

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
MESTRADO EM CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE  
DE UM CAMBISSOLO HÚMICO RELACIONADA AO  
TIPO DE PREPARO SOB CHUVA NATURAL

IVANA MANENTI CAPISTRANO CORREA

LAGES (SC)

2010

IVANA MANENTI CAPISTRANO CORREA

RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE  
DE UM CAMBISSOLO HÚMICO RELACIONADA AO  
TIPO DE PREPARO SOB CHUVA NATURAL

LAGES (SC)

2010

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC

CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV

DEPARTAMENTO DE SOLOS E RECURSOS NATURAIS

IVANA MANENTI CAPISTRANO CORREA

(Licenciada em Física FEJ/UDESC)

Rugosidade da superfície  
de um Cambissolo Húmico relacionada ao  
tipo de preparo sob chuva natural

Dissertação apresentada como requisito  
Parcial para obtenção do grau de Mestre  
Em Ciência do Solo  
**Orientador:** Prof. Dr. Ildegardis Bertol

LAGES (SC)

2010

**IVANA MANENTI CAPISTRANO CORREA**  
Licenciada em Física

**Rugosidade da superfície de um Cambissolo Húmico relacionada ao tipo de  
preparo sob chuva natural**

Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do grau de

**MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO**

Aprovado em:

Homologado em:

Pela banca examinadora:

Por:

---

Prof. Dr. Ildegardis Bertol  
Orientador – CAV/UDESC

---

Dr. Luciano Colpo Gatiboni  
Coordenador do Programa de Pós-  
Graduação em Ciências Agrárias,  
Coordenador Técnico do Curso de Mestrado  
em Ciência do Solo

---

Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra  
CAV/UDESC

---

Dr. Cleimon Eduardo do Amaral Dias  
Diretor Geral do Centro de Ciências  
Agroveterinárias

---

Dr. Tássio Dresch Rech

**Aos meus pais  
Daniel  
e  
Rita de Cássia  
Com amor e eterna gratidão  
OFEREÇO**

**A meu esposo Gilson e às minhas filhas Isadora e Gabriela  
pelo carinho e compreensão durante  
a execução deste trabalho  
DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus.

Ao professor Dr. Ildegardis Bertol e família, pela amizade e valiosa orientação na elaboração deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, pelos ensinamentos e experiências transmitidos.

Aos meus irmãos, que sempre me incentivaram a perseverar nos estudos e me ampararam nos momentos em que precisei.

Aos amigos e companheiros de atividades de campo, pelo apoio incansável na execução das atividades experimentais.

Aos amigos aqui encontrados pelo apoio e convivência durante o curso.

Aos Funcionários da UDESC.

Agradecimento especial:

À Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, pela oportunidade concedida de realizar esse mestrado e pelos recursos financeiros destinados à execução do projeto de pesquisa.

## **RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE UM CAMBISSOLO HÚMICO RELACIONADA AO TIPO DE PREPARO SOB CHUVA NATURAL**

Autor: Ivana Manenti Capistrano Correa

Orientador: Dr. Ildegardis Bertol

### RESUMO

A rugosidade superficial do solo é uma das características mais importantes de sua superfície, a qual, juntamente com a cobertura por resíduos vegetais, influencia a infiltração de água no solo, a armazenagem de água e de sedimentos na superfície e a erosão hídrica. Por sua vez, a rugosidade é influenciada pelo preparo do solo, pela umidade do solo no momento do preparo, pelos resíduos culturais, pelo efeito residual do uso do solo e, temporalmente pela chuva, dentre outros fatores. O trabalho teve o objetivo de estudar o efeito de tipos de preparo e da consolidação do solo e da chuva sobre a rugosidade e a tortuosidade superficial; para isso, conduziu-se um experimento sob chuva natural em um Cambissolo Húmico Alumínico léptico, com declividade média de  $0,03\text{ m m}^{-1}$ , em Lages, SC, de setembro a novembro de 2008 em campo até novembro de 2009 em laboratório. Estudaram-se os seguintes tratamentos: 1) sem preparo instalado em solo que permaneceu consolidado por três anos (LIC); 2) sem preparo instalado em solo não consolidado (LINC), no qual não se efetuou preparo imediatamente antes de instalar o tratamento; 3) preparo do solo com uma operação de arado a 0,20 m de profundidade e duas de grade a 0,15 m de profundidade em solo consolidado por três anos (PCC); 4) preparo do solo com uma operação de arado a 0,20 m de profundidade e duas de grade a 0,15 m de profundidade em solo não consolidado (PCNC), no qual não se efetuou preparo imediatamente antes de instalar o tratamento; 5) preparo do solo com uma operação de escarificador a 0,15 m de profundidade em solo consolidado por três anos (ESC); e 6) preparo do solo com uma operação de escarificador a 0,15 m de profundidade em solo não consolidado (ESNC), no qual não se efetuou preparo imediatamente antes de instalar o tratamento. No período de consolidação do solo dos tratamentos LIC, PCC e ESC não houve preparo algum, enquanto, nos tratamentos LINC, PCNC e ESNC, houve vários preparos antecedentes e nenhum preparo imediatamente antes de instalar os tratamentos. As alturas do microrelevo que permitiram o cálculo da rugosidade e tortuosidade superficial foram determinadas com rugosímetro mecânico de varetas, em seis oportunidades: imediatamente antes de instalar os tratamentos; imediatamente após o preparo do solo nos tratamentos com preparo; e após a ocorrência de cada um dos seguintes volumes de chuva: 78 mm, 82 mm, 230 mm e de 123 mm. O preparo do solo aumenta a rugosidade ao acaso da superfície do solo. O aumento é de 3,72 vezes no PCC e PCNC e de 3,88 vezes no ESC e ESNC. A consolidação do solo também influencia essa rugosidade, quando o mesmo é preparado. No caso do PCC, o aumento é de 4,58 vezes e é de 3,04 vezes no PCNC. No caso do ESC o aumento é de 5,49 vezes e é de 2,61 vezes no ESNC. A rugosidade ao acaso da superfície do solo decresce com o aumento da altura de chuva, independentemente do tipo de preparo e do grau de consolidação do solo; o modelo  $y=ae^{-bx}$  se ajusta aos dados com significância estatística ( $p < 0,01$ ). O coeficiente de determinação é de 0,67; 0,87; e 0,97, para os tratamentos LIC, PCC e ESC, respectivamente, enquanto, para os tratamentos LINC, PCNC e ESNC, tal coeficiente é respectivamente de 0,94; 0,96; e 0,98. A rugosidade linear aumenta com a rugosidade original e, esta, com a rugosidade ao acaso; o modelo  $y=a+bx$  se ajusta aos dados com significância estatística ( $p < 0,01$ ). A declividade do terreno tem maior influência (coeficiente

angular = 1,13) do que as marcas de preparo do solo (coeficiente angular = 0,67) sobre a rugosidade superficial. A tortuosidade superficial do solo apresenta as mesmas tendências da rugosidade superficial, porém, com menor magnitude de valores e menores diferenças, em termos numéricos, entre as condições em que essa variável é estudada. O menor valor é o da tortuosidade ao acaso (1,001) no tratamento LIC após a ocorrência de 512 mm de chuva e, o maior, o da tortuosidade original (1,147) no tratamento PCNC.

**PALAVRAS CHAVE:** Microrelevo superficial, compactação do solo, decaimento da rugosidade, tortuosidade superficial.

<sup>1/</sup>Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, Julho de 2010.

# INSEPTOSL SURFACE ROUGHNESS TO RELATE FOR TILLAGE TYPE UNDER NATURAL RAINFALL <sup>1</sup>

Author: Ivana Manenti Capistrano Correa

Adviser: Dr. Ildegardis Bertol

## ABSTRACT

The surface roughness of the soil is one of the most important features of its surface, which, together with the cover crop residues, influences the infiltration of ground water, water storage and sediment surface-water erosion. In turn, the roughness is influenced by tillage, the soil moisture at the time of preparation, by crop residue, the residual effect of land use and, in time for the rain, among other factors. The work aimed to study the effect of types of preparation and consolidation of soil and rain on surface roughness and tortuosity; for this, we conducted an experiment under natural rainfall in a Inceptsoil with a slope of 0.03 m m-1 in Lages, SC, from September to November 2008 in the field until November 2009 in the laboratory. We studied the following treatments: 1) without preparation installed in soil that remained bound for three years (LIC), 2) installed on unprepared ground unbound (LINC), in which no preparation is effected immediately before installing the controller; 3) tillage with a plow operation at 0.20 m depth and two grid 0.15 m deep soil nurtured by three years (ESC), 4) tillage with a plow operation at 0 , 20 m deep and two grid at 0.15 m depth in soil is not consolidated (PCNC), which was not effected preparation immediately before installing the treatment, 5) soil tillage with chiseling 0, 15 m depth in soil consolidated by three years (ESC), and 6) soil tillage with chiseling 0.15 m soil depth in unconsolidated (ESNC), in which no preparation is effected immediately before installing treatment. In the period of consolidation of soil treatments LIC, PCC and ESC there was no preparation at all, while in treatments LINC, PCNC and ESNC, there were several preparations history and no preparation immediately before installing the treatments. The heights microrelief that allowed the calculation of surface roughness and tortuosity were determined rugosimeter mechanical rods in six occasions: immediately before installing the treatments, immediately after tillage in the tillage treatments, and after the occurrence of each the following volume of rain: 78 mm, 82 mm, 230 mm and 123 mm. Soil tillage increases the random roughness of soil surface. The increase is 3.72 times the PCC and PCNC and 3.88 times the ESC and ESNC. The consolidation of the soil also influences the surface roughness, when it is prepared. In the case of PCC, the increase is 4.58 times and 3.04 times in the PCNC. In the case of ESC the increase is 5.49 times and 2.61 times is the ESNC. Random roughness of the surface soil decreases with increasing height of the rain, whatever the type of preparation and degree of consolidation of soil, the model  $y = ae^{bx}$  fits the data with statistical significance ( $p < 0.01$  ). The coefficient of determination is 0.67; 0.87, and 0.97 for treatments LIC, PCC and ESC respectively, while for treatments LINC, PCNC and ESNC, this coefficient is 0.94 respectively; 0.96 and 0.98. The roughness increases linearly with the original roughness, and

this, with random roughness, the model  $y = a + bx$  fits the data with statistical significance ( $p < 0.01$ ). The slope of the land has greater influence (slope = 1.13) than the marks of tillage (slope = 0.67) on the surface roughness. Tortuosity soil surface shows the same trends in surface roughness, but with lower magnitude values and smaller differences in numerical terms, between the conditions in which this variable is studied. The lower figure is the tortuosity randomly (1,001) in the LIC treatment after the occurrence of 512 mm of rain, and the largest, the original tortuosity (1,147) in the treatment PCNC.

