões), além de microelevações superficiais, em relação ao tratamento SD. Os valores de RR e LD relativamente altos na SD, especialmente no cultivo da aveia, são explicados pelo efeito dos resíduos vegetais presentes na superfície do solo e pelas ondulações da superfície do terreno ainda presentes nesse tratamento. Há que se ressaltar que a rugosidade superficial formada pelos resíduos vegetais, na SD, tem menor capacidade de armazenar água, entre as peças do resíduo, do que a rugosidade do solo formada pelo preparo, nos tratamentos SC, PC e CM, nas depressões do terreno.

Os índices de rugosidade diminuíram pelo efeito das chuvas, nos distintos sistemas de manejo do solo e nos dois cultivos, com poucas exceções (Quadro 1), concordando com dados de Cogo (1981), Paz González

**Quadro 1. Índices de rugosidade, tortuosidade e diferença de elevação limite superficial do Inceptisol, nas condições: original, sem o efeito da pente do terreno e ao acaso, em diferentes sistemas de manejo do solo durante dois cultivos**

Condição	SC	PC	CM	SD	SC	PC	CM	SD
	Imediatamente após preparo do solo				Após 229 mm de chuva			
Cultivo do milho								
Rugosidade, mm								
Original	20,15	20,10	19,81	8,17	10,94	23,27	9,62	5,71
Sem pente	18,88	17,45	19,51	7,73	10,86	21,12	9,01	5,45
Ao acaso	14,49	14,25	13,00	5,36	6,00	8,62	6,63	6,64
Tortuosidade								
Original	1,102	1,098	1,162	1,031	1,023	1,059	1,033	1,012
Sem pente	1,103	1,098	1,162	1,031	1,023	1,058	1,033	1,012
Ao acaso	1,092	1,070	1,106	1,019	1,015	1,039	1,023	1,009
Diferença de elevação limite, mm								
Original	27,13	28,67	27,22	8,13	17,40	20,55	14,38	8,33
Sem pente	24,41	23,13	26,80	7,94	17,56	19,68	14,67	8,01
Ao acaso	18,11	18,13	15,79	5,74	7,35	10,37	8,97	6,02
Cultivo da aveia								
Imediatamente após preparo do solo				Após 350 mm de chuvas				
Rugosidade, mm								
Original	18,93	15,30	10,66	16,20	9,13	12,24	10,37	17,81
Sem pente	17,13	11,35	9,77	14,81	8,45	10,72	8,83	15,81
Ao acaso	14,97	8,02	7,40	12,12	5,77	4,56	5,32	11,65
Tortuosidade								
Original	1,195	1,061	1,043	1,118	1,012	1,020	1,027	1,093
Sem pente	1,195	1,061	1,047	1,118	1,011	1,021	1,027	1,093
Ao acaso	1,158	1,046	1,035	1,101	1,009	1,013	1,019	1,080
Diferença de elevação limite, mm								
Original	22,30	23,55	14,54	20,27	15,62	12,36	11,03	20,50
Sem pente	19,80	14,09	11,92	18,12	13,64	12,20	10,84	19,52
Ao acaso	17,04	9,66	8,70	14,25	8,79	5,34	6,34	13,54

SC: solo sem cultivo; PC: uma aração + duas gradagens; CM: uma escarificação + uma gradagem; SD: semeadura direta.

& Taboada Castro (1996), Eltz & Norton (1997), e Vidal Vázquez (2002). As maiores diminuições, em geral, ocorreram nos índices ao acaso, no tratamento SC. Na média dos dois cultivos, as diminuições neste tratamento foram de 60 %, para o índice RR; de 10 %, para o índice T, e de 54 %, para o índice LD. No PC e CM, os referidos índices também diminuíram expressivamente pelo efeito das chuvas; no entanto, em menor grau do que no SC. O comportamento desses dados é explicado pelo efeito da energia cinética das gotas das chuvas e das enxurradas associadas, que, incidindo diretamente sobre o solo, total ou parcialmente descoberto, dependendo do tipo de manejo, desgastaram as microelevações da superfície do solo, cujos sedimentos desagregados foram depositados nas microdepressões. No caso da SD, os índices RR e LD, ambos ao acaso, tiveram seus valores levemente aumentados pelo efeito das chuvas no primeiro cultivo (houve arraste de resíduos vegetais de outros pontos da parcela experimental), enquanto os demais dados deste tratamento diminuíram, embora levemente.