**KEYWORDS:** Surface microrelief, soil compaction, roughness decay, superficial tortuosity.

<sup>1/</sup>Dissertation of master Soil Science, Center of Agroveterinary Science, Santa Catarina State University, Lages, July, 2010.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	01
<b>2 REVISÃO LITERATURA.....</b>	02
2.1 Rugosidade superficial do solo e tortuosidade superficial do solo.....	02
2.2 Influência do preparo do solo na rugosidade superficial.....	05
2.3 Influência do adensamento do solo na rugosidade superficial.....	07
2.4 Influência da chuva sobre a rugosidade superficial do solo.....	08
2.5 Influência da rugosidade superficial na erosão hídrica.....	10
2.6 Hipóteses.....	12
2.7 Objetivos.....	12
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	13
3.1 Localização, características do solo e histórico da área experimental.....	13
3.2 Tratamentos.....	15
3.3 Tomadas de alturas do microrrelevo superficial.....	16
3.4 Descrição do rugosímetro.....	17
3.5 Processamento das imagens.....	19
3.6 Procedimento para o cálculo da rugosidade e da tortuosidade da superfície do solo.....	20
3.7 Tratamento estatístico de dados.....	23
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	25
4.1 Interação estatística entre o tipo de preparo do solo e grau de compactação.....	25
4.1.1 Rugosidade superficial do solo em função do preparo mecânico e do grau de compactação.....	26

4.1.2 Rugosidade superficial do solo após o preparo mecânico e após as chuvas.....	30
4.1.3 Relações entre os índices de rugosidade superficial do solo.....	35
4.1.4 Relações da rugosidade ao acaso da superfície do solo com a altura de chuva.....	39
4.2 Índice de tortuosidade superficial do solo.....	44
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>52</b>

## LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1. Propriedades físicas e químicas do Cambissolo Húmico alumínico léptico de Lages (SC), referentes ao perfil no local do experimento (Guadagnin, 2003).....	14
TABELA 2. Volume e erosividade ( $EI_{30}$ ) das chuvas, Lages, Unidade Metereologia da UDESC .....	17
TABELA 3. Interação entre tipo de preparo do solo e grau de compactação de um Cambissolo Húmico alumínico léptico, quanto o índice de rugosidade superficial do solo (média das avaliações após o preparo e após as chuvas e de duas repetições), Lages, SC, 2008.....	26
TABELA 4. Rugosidade da superfície antes e após o preparo do solo em um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições), Lages, SC, 2008.....	27
TABELA 5. Rugosidade da superfície após o preparo do solo (APP) e após a ocorrência de chuvas naturais, em seis tratamentos, de um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições), Lages, SC, 2008.....	31
TABELA 6. Tortuosidade da superfície antes e após o preparo do solo em um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições), Lages, SC, 2008.....	45
TABELA 7. Tortuosidade da superfície do solo antes (ANP) e após (APP) o preparo do solo e após a ocorrência de chuvas naturais, em seis tratamentos, de um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições), Lages, SC, 2008.....	47

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Ilustração do rugosímetro de varetas utilizado no estudo.....	19
FIGURA 2. Relação entre a rugosidade linear e a rugosidade original da superfície de um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições).....	36
FIGURA 3. Relação entre a rugosidade ao acaso (RA) e a rugosidade linear (RL) da superfície de um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições).....	38
FIGURA 4. Relação entre a rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR) e altura de chuva (AC), média de duas repetições, em um Cambissolo Húmico alumínico léptico, em diversos tratamentos de preparo em solo consolidado. PCC: preparo convencional consolidado; ESC: cultivo mínimo consolidado; LIC: sem preparo consolidado.....	40
FIGURA 5. Relação entre a rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR) e altura de chuva (AC), média de duas repetições, em um Cambissolo Húmico alumínico léptico, em diversos tratamentos de preparo em solo não consolidado. PCNC: preparo convencional não consolidado; ESNC: cultivo mínimo não consolidado; LINC: sem preparo não consolidado.....	42

## 1. INTRODUÇÃO

A rugosidade superficial do solo é uma das condições físicas de superfície mais importante na redução da erosão hídrica. Isto se deve ao fato de que ela aumenta a retenção e a infiltração superficiais de água no solo, reduz a velocidade e o volume do escoamento superficial e aprisiona os sedimentos da erosão. Apesar de efêmera, a rugosidade da superfície do solo induzida por métodos de seu preparo é um requerimento importante nos sistemas de manejo de caráter conservacionista.

Os valores de rugosidade superficial do solo, expressos por meio de índices de rugosidade, têm sido amplamente utilizados em modelos que descrevem as relações das condições superficiais do solo com a erosão hídrica pluvial. Tais valores são diferentes em distintas operações de preparo mecânico do solo e se modificam com certa facilidade em função de ação das chuvas que ocorrem ao longo do tempo. O emprego de índices de rugosidade proporciona uma caracterização objetiva da superfície do solo, contribuindo com informações que facilitam a escolha das práticas de manejo do solo mais adequadas a cada condição de exploração agropecuária, no que se refere ao seu potencial de redução da erosão.

Diferentes quantidades de água podem ser armazenadas nas microdepressões da superfície do solo, dependendo da rugosidade superficial; superfícies mais rugosas têm maior capacidade de armazenar água temporariamente em relação a uma superfície menos rugosa. A retenção de água nas microdepressões do microrrelevo influencia na quantidade de água que infiltra no solo. Assim, uma elevada infiltração de água no solo normalmente se relaciona diretamente com um elevado valor de rugosidade superficial, que, além de elevar a infiltração,

aumenta a resistência hidráulica do escoamento superficial, reduzindo o volume e a velocidade da enxurrada.

As operações de preparo do solo exercem um papel importante no potencial de erosão das áreas cultivadas, modificando o microrrelevo. Ao submeter o solo a diferentes sistemas de manejo, a rugosidade da superfície do solo, formada pelas elevações e depressões, torna-se um importante fator, permitindo alta infiltração da água na chuva. Portanto, essa condição pode reduzir substancialmente os impactos advindos da erosão hídrica, a qual aumenta a perda de terras agricultáveis, o assoreamento de rios e barragens e o empobrecimento da população rural.

A erosão hídrica, causada pela ação do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial, é um processo de desagregação, transporte e deposição das partículas que resulta na degradação física, química e biológica do solo. É um processo resultante dos efeitos de fatores naturais e da ação humana, que, muitas vezes, é acelerado por práticas de manejo do solo inadequadas que podem promover a degradação de agroecossistemas, afetando os recursos hídricos. Uma dessas práticas relaciona-se, por exemplo, com a redução da rugosidade superficial determinada por tipos de preparo do solo. Assim, no estudo da erosão hídrica, relacionam-se os principais fatores que causam o processo erosivo com as quantidades de água e sedimentos perdidos pela erosão.

Este trabalho teve como objetivo quantificar a rugosidade ocasionada por três tipos de preparo: preparo efetuado co arado e grade, denominado convencional, preparo efetuado com escarificador, denominado cultivo mínimo, e uma condição sem preparo; tais preparos foram estudados em dois graus de compactação do solo, solo compactado e solo não compactado; a rugosidade ainda foi relacionada com a erosividade das chuvas naturais.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Rugosidade superficial do solo e tortuosidade superficial do solo

A rugosidade superficial do solo é representada pela microndulação do terreno, ou seja, pelas microdepressões e microelevações da superfície do solo, e pela sua distribuição espacial (KUIPERS, 1957; ALLMARRAS et al., 1966). Dessa forma, a rugosidade depende de fatores intrínsecos do solo, como tipo de solo e teor de água no momento do seu preparo (ALLMARRAS et al., 1967), mas, principalmente de fatores externos como o tipo de resíduo vegetal e tipo de preparo do solo. A necessidade de calcular o volume de água retida nas microdepressões da superfície do solo tem motivado estudos sobre rugosidade superficial e sua evolução temporal (LARSON, 1962; MOORE & LARSON, 1979; ZOBECK & ONSTAND, 1987; KAMPHORST et al., 2000).

Burwell et al. (1963) sugeriu que há dois tipos de rugosidade de superfície reconhecidas: a rugosidade orientada, a qual é influenciada pelas marcas de preparo; e a rugosidade ao acaso, a qual é caracterizada pela ocorrência aleatória de elevações e depressões na superfície do terreno. O primeiro tipo pode ser ilustrado como sendo a rugosidade produzida pelas marcas de preparo do solo, ou seja, caracterizada pela presença

ordenada de elevações e depressões na superfície do terreno, as quais podem estar arranjadas na direção do declive ou na transversal do mesmo. O segundo tipo de rugosidade é caracterizado pela ocorrência aleatória de elevações e depressões, não sendo possível identificar a direção do preparo por meio de análise visual. Tanto a rugosidade orientada no sentido transversal ao declive, quanto à rugosidade ao acaso reduzem as perdas de solo e água por erosão hídrica. Isto se deve ao fato de que, nestes casos, a rugosidade aumenta a retenção superficial da água da chuva, aumenta a infiltração da mesma no solo, aprisiona sedimentos, e diminui a quantidade e a velocidade do escoamento superficial.

A orientação do perfil de agulhas do rugosímetro determina em grande parte as variações nos valores de rugosidade. Tais variações são maiores quando o perfil de agulhas é posicionado na direção transversal à orientação do preparo do solo. Assim, para se obter valores reais de rugosidade superficial, numa situação de terreno sem declive, é imprescindível eliminar a influencia da orientação causada pelas marcas de preparo do solo, resultando na casualidade da rugosidade. Agindo desse modo, o valor da rugosidade é casual, e por isso, autêntica. A rugosidade orientada é superestimada, pois ela resulta da totalização das variações devidas à declividade do terreno e às marcas de preparo do solo com a rugosidade ao acaso.

O microrrelevo da superfície do solo é representado por um índice, o qual pode apresentar uma importante relação inversa com a erosão hídrica, devido à retenção de água e sedimentos nas microdepressões da superfície do solo (DEXTER, 1977). Em função disso, a quantidade de água retida nestas microdepressões é um fator empregado no planejamento de sistemas de manejo do solo visando à conservação da água e do solo, (ZOBECK & ONSTAD, 1987). Então, os processos hidrológicos de infiltração de água no solo e escoamento superficial estão inversamente relacionados entre si, e sujeitos à capacidade de retenção temporária de água na superfície do solo.

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 horizontal do perfil de uma superfície de solo rugosa e a distância entre o ponto inicial e final da referida superfície. Este índice depende da escala em que foram tomadas as medidas da rugosidade superficial (SKIDMORE, 1997). Sendo 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).

O preparo do solo aumenta a tortuosidade ao acaso em relação à ausência de preparo. Este incremento na tortuosidade, embora pareça pequeno, representa um importante aumento na dificuldade para a água escoar na superfície do solo. Além disso, representa expressivo aumento da capacidade de armazenagem superficial de água pelo solo.

## **2.2. Influência do preparo do solo na rugosidade superficial**

Em terras cultivadas, a rugosidade superficial do solo depende de vários fatores, como tipo e intensidade de preparo do solo, período de tempo transcorrido entre o preparo e a medição da rugosidade, tipo e quantidade de resíduo cultural, teor de água no solo na ocasião do preparo, tipo de solo (ALMARRAS et al., 1966; COGO, 1981; SCHICK et al., 2000; BERTOL et al., 2006), e também da declividade do terreno (ZOLDAN, Jr. et al., 2006). A rugosidade da superfície pode modificar consideravelmente, dependendo do tipo de preparo.

De acordo com Zobeck & Onstad (1987), são esperadas modificações de rugosidade ao se usar um mesmo tipo de equipamento, devido às variações de umidade do solo, velocidade e profundidade de preparo, quantidade e forma de manejo de resíduo vegetal e textura de solo. Estes autores ressaltaram que as modificações de rugosidade devidas a estes fatores podem ser maiores do que aquelas acontecidas devido à variação de tipo de preparo do solo.

O método de preparo do solo a ser adotado em certa área depende das condições de clima e solo locais, devendo ser adequado a cada situação. Ignorar e/ou desconsiderar este fato pode levar os agricultores a empregarem métodos de preparo do solo que às vezes não são apropriados para as suas condições, o que poderá acelerar a degradação de suas terras de cultivo (LARSON & GILL, 1973). No geral, o aumento no número de operações, especialmente com equipamentos de preparo secundário do solo, reduz a rugosidade e a porosidade total da camada preparada (BURWELL et al., 1963) e aumenta a desagregação e a quantidade de solo disponível ao transporte pela erosão hídrica (COGO, 1981).

O preparo do solo é a forma mais habitual de alterar a rugosidade superficial do solo, revelando, desta forma, a importância dessa operação de manejo na rugosidade e, como consequência, na alteração da capacidade de armazenagem de água e retenção de sedimentos na superfície do solo (BERTOL et al., 2004; BERTOL et al., 2006; CASTRO et al., 2006;). O solo manejado sob um sistema conservacionista como o cultivo mínimo, por exemplo, em que o preparo é efetuado por meio de escarificador com ou sem grade, proporciona uma superfície mais rugosa do que quando manejado sob sistema convencional, em que o preparo é efetuado com arado e grade de discos. Por outro lado, o preparo mecânico do solo proporciona à superfície uma maior rugosidade quando é efetuado sobre o solo compactado, comparado ao preparo efetuado sobre o solo não compactado, para qualquer tipo de preparo (SCHICK et al., 2000; BERTOL et al., 2006).

Resíduos vegetais restantes de cultivos anteriores mantidos na superfície do solo representam uma parte da rugosidade superficial, e a ondulação da superfície representa outra parte da rugosidade, na semeadura direta. A rugosidade superficial resultante dos resíduos vegetais apresenta menor capacidade de armazenar água de enxurrada na superfície do que a rugosidade resultante do preparo do solo. Ainda que a rugosidade do solo seja menos durável do que a rugosidade do resíduo, ela é composta por microdepressões e microelevações na superfície do terreno, e o mesmo não acontece com a rugosidade do resíduo.

### **2.3. Influência do adensamento do solo na rugosidade superficial**

O uso e manejo do solo têm grande influência na grandeza dos valores da densidade. Segundo Bertol et al. (2001) em solos intensamente cultivados o surgimento de camadas compactadas determina a diminuição do volume de poros ocupado pelo ar e o aumento na retenção de água, e observa-se diminuição da taxa de infiltração de água no solo, com conseqüente aumento das taxas de escoamento superficial e de erosão.

A gota de chuva é considerada uma fonte natural de adensamento, pois quando cai sobre o solo descoberto, poderá compactá-lo e desagregá-lo aos poucos. Segundo Duley (1939), o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo quebra mecanicamente os agregados, formando uma camada adensada na superfície do solo, o selamento superficial. A formação do selamento superficial deve-se a dois mecanismos: (1) fragmentação física dos agregados do solo e seu adensamento; (2) dispersão físico-química e migração das partículas

de argila para a região de 0,1 a 0,5 mm de profundidade, onde se alojam, obstruindo os poros. O primeiro mecanismo predomina e é determinado pela energia cinética das gotas. O segundo é controlado principalmente pela concentração e composição de cátions no solo e pela aplicação de água. Os dois mecanismos atuam simultaneamente e o primeiro incrementa o segundo.

O aumento da compactação resulta em elevação da densidade do solo, e, portanto redução da porosidade, especialmente os macroporos. A densidade se relaciona com a resistência mecânica dos torrões, e dependendo da umidade do solo, a densidade também se relaciona com o tamanho dos torrões. O método de preparo por sua vez, depende da compactação do solo, pois quanto maior a compactação, maior o número de operações mecânicas necessárias para preparar o solo, e como consequência mais compactado ele fica. Um maior número de torrões é encontrado na superfície em que o preparo é efetuado sobre solo compactado do que em solo não compactado (JOHNSON et al., 1979).

#### **2.4. Influência da chuva sobre a rugosidade superficial do solo**

O impacto das gotas de chuva diretamente sobre o solo faz com que a rugosidade da superfície diminua. Isto ocorre devido ao efeito da energia cinética das gotas que, ao incidir sobre o solo diretamente, parcialmente ou totalmente descoberto, dependendo do tipo de manejo, diminui as microelevações da superfície do solo (BERTOL et al., 2004). A infiltração de água é diminuída, pois os sedimentos desprendidos são depositados nas microdepressões.

A rugosidade ao acaso pode ser reduzida também pela enxurrada superficial, a qual pode aumentar a rugosidade orientada no sentido do declive devido ao sulcamento da superfície causado pela erosão (BERTOL, 1986).

Conforme Zobeck e Onstad (1987), a redução da rugosidade ocorre principalmente pela separação de sedimentos da massa do solo, principalmente nas cristas das microelevações do solo, como consequência do impacto das gotas de chuva e do cisalhamento da enxurrada, acomodando-se nas microdepressões do solo. Tomam parte na redução da rugosidade da superfície do solo, três prováveis mecanismos: a) as partículas do solo são erodidas nas cristas dos torrões e assentadas nas depressões; b) as partículas são conduzidas para dentro do solo, através dos poros, elevando a sua densidade, e; c) os agregados são quebrados pelo choque das gotas de chuva, ocasionando o transporte de materiais mais finos para os poros do solo. Provavelmente, esses mecanismos ocorrem simultaneamente, porém com intensidades diferentes (ONSTAD, 1984). Cerca de 70% redução de rugosidade ao acaso acontece durante o período anterior ao inicio da enxurrada. Isto foi constatado em solo preparado com aração + gradagem + rastel por Burwell et al. (1966). O mesmo comportamento foi observado por Burwell & Larson (1969) e Cogo et al. (1984), os quais investigaram a diminuição da rugosidade superficial do solo pela força de impacto das gotas de chuva no solo mobilizado recentemente. Estes autores verificaram que a maior redução da rugosidade ocorreu no intervalo de tempo que precedeu à enxurrada. Conclui-se, então, que a redução da rugosidade da superfície se relaciona exponencialmente com o acúmulo de energia cinética da chuva, como verificado por Bertol et al. (2005) e Zoldan Jr. et al. (2006).

Steichen (1984) observou que uma função do tipo exponencial decrescente explicava a diminuição da rugosidade ao acaso pelo efeito da chuva. Essa relação foi observada em trabalho no qual o autor examinava a relação entre a infiltração de água no solo e a rugosidade da superfície do terreno, com e sem cobertura vegetal sob chuva simulada, em tipos de

preparo do solo com escarificação, com aração e com aração + gradagem. A maior infiltração de água ocorreu no solo preparado com escarificador, em relação aos demais tratamentos, devido à maior rugosidade superficial. Por outro lado, os tratamentos com cobertura de resíduos vegetais proporcionaram maior infiltração de água no solo do que os mesmos tratamentos sem cobertura de resíduos.

Em qualquer sistema de manejo, a elevação do índice de rugosidade superficial do solo pela ação do preparo com algum tipo de revolvimento mecânico é mais intensa do que a diminuição da rugosidade pela ação da chuva (CASTRO et al., 2006; BERTOL et al., 2006; ZOLDAN Jr. et al., 2006). Nos sistemas de manejo do solo onde não há revolvimento mecânico, a ação da chuva, mesmo de longa duração, é pouco expressiva sobre a rugosidade, em comparação a mudança da rugosidade sucedida em solo com revolvimento (CASTRO et al., 2006).

## **2.5. Influência da rugosidade superficial na erosão hídrica**

A erosão hídrica, causada pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial, abrange os processos de desagregação, transporte e deposição das partículas que resulta na degradação física, química e biológica do solo. A erosão resulta dos efeitos de fatores naturais e da interferência humana e, muitas vezes, é acelerado por sistemas de manejo do solo inadequado que podem promover a degradação de agroecossistemas.

A ocorrência de erosão hídrica do solo é influenciada pela combinação de fatores físicos e de manejo do solo, tais como: clima, tipo de solo, topografia, cobertura e manejo do solo e práticas conservacionistas de suporte. O clima interfere na intensidade, duração e volume de chuvas, influenciando na energia das gotas de chuva e as características do escoamento superficial. A chuva é o agente ativo no processo erosivo, e sua capacidade de causar erosão é chamada de erosividade (WISCHMEIER, 1959; WISCHMEIER & SMITH, 1978).