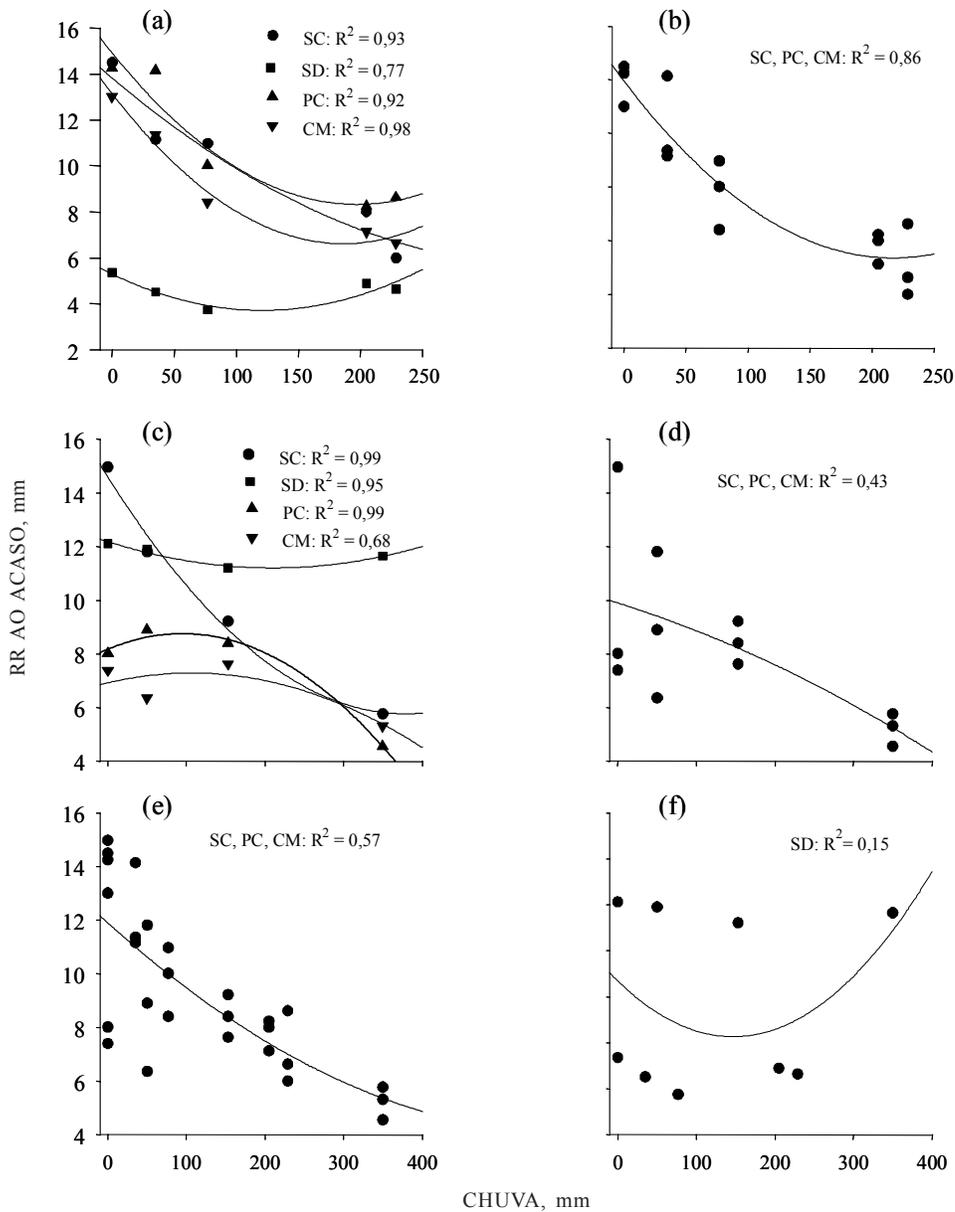
Os índices de rugosidade diminuíram da condição original (na qual não se retiraram os efeitos da pente e das marcas do preparo do solo para o seu cálculo), para a condição ao acaso (na qual se retiraram os efeitos da pente e do preparo) (Quadro 1). Isto ocorreu em todos os tratamentos, em ambos os cultivos, tanto imediatamente após o preparo do solo quanto após as chuvas, concordando com dados de Vidal Vázquez (2000). As maiores diminuições ocorreram no tratamento PC, para o índice RR, com 37 % imediatamente após o preparo do solo e 63 % após as chuvas e, para o índice LD, respectivamente, 47 e 52 %, na média dos cultivos. Para o índice T, as referidas variações foram mínimas, em todos os tratamentos e nos dois cultivos e praticamente sem variação entre os valores.

O índice RR ao acaso diminuiu com o aumento do volume das chuvas (Figura 1), com um comportamento semelhante ao dos dados obtidos por Cogo (1981), Paz González & Taboada Castro (1996), Eltz & Norton (1997) e Vidal Vázquez (2002). Na figura 1, a e c, observa-se o elevado grau de ajuste entre as variáveis, com exceção dos tratamentos SD (Figura 1a) e CM (Figura 1c). Nos tratamentos SC, PC e CM, durante o cultivo do milho (Figura 1a), e no SC, durante o cultivo da aveia (Figura 1c), o índice RR ao acaso diminuiu com maior intensidade por ocasião das primeiras chuvas e, nas chuvas finais ocorridas no período experimental, essa diminuição foi menos expressiva, concordando com o que observara Cogo (1981). Este comportamento indica que a rugosidade ao acaso do solo é mais importante no período inicial do ciclo das culturas do que no final, para armazenagem de água e de sedimentos na superfície do solo. Os tratamentos PC e CM, durante o ciclo da aveia (Figura 1c), apresentaram comportamento distinto dos demais, quanto à redução do índice RR, ou seja, tendência de aumento no período

inicial de avaliação, decaindo posteriormente. Isto pode ser explicado pelo pronunciado sulcamento do solo ocorrido no início do ciclo da cultura, em decorrência das chuvas. Neste caso, o modelo utilizado para calcular o índice RR não teve suficiente sensibilidade para eliminar completamente o efeito dos sulcos no valor do índice. No caso da SD, em ambos os cultivos, o comportamento do RR foi praticamente igual, com mínima modificação de valores do índice ao longo do período experimental, de acordo com dados também obtidos por Cogo (1981).

Relacionando os dados de índice RR dos sistemas de manejo com preparo do solo (SC, PC e CM), conjuntamente com os dados de volume de chuva, em ambos os cultivos (Figura 1, b e d), verificaram-se valores de  $R^2$  ainda relativamente altos, especialmente no cultivo do milho (Figura 1b), indicando um bom ajuste do modelo às variáveis. Assim, é possível prever o comportamento da rugosidade superficial ao acaso do solo submetido à chuva natural, por modelo de regressão linear de segunda ordem, respeitado o grau de confiabilidade determinado pelo coeficiente de determinação. O decaimento da curva, na figura 1b, indica que a rugosidade superficial ao acaso tendeu a estabilizar a partir de 200 mm de chuva, ou seja, praticamente ao final do período de avaliação. Isto indica uma satisfatória persistência da rugosidade superficial, neste tipo de solo, diante da ação das chuvas naturais. Ao efetuar-se a relação do índice de rugosidade com o volume de chuva, juntando-se os valores dos dois cultivos, no caso dos sistemas de manejo que envolveram preparo do solo (SC, PC e CM – Figura 1e) e do sistema de manejo sem preparo do solo (SD – Figura 1f), o valor de  $R^2$  diminuiu expressivamente, especialmente na SD, quando comparada com as demais relações efetuadas, como era esperado. Isto foi determinado fundamentalmente pela grande diferença de valores de índices de rugosidade do cultivo do milho e do trigo (neste último cultivo, a rugosidade superficial foi expressivamente maior, determinada pela influência dos resíduos de milho mantidos na superfície do solo, remanescentes do cultivo anterior), neste tratamento.

A tortuosidade ao acaso da superfície do solo diminuiu com o aumento do volume de chuvas (Figura 2), concordando com dados obtidos por Vidal Vázquez (2002). A maior diminuição ocorreu no tratamento SC, em ambos os cultivos, seguido do PC, no cultivo do milho. Nestes tratamentos, nos quais o solo estava descoberto, houve maior rebaixamento das microelevações da superfície do solo pelo efeito das chuvas, cujos sedimentos depositaram-se nas microdepressões do relevo. Este fato propiciou a diminuição da relação entre a linha que descrevia o perfil da superfície da parcela experimental, de um extremo a outro, e a linha reta que separava os dois pontos extremos da referida parcela. Na SD, foi pequena a tortuosidade da superfície, no cultivo do milho (Figura 2a), o que é normal para este sistema de manejo do solo, já que o resíduo vegetal presente