Em áreas agrícolas a erosão hídrica é influenciada pelas práticas de manejo que são aplicadas ao solo, entre outros fatores. Considera-se que a rugosidade superficial do solo é um importante componente de manejo do solo na redução da erosão hídrica, principalmente em condições de solos com baixos percentuais de cobertura vegetal (ZOLDAN Jr., 2006).

Modelos matemáticos, como a Equação Universal de Perdas de Solo – EUPS (WISCHMEIR & SMITH, 1978) e a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada – EUPSR (RENARD et al., 1997) que visam a predição da erosão hídrica, com aplicações em diferentes áreas do conhecimento, utilizam o índice de rugosidade superficial do solo, tendo como finalidade quantificar os principais fatores a ela relacionados. Por meio destes modelos, é possível avaliar a influência de fatores causadores do processo erosivo em diferentes condições, permitindo, com isso, estimar as perdas de solo e água e, com isso, validar as práticas que possam atenuar os impactos da erosão.

A rugosidade da superfície do solo alterada por métodos de preparo restringe as perdas de solo e água por erosão hídrica pela retenção e infiltração superficiais da água da chuva, aprisionamento dos sedimentos da erosão e diminuição do volume e velocidade do escoamento superficial (CASTRO et al., 2006). Notificam ainda os autores que, com o decorrer do tempo, devido à ação das chuvas e práticas culturais, a rugosidade superficial do

solo influenciada pelos métodos de preparo é habitualmente diminuída, reduzindo sua eficácia relativa de decréscimo da erosão hídrica.

Castro et al. (2006) verificaram retardamento no início do escoamento superficial em condições de maior microrrelevo do solo; observaram, ainda, que a rugosidade superficial do solo diminuiu as perdas de água e solo para os tratamentos com solo mobilizado, nos segmentos de chuva de curta duração, ocorridos logo após o preparo, independentemente da cobertura do solo.

## **2.6. Hipóteses**

A rugosidade da superfície do solo é influenciada pelo tipo de preparo mecânico e pelo grau de compactação do solo na camada superficial.

A rugosidade da superfície do solo diminui com o aumento da altura de chuva, de maneira distinta em diferentes tipos de preparo mecânico e de grau de compactação do solo.

## **2.7. Objetivos**

Avaliar a rugosidade ocasionada por três tipos de preparo em condições de solo compactado (mantido sem preparo por três anos) e não compactado (recém preparado).

Relação a rugosidade superficial do solo com a altura das chuvas naturais.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Localização, histórico da área experimental e características do solo**

O experimento foi conduzido em campo, sob condições de chuva natural, entre os meses de setembro e novembro de 2008, no Campus do Centro de Ciências Agroveterinárias de Lages (SC), localizado entre 27° 49' latitude Sul e 50° 20' longitude Oeste, a 937 m de altitude, na região do Planalto Sul Catarinense. Segundo a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Difusão de Tecnologia de Santa Catarina S. A (EPAGRI<sup>1</sup>), a temperatura média anual é de 21,7°C. O clima é do tipo Cfb, segundo a classificação de Köppen, correspondente a subtropical úmido, chuvoso, com verões frescos. O solo do local do experimento é um Cambissolo Húmico alumínico léptico, argiloso, horizonte A moderado e com substrato composto de siltitos e argilitos, cujas principais propriedades encontram-se na Tabela 1.

A área experimental foi cultivada durante aproximadamente 15 anos antes da instalação do experimento, com a maioria dos cultivos sob semeadura direta e alguns sob preparo do solo efetuado com uma operação de arado e duas de grade. Nos últimos três anos, entre março de 2005 e fevereiro de 2008, antes da instalação do experimento, a área foi mantida sem cultivo, em pousio. Com isso, ocorreu compactação do solo. Em março de 2008, foi efetuada a primeira capina manual com enxada, a qual foi repetida por mais três vezes, espaçadas 45 dias uma das outras, totalizando 135 dias entre a primeira e última capina, nos

---

<sup>1</sup>CNEC, Diagnóstico da utilização dos recursos hídricos. Porto Alegre: DNA EE/CNEC, 1993.

locais onde mais tarde foram instalados os tratamentos em solo compactado. Nos locais onde mais tarde foram instalados os tratamentos em solo não compactado, foi efetuado o preparo do solo três vezes, nas mesmas datas em que se efetuaram as capinas recém referidas. Em cada preparo fez-se uma operação de arado a profundidade de 0,20 m e duas de grade a profundidade de 0,15 m. Utilizou-se o arado com três discos, os quais tinham diâmetro de 64 cm cada um e a grade destorroadora com 24 discos, os quais tinham diâmetro de 44 cm cada um. A área toda foi mantida sem cultivo e descoberta durante este período e, também, posteriormente durante a fase experimental.

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas do Cambissolo Húmico alumínico léptico, referentes ao perfil do solo no local do experimento (Guadagnin, 2003)

Horizonte	Ap	A2	B/A	B	B/C	C
Profundidade (cm)	0-20	20-34	34-53	53-75/82	75/82-105	105 +
Propriedades Físicas						
Argila (g 100g <sup>-1</sup> )	40	40	42	46	52	32
Silte (g 100g <sup>-1</sup> )	42	40	41	40	35	65
A. fina (g 100g <sup>-1</sup> )	11	10	10	9	8	2
A. Grossa (g 100g <sup>-1</sup> )	7	10	7	5	5	1
Dens. Part. (g cm <sup>-3</sup> )	2,54	2,56	2,61	2,61	2,70	2,38
Dens. Solo (g cm <sup>-3</sup> )	1,30	1,35	1,33	1,28	1,27	1,19
Micropor.(cm cm <sup>-3</sup> )	0,38	0,42	0,40	0,42	0,48	-
Macropor.(cm cm <sup>-3</sup> )	0,09	0,06	0,06	0,04	0,03	-
T.C.I. (mm h <sup>-1</sup> )	6	-	-	-	-	-
Propriedades químicas						
C. orgânico (g kg <sup>-1</sup> )	40	20	20	10	10	-
N mineral (mg kg <sup>-1</sup> )	5,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
P extraível (mg kg <sup>-1</sup> )	2,6	3,1	0,6	0,4	0,7	0,3
K trocável (mg kg <sup>-1</sup> )	96	80	49	61	42	57
Ca troc. (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	2,63	3,05	0,68	0,45	0,72	0,29
Mg troc. (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	2,17	2,33	0,78	0,68	0,70	0,31
Al troc. (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	2,27	3,47	5,89	6,52	3,96	4,68
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	5,7	5,2	4,9	4,5	4,1	4,0

T.C.I.: Taxa Constante de Infiltração de água; (-): não determinada

### **3.2. Tratamentos**

Os tratamentos, com distribuição totalmente ao acaso, em duas repetições, foram instalados em início de setembro de 2008, ou seja, cinco meses após a última capina manual e a última operação de preparo do solo com arado e grade recém referida, como a seguir descritos.

Tratamento 1 – superfície lisa em solo compactado, no qual não se efetuou preparo algum, apenas um alisamento com enxada imediatamente antes de instalar o tratamento; este tratamento foi instalado sobre a porção da área que havia sido apenas capinada cinco meses antes (LIC).

Tratamento 2 – superfície lisa em solo não compactado, no qual se efetuou uma operação com arado a 0,20 m de profundidade e duas com grade a 0,15 m de profundidade e se destorrou e alisou a superfície do solo manualmente com rastelo imediatamente antes de instalar o tratamento; este tratamento foi instalado sobre a porção da área que havia sido preparada com operações de arado e grade cinco meses antes (LINC).

Tratamento 3 – superfície rugosa em solo compactado, no qual se efetuou o preparo do solo com uma operação de arado a 0,20 m de profundidade e duas de grade a 0,15 m de profundidade, imediatamente antes de instalar o tratamento; este tratamento foi instalado sobre a porção da área que havia sido apenas capinada cinco meses antes (PCC).

Tratamento 4 - superfície rugosa em solo não compactado, no qual se efetuou preparo do solo com uma operação de arado a 0,20 m de profundidade e duas de grade a 0,15 m de profundidade, imediatamente antes de instalar o tratamento; este tratamento foi instalado sobre a porção da área que havia sido preparada com operações de arado e grade cinco meses antes (PCNC).

Tratamento 5 – superfície rugosa em solo compactado, no qual se efetuou o preparo do solo com uma operação de escarificador a 0,15 m de profundidade, imediatamente antes de instalar o tratamento; este tratamento foi instalado sobre a porção da área que havia sido apenas capinada cinco meses antes (ESC).

Tratamento 6 – superfície rugosa em solo não compactado, no qual se efetuou o preparo do solo com uma operação de escarificador a 0,15 m de profundidade, imediatamente antes de instalar o tratamento; este tratamento foi instalado sobre a porção da área que havia sido preparada com operações de arado e grade cinco meses antes (ESNC).

### **3.3. Tomada de alturas do microrrelevo superficial**

A rugosidade superficial do solo foi primeiramente avaliada imediatamente antes do preparo do solo e, em seguida, imediatamente após o preparo fez-se a segunda avaliação. A terceira avaliação ocorreu aos treze dias posteriormente a segunda avaliação após a ocorrência de 78 mm de chuva natural. A quarta avaliação foi efetuada 22 dias depois da terceira avaliação, após a ocorrência de um volume de chuva natural de 82 mm a partir do teste anterior. Decorridos 22 dias após a quarta avaliação, foi efetuada a quinta avaliação, com um volume de chuva natural de 230 mm ocorridos após o teste anterior. A sexta e última avaliação ocorreu 28 dias após a quinta avaliação, com a incidência de 123 mm de chuva natural sobre as parcelas. Portanto, ao longo do período de avaliação da rugosidade após a instalação dos tratamentos, ocorreu um volume de chuva acumulado de 512 mm (Tabela 2). Utilizou-se o rugosímetro mecânico, de varetas (Figura 1), para a obtenção da rugosidade superficial do solo. O registro das alturas do microrrelevo foi realizado mediante a tomada de fotografias em

20 diferentes posições em cada parcela, totalizando 400 pontos de altura da superfície do solo em cada parcela.