**Figura 1. Regressão linear de segunda ordem entre rugosidade ao acaso (RR) e volume de chuva durante os cultivos de milho (a, b) e aveia (c, d), e incluindo os dois cultivos (e, f), no solo sem cultivo (SC), preparo convencional (PC), cultivo mínimo (CM) e semeadura direta (SD).**

na superfície do solo remanescente do cultivo anterior era de soja. No cultivo da aveia (Figura 2c), neste mesmo sistema de manejo do solo, por outro lado, a tortuosidade foi grande, ocasionada principalmente pelo resíduo vegetal de milho do cultivo anterior presente na superfície do solo. Em ambos os cultivos, a tortuosidade superficial ao acaso, na SD, foi pouco modificada pelo volume de chuvas, já que essa modificação foi ocasionada, em grande parte, pela pequena movimentação dos resíduos vegetais de um ponto a outro na superfície do solo, pelo efeito da enxurrada e, em parte, pelo parcial rebaixamento da camada de resíduos vegetais, ocasionado pela sua

decomposição e pela pressão da chuva sobre os mesmos, ao longo do tempo.

É necessário destacar a importância da tortuosidade ao acaso da superfície do solo, como variável independente, a qual, juntamente com outras, determina o comportamento da enxurrada, principalmente sua velocidade e, conseqüentemente, a capacidade de desagregação e transporte de sedimentos pela erosão hídrica. Assim, sistemas de manejo do solo que criam maior tortuosidade ao acaso na superfície e, ainda, que condicionam a persistência da tortuosidade no tempo, propiciam maior resistência do solo à erosão hídrica.

Os dados da diferença de elevação limite ao acaso (índice LD) relacionaram-se com o volume de chuvas (Figura 3) de maneira semelhante à relação entre os dados da rugosidade superficial ao acaso (índice RR) e o volume de chuvas (Figura 1), diferindo na forma das curvas apenas nas figuras 3d e 1d, concordando com dados obtidos por Vidal Vázquez (2002). Este comportamento é explicado pelo fato de que o índice LD é relacionado como o índice RR, ou seja, ele significa, conceitualmente, a variabilidade espacial das alturas da superfície do solo, aspecto este não considerado, também conceitualmente, no índice RR. Desse modo, o índice LD ao acaso diminuiu com

aumento do volume de chuvas, em todos os tratamentos e em ambos os cultivos estudados, de modo semelhante ao ocorrido com o índice RR ao acaso. Assim, o aumento da energia da chuva, decorrente do aumento do seu volume precipitado acumulativamente sobre o solo, ocasionou desgaste das microelevações da superfície, cujos sedimentos desagregados acumularam-se nas microdepressões do terreno, refletindo-se na diminuição do índice LD ao acaso.

A estabilidade dos agregados do solo em água, representada pelos valores de diâmetro médio ponderado – DMP e diâmetro médio geométrico – DMG, relacionou-se inversamente com os valores de

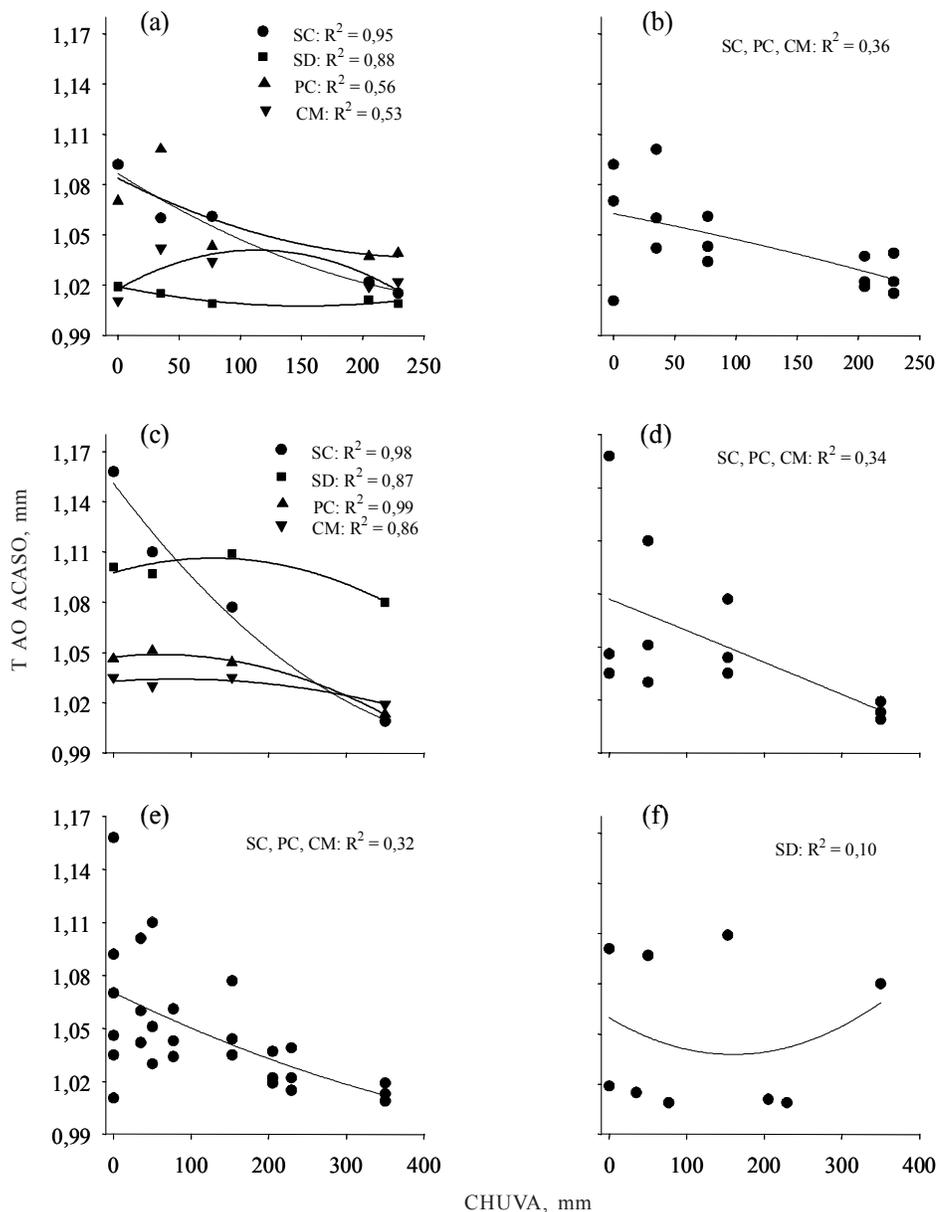


Figura 2. Regressão linear de segunda ordem entre tortuosidade ao acaso (T) e volume de chuva durante os cultivos de milho (a, b) e aveia (c, d), e incluindo os dois cultivos (e, f), no solo sem cultivo (SC), preparo convencional (PC), cultivo mínimo (CM) e semeadura direta (SD).

decaimento máximo do índice de rugosidade ao acaso do solo – RR, ocasionado pela chuva, em ambos os cultivos (Figura 4a, b, c e d). Este comportamento é explicado, na medida em que o manejo do solo é realizado por longo tempo, como ocorreu no preparo convencional (SC e PC), quando provocou a parcial quebra mecânica dos agregados estruturais, com conseqüente diminuição do teor de matéria orgânica e da resistência dos agregados à ação da água. Além disso, a ausência de preparo do solo por longo tempo, como ocorreu no sistema de semeadura direta (SD), diminuiu a rugosidade superficial e aumentou o teor de matéria orgânica

e a estabilidade dos agregados estruturais neste tratamento. Essa relação foi descrita pelo modelo de regressão linear de segunda ordem empregado, ajustado aos dados, como demonstram os valores relativamente altos dos coeficientes,  $R^2 = 0,74$  e  $0,73$ , respectivamente, para o DMP e DMG, no cultivo do milho (Figura 4a e b). No caso do cultivo da aveia, os valores de  $R^2$ , decorrentes das relações dos valores dessas duas variáveis com os de decaimento máximo da rugosidade, foram muito altos, respectivamente, de  $0,99$  e  $0,99$  (Figura 4c e d). Isto indica, neste caso, que praticamente toda a variação do decaimento da rugosidade superficial