Tabela 2. Volume e erosividade ( $EI_{30}$ ) das chuvas, Lages, Unidade Metereologia da UDESC

Período	Chuvas erosivas	Volume de chuva por intervalo de tempo	Volume de chuva acumulado	Erosividade das chuvas por intervalo
	nº	..... mm .....		(MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )
06/09/08 a 15/09/08	3	78	78	136
16/09/08 a 07/10/08	1	82	160	190
08/10/08 a 30/10/08	8	230	390	630
31/10/08 a 26/11/08	5	122	512	265
Total	19	512	512	1221

### 3.4. Descrição do rugosímetro

O rugosímetro de varetas (figura 1) é utilizado com maior freqüência, dentre os diversos tipos de rugosímetro, para medir o microrrelevo superficial do solo. Esse equipamento consiste de uma estrutura quadrada ou retangular sobre a qual é apoiado um conjunto de varetas alinhadas que podem ser movimentadas horizontalmente e verticalmente com o objetivo de permitir a leitura de vários conjuntos de medidas do microrrelevo superficial. Para efetuar as leituras do micro-relevo superficial, utilizou-se um o rugosímetro contendo 20 varetas de alumínio, com 600 mm de comprimento e 8 mm de diâmetro cada uma, distanciada 30 mm uma das outras e distribuídas ao longo de uma linha no suporte do rugosímetro. Este rugosímetro é composto de uma placa formando um plano de fundo, no

qual, na extremidade inferior, formando um ângulo de 90°, encontra-se uma barra perfurada onde estão dispostas as varetas (Figura 1). No centro desta barra, outra barra com 1,80m de comprimento está fixada perpendicularmente, em cuja extremidade livre se localiza uma câmera fotográfica com a qual é obtida a imagem do conjunto de varetas, registrando a rugosidade do solo. A câmera permanece unida ao rugosímetro, mantendo-se constante sua distância de 1,80m em relação ao conjunto de varetas no rugosímetro. Isto possibilitou a tomada de uma fotografia do conjunto de varetas que refletia as alturas da superfície do solo localizadas transversalmente ao declive da parcela. Movendo-se o conjunto de varetas sobre o suporte do rugosímetro, em 20 posições na direção da pendente da parcela, em distâncias de 30 mm uma das outras, tomaram-se 20 fotografias em cada parcela. A digitalização das fotografias permitiu a leitura de 400 pontos de altura da superfície do solo na área de amostragem da parcela. Suportes metálicos são utilizados para nivelar as barras suspensas sobre eles, a fim de se adquirir um plano de referência horizontal sobre o qual se encontra o rugosímetro.

Em cada posição horizontal, as varetas são abaixadas até suas extremidades inferiores encostarem-se à superfície do solo e, com isso, indicar seu microrrelevo nas suas extremidades superiores, por meio das diferenças de alturas verificadas nas varetas em relação a uma linha horizontal de referência. No decorrer da movimentação vertical, cada posição do perfil deve ser numerada para posterior identificação, de modo que o perfil fique registrado.



Figura 1. Ilustração do rugosímetro de varetas utilizado no estudo.

### 3.5. Processamento das imagens

Obtidas as imagens (fotos), as mesmas foram tratadas mediante análise propostas por (LADO LIÑARES, 1998). Os valores de altura do microrrelevo dos diferentes pontos foram obtidos mediante o uso do programa “Profile Meter Program” propostos por Wagner & Yiming Yu (1991) e Wagner (1992). Este programa foi desenvolvido para obtenção de dados de análise de imagem que detectam as alturas das varetas em fotografias com formato digital, reduzindo, desta forma, o erro do operador no processo de digitalização manual.

Para a obtenção dos valores de altura do microrrelevo dos pontos amostrados, as 20 fotos pertencentes a uma mesma série de medidas foram ligadas, criando uma superfície

ortogonal de 400 pontos. Então, para cada ponto, obteve-se uma coordenada (XY) em função de sua distância, em ambos os eixos. Estimadas as cotas individuais de cada superfície, armazenaram-se estes dados em arquivo e, a partir destes, obtiveram-se os índices de rugosidade.

### **3.6. Procedimento para o cálculo da rugosidade e da tortuosidade da superfície do solo**

O índice de rugosidade foi calculado como sendo o desvio padrão das alturas e utilizando os dados de altura da superfície do terreno sem transformação e sem eliminar os seus valores extremos, pelo método proposto por Kamphorst et al. (2000).

Com o uso de um programa computacional desenvolvido para a aquisição de dados de rugosidade com a utilização de técnicas de análise de imagens digitalizadas, proposto por Miranda (2000), estimaram-se os índices de rugosidade e de tortuosidade, para caracterização da rugosidade superficial do solo. O índice de rugosidade foi calculado como sendo o desvio padrão das 400 leituras das alturas das varetas que representavam o microrrelevo, sem transformação logarítmica e sem eliminar os valores extremos (10% superiores e 10% inferiores), conforme método proposto por Kamphorst et al. (2000).

Os índices de rugosidade e tortuosidade foram calculados considerando-se as seguintes condições:

a) original: mantendo a influência da declividade do terreno e da tendência das marcas de preparo do solo, ou seja, rugosidade original e tortuosidade original;

- b) linear: sem a influência da declividade do terreno, mas mantendo a influência ocasionada pela tendência das marcas do preparo do solo, ou seja, rugosidade linear e tortuosidade linear;
- e
- c) ao acaso: sem a influência da declividade do terreno e da tendência das marcas do preparo do solo, ou seja, rugosidade ao acaso e tortuosidade ao acaso.

A casualidade na distribuição das microdepressões e microelevações do terreno é uma característica da rugosidade superficial do solo. Sendo assim, é necessário eliminar as componentes de orientação, devidas à declividade do terreno e tendências das marcas de preparo do solo. Para remover apenas a tendência devida à declividade do terreno, efetuou-se um ajuste da superfície linear por mínimos quadrados dos valores originais, de acordo com o método proposto por Miranda (2000). Para retirar ao mesmo tempo as componentes relacionadas à tendência de declividade do terreno e tendência das marcas de preparo do solo, efetuaram-se correções dos dados na fila e na coluna de cada conjunto de 400 pontos, conforme o método proposto por Currence e Lovely (1970).

O índice de tortuosidade foi estimado a partir da metodologia proposta por Boiffin (1984). Os valores para este índice, obtidos por este método, são adimensionais e assumem valores maiores ou iguais à unidade. São definidos como sendo a razão entre o comprimento de um perfil horizontal, considerando-se o microrrelevo superficial, e o comprimento em linha reta desse perfil. A equação proposta para estimar a tortuosidade, é demonstrada como sendo:

$$T = \frac{L_1}{L_0}$$

Onde:

$L_1$  = comprimento do perfil superficial, considerando-se as características do microrrelevo, mm; e

$L_0$  = comprimento do perfil superficial em linha reta, mm.

Para este modelo matemático, o valor adimensional da tortuosidade será sempre maior ou igual à unidade; assim, quanto maior a rugosidade superficial do solo, maior será o valor de  $L_1$  e, conseqüentemente, maior será o valor do índice de T. Saleh (1993) propôs um modelo matemático alternativo para o índice de tortuosidade, onde, seu valor pode ser igual ou superior a zero, sendo representado pela seguinte expressão:

$$T = \frac{L_1 - L_0}{L_0}$$

Em que:

$L_1$  = comprimento do perfil superficial, considerando-se as características do microrrelevo, mm; e

$L_0$  = comprimento do perfil superficial em linha reta, mm.

O principal inconveniente do índice de tortuosidade (T), para a descrição do microrrelevo do solo, é que o seu valor depende do tamanho dos agregados e torrões e, ao mesmo tempo, da escala de medida Skidmore, (1997). Assim, a distância entre dois pontos do perfil horizontal é medida utilizando uma escala grande, com rugosímetro que mede desnível superficial em intervalo pequeno, aumenta o valor de  $L_1$  e, conseqüentemente, o valor de T; com isso, dois perfis horizontais com rugosidades diferentes que se medem a diferentes escalas, podem ter o mesmo valor de T. Por isso, os valores de tortuosidade obtidos a partir de medidas com diferentes espaçamentos não podem ser comparados.

### 3.7. Tratamento estatístico de dados

Para avaliar a rugosidade superficial do solo, os seis tratamentos, com duas repetições, foram dispostos em esquema de parcelas com delineamento inteiramente casualizado. Para avaliar o efeito dos tratamentos e obter uma estimativa da variância residual, foi feita análise de variância dos dados, com a posterior aplicação do teste de Tukey, a 5% de probabilidade, para a comparação de médias. A análise estatística foi feita utilizando-se o programa computacional Assistat.

Os valores referentes ao índice de rugosidade linear foram relacionados aos valores de rugosidade original; e os valores de rugosidade ao acaso foram relacionados aos valores de rugosidade linear; em ambos os casos utilizou-se o modelo de regressão linear simples.

Com o objetivo de estudar as relações existentes entre o índice de rugosidade ao acaso e o volume de chuva acumulado, foi utilizado o seguinte modelo de regressão exponencial:

$$Y = ae^{-bx}$$

Onde:

y = índice de rugosidade ao acaso, mm;

a = coeficiente de regressão não linear;

b = coeficiente de regressão não linear,  $mm^{-1}$ ; e

x = volume de chuvas, mm.

Este modelo é recomendado para relacionar o decaimento da rugosidade superficial do solo em função do volume acumulado de chuvas, pois, em geral, a rugosidade diminui com maior intensidade no início de ocorrência das chuvas, conforme resultados de Levien et. al. (2001); Vidal Vázquez (2002) e Zoldan Junior et al. (2008).