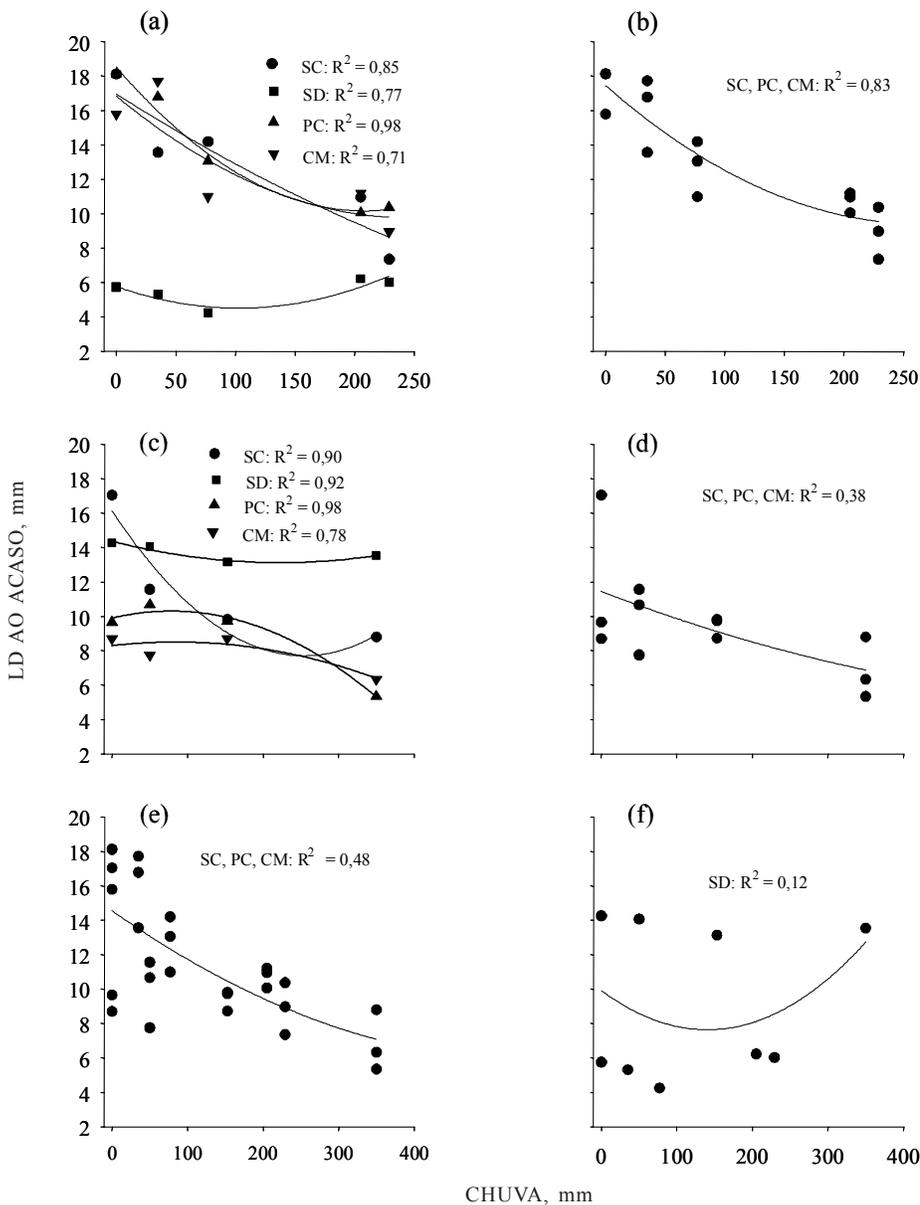


Figura 3. Regressão linear de segunda ordem entre diferença de elevação limite ao acaso (LD) e volume de chuva durante os cultivos de milho (a, b) e aveia (c, d), e incluindo os dois cultivos (e, f), no solo sem cultivo (SC), preparo convencional (PC), cultivo mínimo (CM) e semeadura direta (SD).

do solo ocasionado pela chuva é explicada tanto pela variação do DMP como do DMG dos agregados estruturais.

O baixo valor de DMP e DMG apresentado pelo tratamento SC (Figura 4) é explicado principalmente pela intensidade do preparo (arações e gradagens sucessivas e escarificações manuais para eliminar a crosta superficial e a vegetação) executado durante 15 anos duas vezes por ano e, ainda, pela completa ausência de cultivo do solo, o que ocasionou um acentuado rebaixamento do teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, da atividade biológica e da resistência dos agregados à ação da água. Apesar disso, o SC apresentou índice de rugosidade ao acaso praticamente igual ao do PC (Quadro 1), explicado pelo grande tamanho e elevada compacidade dos torrões formados no solo por ocasião do seu preparo. O preparo (nos tratamentos PC e CM) e a semeadura (no tratamento SD) eram executados quando o solo apresentava-se aproximadamente na faixa de friabilidade, em termos de umidade. Ao satisfazer esse critério nesses sistemas de manejo, a umidade do solo, no momento do preparo no tratamento SC, o qual se fazia no mesmo dia dos demais tratamentos, apresentava-se acima da faixa de friabilidade (no SC, em virtude, principalmente, da ausência de culturas, o solo retinha umidade por período de tempo mais longo do que nos demais tratamentos, com culturas). Assim, a compactação do solo era inevitável neste tratamento,