Para efetuar as regressões lineares e não lineares, foi utilizado o programa Sigma-Plot, versão 11.0.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Interação estatística entre o tipo de preparo do solo e grau de compactação

Comparando os tratamentos de preparo do solo no mesmo nível de compactação, observa-se: no solo compactado, a rugosidade foi maior no tratamento com uma operação de escarificador (ES) do que naquele com uma operação de arado e duas de grade (PC) e, neste, maior do que no tratamento com superfície de solo lisa (LI); no solo não compactado, por outro lado, estatisticamente a rugosidade foi igual entre os tratamentos ES e PC e, nestes, maiores do que no LI. Comparando os níveis de compactação no mesmo tratamento, observa-se: para os tratamentos ES e PC, a compactação ocasionou maior rugosidade do que na condição sem compactação enquanto, para o tratamento LI, o nível de compactação não teve efeito algum sobre a rugosidade. Isto demonstra que, no solo compactado, a intensidade de revolvimento do solo influencia o índice de rugosidade. Nessa condição, a rugosidade no tratamento ES foi 10 % maior do que no tratamento PC. Assim, a menor intensidade de revolvimento corrido no tratamento ES propiciou maior rugosidade do que no tratamento PC no qual o preparo do solo foi mais intenso. No solo não compactado, por outro lado, a intensidade de preparo do solo, no caso, comparando os tratamentos ES e PC, não influenciou a rugosidade, embora, numericamente, a mesma tenha tido tendência de ser maior no tratamento PC do que no ES. Além disso, os dados da tabela 3 demonstram que a compactação propicia condições para aumentar a rugosidade superficial do solo em relação à condição de solo não compactado,

sempre que o mesmo for submetido a algum tipo de preparo mecânico. Este efeito foi de 48 % no tratamento ES e de 25 % no tratamento PC.

Tabela 3. Interação entre tipo de preparo do solo e grau de compactação de um Cambissolo Húmico alumínico léptico, quanto o índice de rugosidade superficial do solo (média das avaliações após o preparo e após as chuvas e de duas repetições), Lages, SC, 2008

Tratamento	Grau de compactação	
	mm	
	Compactado	Não compactado
ES	9,841 aA	6,668 aB
PC	8,958 bA	7,164 aB
LI	1,867 cA	2,445 bA

ES: preparo do solo com uma operação de escarificador; PC: preparo do solo com uma operação de arado e duas de grade; LI: superfície lisa

DMS para colunas = 0,828 (Classific.c/letras minúsculas)

DMS para linhas = 0,688 (Classific.c/letras maiúsculas)

#### 4.1.1. Rugosidade superficial do solo em função do preparo mecânico e do grau de compactação

As operações de preparo do solo aumentaram significativamente o valor da rugosidade original, linear e ao acaso em comparação com o momento anterior ao preparo (Tabela 4), como constatado por Castro et al. (2006), Bertol et al. (2008), Vidal Vázquez (2002) e Zoldan Junior et al. (2008).

Tabela 4. Rugosidade da superfície antes e após o preparo do solo em um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições), Lages, SC, 2008

Preparo do solo	Rugosidade original		Rugosidade linear		Rugosidade ao acaso	
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
..... mm .....						
LIC	6,20	7,13 <sup>ns</sup>	3,29	3,29 <sup>ns</sup>	2,68	2,68 <sup>ns</sup>
LINC	6,20	6,20 <sup>ns</sup>	4,21	4,21 <sup>ns</sup>	3,43	3,43 <sup>ns</sup>
PCC	7,10	17,51 <sup>**</sup>	3,30	15,05 <sup>**</sup>	2,69	12,32 <sup>**</sup>
PCNC	6,19	13,20 <sup>**</sup>	4,17	12,69 <sup>**</sup>	3,42	10,41 <sup>**</sup>
ESC	7,12	22,56 <sup>**</sup>	3,31	20,98 <sup>**</sup>	2,68	14,72 <sup>**</sup>
ESNC	6,20	16,08 <sup>**</sup>	4,20	15,41 <sup>**</sup>	3,43	8,96 <sup>**</sup>

LIC: superfície lisa compactada; LINC: superfície lisa não compactada. PCC: arado e grade consolidado; PCNC: arado e grade não consolidado; ESC: escarificação consolidado; ESNC: escarificação não consolidado; Efeito dentro da linha, comparando antes e após a operação de preparo do solo: <sup>\*\*</sup>Significativo pelo teste F ( $P<0,01$ ); <sup>ns</sup>Não significativo pelo teste F ( $P<0,05$ ).

O preparo do solo efetuado com uma operação de escarificador e com uma de arado e duas de grade aumentou a rugosidade superficial em relação à antes do preparo (Tabela 4). Isto ocorreu tanto no solo compactado como no solo não compactado. A operação de escarificação em solo compactado (ESC) aumentou em 5,5 vezes a rugosidade ao acaso em relação à antes do preparo, enquanto, essa mesma operação em solo não compactado (ESNC), aumentou essa rugosidade em 2,6 vezes. Por outro lado, as operações com arado e grade em solo compactado (PCC) aumentaram a rugosidade ao acaso em 4,6 vezes, enquanto, em solo não compactado (PCNC), o aumento dessa rugosidade foi de 3,0 vezes. O uso destes implementos agrícolas favoreceu a criação de torrões de grande dimensão por ocasião do preparo mecânico do solo. No entanto, houve tendência do escarificador maximizar esse favorecimento, comparado ao uso do arado combinado com grade. Portanto, o cultivo mínimo efetuado com escarificador, além de mais econômico, é mais conservacionista do solo, pois, minimiza os impactos negativos do preparo do solo. Isso é importante salientar, pois, as

operações de preparo do solo devem contemplar as necessidades das plantas e as demandas conservacionistas do solo e da água, de maneira harmoniosa.

Considerando a condição após o preparo do solo, a rugosidade ao acaso foi equivalente a 82 % da rugosidade linear e, esta, a 85 % da rugosidade original no tratamento PCC (Tabela 4). No tratamento PCNC, essa equivalência foi respectivamente de 82 % e de 96 %. Para o tratamento ESC, a rugosidade ao acaso equivaleu 70 % da rugosidade linear, enquanto, esta, equivaleu 93 % da rugosidade original. No tratamento ESNC, essa equivalência foi respectivamente de 58 % e de 96 %. Constatou-se, assim, que, a diminuição do valor do índice de rugosidade foi maior quando se retirou a tendência da declividade do terreno e das marcas de preparo do solo, do que quando se retirou apenas a tendência da declividade do terreno para o cálculo do referido índice. Dados semelhantes a estes foram obtidos também por Zoldan Junior et al. (2008). Neste caso, as marcas de preparo do solo influenciaram mais a rugosidade superficial, devido à baixa declividade do terreno (3 %).

Nos tratamentos superfície lisa compactada (LIC) e não compactada (LINC) não houve aumento na rugosidade superficial do solo, pois, os mesmos não sofreram preparo algum, caracterizado pela ausência de revolvimento do solo no momento de implantação do experimento. Sendo estes valores semelhantes estatisticamente (Tabela 4).

Os índices de rugosidade linear nos tratamentos submetidos ao cultivo mínimo compactado (ESC) e não compactado (ESNC), antes das operações de preparo, tiveram valores variando de 3,31 mm e 4,20 mm (Tabela 4) enquanto para o momento posterior ao preparo, os valores foram respectivamente de 20,98 mm e 15,41 mm (Tabela 5). Portanto o preparo do solo utilizando implementos agrícolas, como escarificadores produzem superfície mais rugosa do que os implementos de discos, e que tem por objetivo aumentar a porosidade, reduzir a densidade, ao mesmo tempo rompendo as camadas superficiais encrustadas e camadas subsuperficiais adensadas. A época das operações de preparo influencia no seu

resultado, afetando a taxa de infiltração, a velocidade da enxurrada, a capacidade de armazenamento de água no solo e, por consequência a erosão. Esse microrelevo criado na superfície do solo, em função das operações de preparo do solo afeta o escoamento superficial da água, sendo responsável pelo armazenamento temporal de água nas suas microdepressões.

Os valores de rugosidade linear no preparo convencional compactado e não compactado, antes do preparo foram de 3,30 e 4,17 mm respectivamente (Tabela 4), e após o preparo do solo, foram respectivamente de 15,05 e 12,69 mm (tabela 5), tendo um aumento de 3,56 vezes em solo consolidado e 2,04 vezes em solo não consolidado. Verificou-se aqui que a operação conjunta de arado e grade promoveram uma rugosidade inferior ao preparo efetuado com escarificador, mas também importante para a manutenção da capacidade de armazenamento de água no solo.

No momento posterior ao preparo do solo, observou-se que a rugosidade linear foi maior no cultivo mínimo compactado do que no cultivo mínimo não compactado, e, neste, por sua vez, semelhante à do preparo convencional compactado, em termos numéricos.

O índice de rugosidade ao acaso determinado no momento anterior ao do preparo do solo apresentou variação de 2,68 a 3,43 mm em solo compactado e não compactado respectivamente nos três tipos de preparo (Tabela 4). Após o preparo no tratamento escarificação o valor da rugosidade ao acaso passou para 14,72 mm em solo compactado e 8,96 mm para solo não compactado (Tabela 4). O aumento na rugosidade foi de 4,49 vezes em solo compactado e de 1,61 vezes em solo compactado. No preparo convencional, após o preparo o valor da rugosidade ao acaso passou para 12,32 em solo compactado e 10,41 para solo não compactado (Tabela 4), sofrendo um aumento de 3,60 vezes e 2,03 vezes para solo compactado e não compactado, respectivamente. Assim as operações de preparo do solo aumentaram significativamente o valor da rugosidade ao acaso em comparação com o momento anterior ao preparo, sendo o tratamento escarificação onde aconteceram as maiores

magnitudes para o índice de rugosidade ao acaso, por terem formado um grande número de torrões de dimensões maiores do que no preparo convencional.

#### 4.1.2. Rugosidade superficial do solo após o preparo mecânico e após as chuvas

Os valores do índice de rugosidade original, linear e ao acaso nos momentos após o preparo e após a ocorrência das chuvas naturais, para os três tipos de preparo do solo: escarificação, preparo convencional e superfície lisa, nos dois graus de consolidação: compactado e não compactado são apresentados na tabela 5.

Após o preparo do solo, os valores de rugosidade original, foram expressivamente aumentados, chegando a 22,81 mm no tratamento escarificação compactado, sendo o maior valor, enquanto, no preparo convencional não compactado chegou a 13,20 mm, o menor valor dentre os tratamentos com preparo do solo (Tabela 5). Isto demonstra que os tratamentos apresentaram um aumento muito diferente de rugosidade entre eles, pelo diferenciado efeito do preparo e grau de compactação do solo sobre esta característica de superfície.

Tabela 5. Rugosidade da superfície após o preparo do solo (APP) e após a ocorrência de chuvas naturais, em seis tratamentos, de um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições), Lages, SC, 2008

Momento da determinação	Tratamento					
	LIC	LINC	PCC	PCNC	ESC	ESNC
mm-----						
Valores originais lidos no campo						
APP	7,13	6,20	17,51	13,20	22,81	16,08
Após 78 mm	7,00	5,77	13,54	10,68	17,81	14,80
Após 160 mm	5,82	5,96	12,76	10,24	15,65	14,09
Após 390 mm	5,59	5,63	10,14	7,55	11,26	11,13
Após 512 mm	5,55	5,11	9,52	6,88	10,27	10,67
Valores sem o efeito do declive						
APP	3,29	4,21	15,05	12,69	20,98	15,41
Após 78 mm	2,73	3,64	11,76	9,92	15,46	14,11
Após 160 mm	2,13	3,28	11,25	9,28	13,81	13,40
Após 390 mm	1,87	2,35	7,62	6,06	9,90	10,16
Após 512 mm	2,00	2,24	7,70	5,27	8,64	9,34
Valores sem o efeito do declive e das marcas de preparo, RR						
APP	2,68	3,43	12,32	10,41	14,72	8,96
Após 78 mm	2,01	2,85	9,83	7,97	11,57	7,64
Após 160 mm	1,61	2,48	9,43	7,55	10,04	7,18
Após 390 mm	1,46	1,64	8,65	5,27	6,81	4,90
Após 512 mm	1,59	1,77	6,55	4,63	6,30	4,66

LIC: superfície lisa compactado; LINC: superfície lisa não compactada; PCC: preparo convencional consolidado; PCNC: preparo convencional não consolidado; ESC: escarificação consolidado; ESNC: escarificação não consolidado.

No tratamento escarificação compactado, a ação da operação de preparo do solo criou nível de rugosidade original superior aos demais tratamentos, pois, o uso do escarificador possibilitou a formação de torrões de dimensões maiores do que aqueles gerados pela ação grade de discos pesada, proporcionando ao solo, nestas condições, maior capacidade de

armazenamento de água na sua superfície. O tratamento escarificação compactado foi o sistema de preparo no qual as chuvas causaram diminuições de maior magnitude numérica na rugosidade original. Estas diminuições podem ser associadas ao fato de que, nesse tratamento, os valores alcançados pela rugosidade original foram os mais altos por ocasião do preparo, em relação aos demais tratamentos, permitindo maior exposição dos torrões à ação da chuva.

No preparo convencional consolidado, as operações com arado e grade possibilitaram um valor um pouco menor na rugosidade em comparação ao tratamento escarificação consolidado, pois esse tipo de preparo do solo forma torrões de menor tamanho pelo efeito da grade destorroadora.

Nos tratamentos preparo convencional e escarificação não compactado, observou-se, expressiva diminuição da rugosidade original em decorrência da ação das chuvas. Pode-se considerar, com isso, que os tratamentos onde o solo estava compactado foram mais eficientes na preservação da rugosidade do solo, visto que os valores iniciais eram consideravelmente elevados, em relação aos mesmos tratamentos avaliados no solo que não era compactado.

Quando se comparam os aumentos da rugosidade causados pelas operações de preparo do solo com as reduções decorrentes da ação das chuvas, nos mesmos tratamentos, evidencia-se a importância de criação e manutenção do microrrelevo do solo, pois, mesmo após a ocorrência de um volume de chuvas de 512 mm, a maior parte da rugosidade criada, principalmente com as operações do cultivo mínimo, ainda não havia sido eliminada.

As operações de preparo do solo aumentaram a rugosidade linear em relação à antes do preparo, em todos os tratamentos onde se efetuou o preparo (Tabela 5), conforme também constatado por Vidal Vázquez (2002) e Bertol et al. (2006). Dentre os seis tratamentos avaliados, considerando-se os três tipos de preparo e dois graus de consolidação, observa-se que o tratamento escarificação compactado foi o que apresentou valores mais elevados para o índice de rugosidade linear, após o preparo do solo. Isso demonstra a importância do efeito do escarificador, em aumentar a rugosidade do solo a níveis que não podem ser reduzidos

facilmente pela ação da chuva a valores iguais ou inferiores aos existentes antes do preparo do solo.

Retirando-se o efeito da declividade do terreno para no cálculo da rugosidade, tornando-a linear, o valor da mesma foi diminuído em 60 % no tratamento escarificador compactado e em 40% no tratamento escarificador não compactado (Tabela 5). Desta forma demonstra-se a elevada influencia da declividade do terreno sobre a rugosidade superficial.

No tratamento superfície lisa compactada e não compactada, a ocorrência das chuvas naturais não influenciou significativamente este índice de rugosidade, embora tenha havido uma tendência de diminuição, principalmente no tratamento superfície lisa não compactada.

A rugosidade do solo avaliada com os dados originais (Tabela 5), após o preparo do solo, foi 46 % maior do que a rugosidade ao acaso (Tabela 5), na média dos seis tratamentos. Esta diferença entre os dois índices é menor que as encontradas por Bertol et al. (2007) e Zoldan Junior et al. (2008), os quais obtiveram, coincidentemente, valor de rugosidade original 220 % maior do que o da rugosidade ao acaso. As variações entre os valores do presente trabalho e os dos outros autores, deve-se, basicamente às baixas declividades do terreno e as reduzidas marcas das operações de preparo presentes neste trabalho, que, dessa maneira, tiveram menor influência na variação destes índices.

Ao ser retirada a tendência da declividade do terreno, observou-se que o índice de rugosidade linear (Tabela 5) foi, em média, 27 % superior ao índice de rugosidade ao acaso. Pode-se considerar que as marcas de preparo do solo aumentaram o índice de rugosidade em 27 %, enquanto a declividade do terreno contribuiu com 19 % no valor deste índice. Estes valores são considerados baixos, se comparados aos estudos realizados em locais com maior declividade e com superfície do solo sob maior efeito das práticas de preparo do solo. Neste caso, os dados evidenciam que as marcas de preparo do solo e de sulcamento por erosão tiveram maior efeito no aumento da rugosidade superficial do que o declive do terreno.

Dentre os seis tratamentos, o tratamento escarificação compactado criou os maiores valores de rugosidade ao acaso (Tabela 6), proporcionando ao solo, nestas condições, maior capacidade de armazenamento de água na sua superfície. Por outro lado o tratamento escarificação foi o tratamento no qual as chuvas causaram diminuições de maior magnitude na rugosidade ao acaso. Esta maior diminuição pode ser associada ao fato de que, nesse sistema de preparo, os valores alcançados pela rugosidade ao acaso por ocasião do preparo foram os mais altos, em relação aos demais tratamentos, pelo uso do equipamento agrícola, umidade do solo, entre outros favorecendo a desagregação do solo pela ação da chuva.

O tratamento aração e duas gradagens, em solo compactado e não compactado respectivamente, por sua vez, teve sua rugosidade superficial aumentada em 4,58 vezes e 3,04 vezes pelo preparo (no PCC passou de 2,68 mm para 12,32 mm, e no PCNC passou de 3,43 mm para 10,41 mm). O menor acréscimo na rugosidade superficial do solo pelo preparo na aração e duas gradagens deveu-se à maior fragmentação dos torrões e agregados de solo, atribuída à ação repetida da grade niveladora, a qual reduziu o índice de rugosidade ao acaso em 25 % comparado ao índice de rugosidade original.

Verifica-se, também na tabela 5, que, a partir do primeiro segmento de chuva os tratamentos PCC e PCNC, a redução da rugosidade superficial ao acaso do solo pela ação da chuva foi de média intensidade, tendendo à estabilização ao final das avaliações. Isto confirma o fato de que a redução mais acentuada na rugosidade superficial do solo, por ação exclusiva da chuva, ocorre já nos primeiros eventos da chuva, no período pré-enzurrada, conforme Burwell et al., 1966; Allmaras et al., 1967; Cogo, 1981; Cogo et al., 1983.

No tratamento superfície lisa compactado e não compactado, a ocorrência das chuvas naturais não influenciou significativamente este índice de rugosidade, embora tenha havido uma tendência de diminuição, principalmente no tratamento sem preparo não compactado.

Ao se considerar os valores médios dos índices de rugosidade ao acaso em cada tipo de preparo do solo observou-se, que em todos os momentos de determinação posterior às operações de preparo, este índice foi maior nos tratamentos sob escarificação em relação aos demais sistemas de preparo.

Avaliando o efeito das chuvas sobre a rugosidade ao acaso, verifica-se que as maiores diminuições ocorreram com a incidência das primeiras chuvas sobre as parcelas, confirmando dados de Vidal Vázquez (2002), Castro et al. (2006), Bertol et al. (2006), Bertol et al. (2007) e Zoldan Junior et al. (2008). Em geral, considerando-se as médias dos tratamentos dos três cultivos em que houve efetivamente redução da rugosidade ao acaso, observa-se que a primeira chuva diminuiu o valor do índice de rugosidade ao acaso em 25 %, 20 % e 21% para superfície lisa, preparo convencional e o escarificação em solo compactado, respectivamente. E para solo não compactado essa redução foi de 17 %, 13 % e 15 % para o tratamento superfície lisa, preparo convencional e escarificação, respectivamente.

Após 512 mm de chuvas naturais ocorridas, a rugosidade superficial ao acaso apresentou valores iguais ou até superiores àqueles encontrados anteriormente ao preparo do solo, nos tratamentos PCC, PCNC, ESC e ESNC (Tabela 6), indicando uma persistência satisfatória da rugosidade superficial neste tipo de solo, frente à ação das chuvas naturais.

#### 4.1.3. Relações entre os índices de rugosidade superficial do solo

A rugosidade original é resultante da ação conjunta do efeito da declividade do terreno e das marcas de preparo deixadas sobre o solo pelas máquinas e implementos agrícolas disposição aleatória dos torrões e agregados. Para a rugosidade linear é apenas retirado o

efeito da declividade. Sendo assim, é importante que se avalie a participação efetiva de cada uma destas componentes na rugosidade superficial do solo, bem como as relações existentes entre elas.

O alto coeficiente de determinação da equação da reta que relacionou a rugosidade ao linear com a rugosidade original indica elevado grau de dependência dessas duas formas de rugosidade (Figura 2), caracterizando bom ajuste do modelo matemático utilizado.