com conseqüente formação de torrões de grande tamanho e de elevada rugosidade superficial. Tais aspectos, conjuntamente com o fato de que o solo permaneceu completamente descoberto no SC, mostraram que a superfície do solo ficou sujeita à constante ação da energia cinética das chuvas e explicam a elevada taxa de decaimento da rugosidade do solo ao longo do tempo (Figura 4).

## CONCLUSÕES

1. A rugosidade superficial do solo, apresentada sem o efeito da pente e sem os efeitos simultâneos da pente e das marcas do preparo, diminuiu com o aumento do volume de chuvas naturais, nos sistemas de manejo solo sem cultivo, preparo convencional e cultivo mínimo; na semeadura direta, a rugosidade variou muito pouco com o volume de chuvas.

2. Dentre os diversos sistemas de manejo, o solo sem cultivo apresentou a maior redução do índice de rugosidade ao acaso, em decorrência da ação das chuvas naturais, enquanto a menor redução ocorreu na semeadura direta.

3. A rugosidade superficial do solo mostrou-se reduzida da condição original, na qual não se retiraram os efeitos da pente e das marcas do

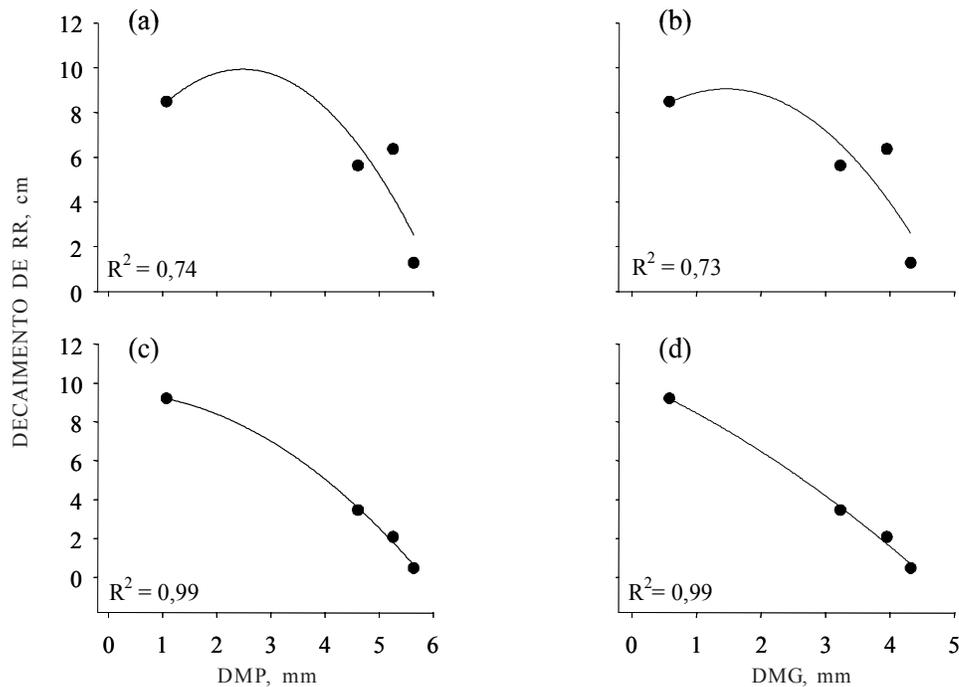


Figura 4. Regressão linear de segunda ordem entre decaimento máximo da rugosidade superficial ao acaso (RR) e diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados, durante os cultivos de milho (a, b) e aveia (c, d), no solo sem cultivo (SC), preparo convencional (PC), cultivo mínimo e semeadura direta (SD).

preparo do solo para o seu cálculo, para a condição ao acaso, na qual os efeitos da pendente e do preparo foram retirados.

4. A rugosidade superficial ao acaso do solo relacionou-se inversamente com o volume de chuvas naturais, pelo modelo de regressão linear de segunda ordem.

5. O decaimento máximo da rugosidade superficial ao acaso do solo, ocasionado por chuvas naturais, relacionou-se inversamente com o diâmetro médio ponderado e com o diâmetro médio geométrico de agregados estruturais, pelo modelo de regressão linear de segunda ordem.

### AGRADECIMENTO

Ao CNPq, pela concessão de recursos financeiros destinados às bolsas de Mestrado e de Iniciação Científica e pela realização do experimento.

### LITERATURA CITADA

- ALLMARAS, R.R.; BURWELL, R.E.; LARSON, W.E. & HOLT, R.F. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. USA, Conserv. Res. Rep., 7:1-14, 1966.
- BERTOL, I. Comprimento crítico de declive para preparos conservacionistas de solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 185p. (Tese de Doutorado)
- BERTOL, I.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. R. Bras. Ci. Solo, 21:409-418, 1997.
- BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D. VISENTIN, D. & COGO, N.P. Erosividade das chuvas e sua distribuição entre 1989 e 1998 no município de Lages (SC). R. Bras. Ci. Solo, 26:455-464, 2002a.
- BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D. & AMARAL, A.J. Erodibilidade de um Cambissolo Húmico aluminico léptico, determinada sob chuva natural entre 1989 e 1998 em Lages (SC). R. Bras. Ci. Solo, 26:465-471, 2002b.
- BOIFFIN, J. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Paris, INAPG, 1984. 320p. (Tese de Doutorado)
- COGO, N.P. Effect of residue cover, tillage-induced roughness and slope length on erosion and related parameters. West Lafayette, Purdue University, 1981, 344p. (Tese de Doutorado)
- CURRENCE, H.D. & LOVELY, W.G. The analysis of soil surface roughness. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 13:710-714, 1970.
- DEXTER, A.R. Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. J. Terramech., 14:11-22, 1977.
- ELTZ, F.L.F. & NORTON, L.D. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage and canopy cover. Soil Sci. Soc. Am. J., 61:1746-1755, 1997.
- HUGGINS, L.F. Small watershed hydrology. Classroom anotation. West Lafayette, Purdue University, 1981. 56p.
- HUANG, C. & BRADFORD, J.M. Application of a laser scanner to quantify soil microtopography. Soil Sci. Soc. Am. J., 56:14-21, 1992.
- KAMPHORST, E.C.; JETTEN, V.; GUÉRIF, J.; PITKÄNEN, J.; IVERSEN, B.V.; DOUGLAS, J.T. & PAZ, A. Predicting depression storage from soil surface roughness. Soil Sci. Soc. Am. J., 64:1749-1758, 2000.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1965. part.1. p.499-510. (Agronomy, 9)
- KUIPERS, H. A relief meter for soil cultivation studies. Neth. J. Agric. Sci., 5:255-262, 1957.
- LEHRSCHE, G.A.; WHISLER, F.D. & RÖMKENS, M.J.M. Soil surface roughness as influenced by selected soil physics properties. Soil Till. Res., 10:197-212, 1987.
- LINDEN, D.R. & van DOREN JR., D.M. Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. Soil Sci. Soc. Am. J., 50:1560-1565, 1986.
- ONSTAD, C.A. Depression storage on tilled soil surfaces. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 27:729-732, 1984.
- PAZ GONZÁLEZ, A. & TABOADA CASTRO, M.T. Medida del microrrelieve del suelo y estimación de la retención hídrica en depresiones de la superficie. En: GRANDAL D'ANGLADE, A. & PAGÉS VALCARLOS, J.L., eds. In: REUNIÓN DE GEOMORFOLOGÍA, 4., A Coruña, 1996. p.829-841.
- RÖMKENS, M.J.M. & WANG, J.Y. Effect of tillage on soil roughness. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 29:429-433, 1986.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O. & BALBINOT J'NIOR, A.A., Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. R. Bras. Ci. Solo, 24:427-436, 2000.
- SKIDMORE, E.L. Comments on chain method for measuring soil roughness. Soil Sci. Soc. Am. J., 61:1532-1533, 1997.
- VIDAL VÁZQUEZ, E. Influencia de la precipitación y el laboreo en la rugosidad del suelo y la retención de agua en microdepresiones. Coruña, Universidade de Coruña, 2002. 430p. (Tese de Doutorado)
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses. Washington, USDA. Agricultural Research Service Handbook, 1978. 537p.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. J. Am. Agron., 28:337-351, 1936.