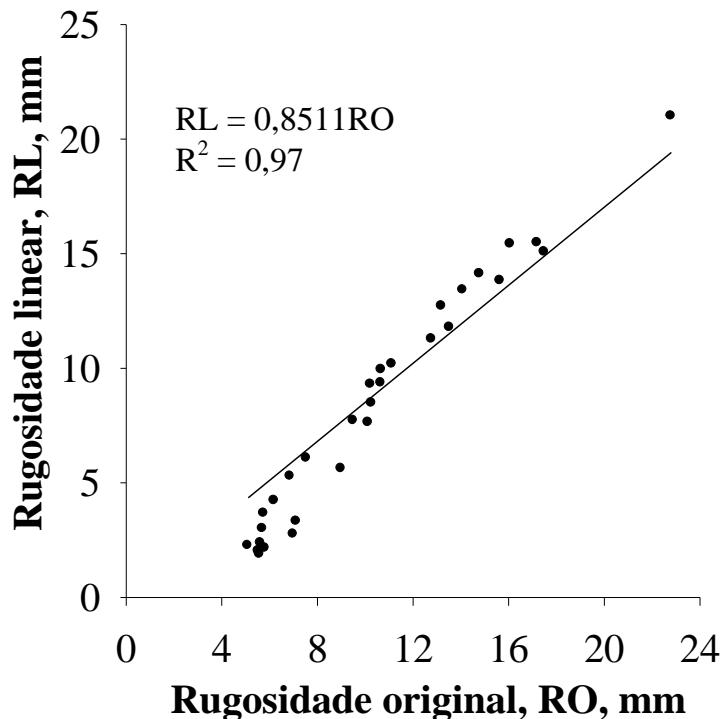


Figura 2. Relação entre a rugosidade linear (RL) e a rugosidade original (RO) da superfície de um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições).

Assim, a rugosidade superficial do solo foi menos alterada pela retirada do efeito da declividade do terreno dos dados originais de elevação da superfície do solo, para cálculo da rugosidade linear. Portanto, a rugosidade superficial do solo foi mais fortemente influenciada pelas marcas de preparo do solo do que pela declividade do terreno, o que está em concordância com Vidal Vázquez (2002) e Bertol et al. (2006). O coeficiente angular da reta

indica que, para 1 mm de aumento da rugosidade original, a rugosidade linear aumentou em 1,13 mm. Isto evidencia, a grande influência da chuva na diminuição do efeito das marcas de preparo sobre a rugosidade do solo; o impacto das gotas desfez as microelevações de sua superfície, enquanto o salpico e o escoamento superficial promoveram o deslocamento das partículas de solo desagregadas depositando-as nas depressões.

A rugosidade linear resulta da ação conjunta do efeito das marcas de preparo deixadas sobre o solo pelas máquinas e implementos agrícolas disposição aleatória dos torrões e agregados. A rugosidade ao acaso contém apenas o efeito da disposição aleatória dos torrões e agregados. Sendo assim, a avaliação da participação efetiva de cada uma destas componentes na rugosidade superficial do solo, bem como as relações existentes entre elas, é relevante para o estudo aqui apresentado.

Considerando as relações entre a rugosidade ao acaso e a rugosidade linear, com um coeficiente de determinação,  $R^2 = 0,88$  da equação da reta, que relacionou rugosidade ao acaso com rugosidade linear, indica que houve um alto grau de correlação dessas variáveis (Figura 3). O coeficiente angular da mesma equação indica que, para cada milímetro de aumento na rugosidade linear, a rugosidade ao acaso foi aumentada em 0,67 mm.

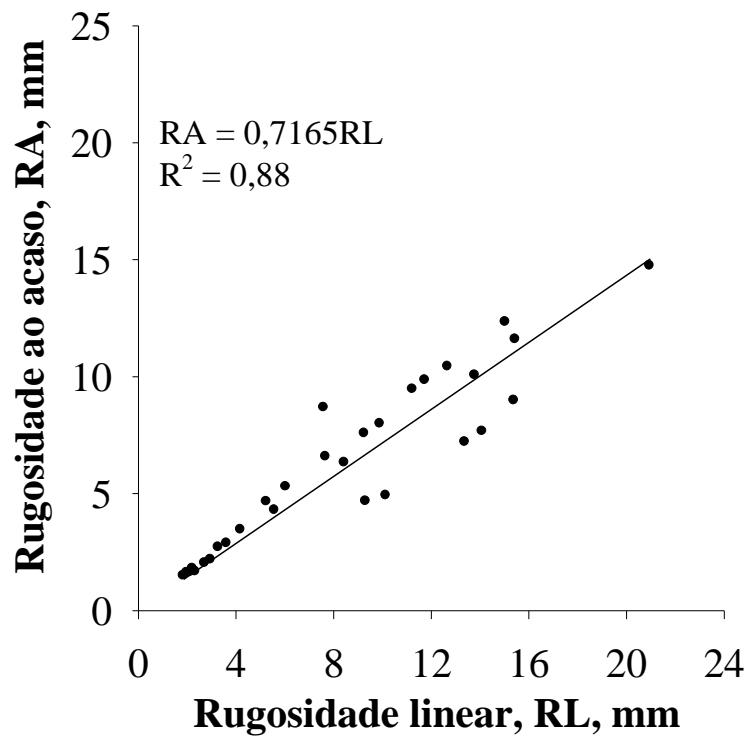


Figura 3. Relação entre a rugosidade ao acaso (RA) e a rugosidade linear (RL) da superfície de um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições)

Desta forma, pode-se afirmar que a rugosidade superficial do solo foi mais afetada pela eliminação declividade do terreno (Figura 2), do que pela eliminação conjunta dos efeitos da declividade e das marcas de preparo do solo (Figura 3) para o cálculo da rugosidade. Conclui-se então que a rugosidade superficial do solo foi mais fortemente influenciada pela declividade do terreno do que pelas marcas de preparo, nas condições do experimento, concordando com Bertol et al. (2006).

#### 4.1.4. Relações da rugosidade ao acaso da superfície do solo com a altura de chuva

A análise dos índices de rugosidade superficial ao acaso, obtidos em cada um dos momentos de determinação, após a ocorrência das chuvas naturais, permite considerar que houve influência da ação das chuvas sobre o microrrelevo da superfície do solo.

Nas figuras 4 e 5, são apresentadas as curvas de regressão exponencial que estabelecem relação entre o índice de rugosidade ao acaso e o volume acumulado das chuvas, para os tratamentos preparo convencional, escarificação e superfície lisa, em solo compactado e não compactado, respectivamente.

As curvas representadas na figura 4 demonstram que a ação das chuvas diminuiu significativamente os valores de rugosidade ao acaso nos tratamentos escarificação e preparo convencional, e com menor magnitude no sem preparo. Em cada figura, podem-se visualizar os coeficientes de determinação. O modelo exponencial ajustou-se bem aos valores de rugosidade superficial ao acaso influenciados pelo volume de chuvas, apresentando, em geral, coeficientes de determinação altos, assim como também ocorreu em estudos de Römkens & Wang (1987), Eltz & Norton (1997), Bertol et al. (2007) e Zoldan Junior et al. (2008). Após a ocorrência das chuvas, observa-se que, em geral, o valor da rugosidade superficial ao acaso diminuiu nos tratamentos citados acima.

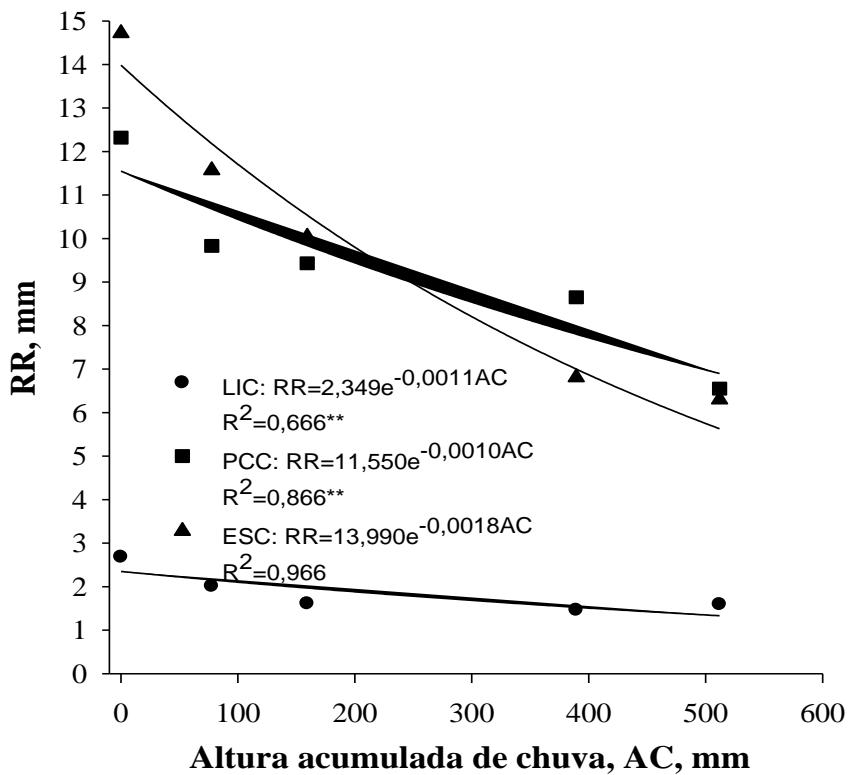


Figura 4. Relação entre a rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR) e altura de chuva (AC), média de duas repetições, em um Cambissolo Húmico alumínico léptico, em diversos tratamentos de preparo em solo compactado. LIC: superfície lisa compactada; PCC: preparo convencional compactado; ESC: escarificação compactada.

A ocorrência de 160 mm de chuva, referente a primeira e segunda avaliação, com erosividade total equivalente a 326 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (Tabela 2), ocasionou expressiva diminuição na rugosidade ao acaso, em comparação com a rugosidade ao acaso imediatamente após o preparo (Tabela 2). A ocorrência de 181 mm de chuva natural (referente à terceira e quarta avaliações), com erosividade total equivalente a 795 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (Tabela 2), na média dos tratamentos, por outro lado, ocasionou menor redução da rugosidade em comparação àquela após a ocorrência dos 160 mm iniciais de chuvas. Esse comportamento confirma que a rugosidade ao acaso da superfície do solo é mais fortemente

diminuída pelo efeito das chuvas iniciais do que pelo das chuvas finais, conforme constatado também por Cogo (1981), Cogo et al. (1984), Eltz & Norton (1997) e Bertol et al. (2006).

Ao comparar os tratamentos pregar convencional compactado e o escarificação compactado, observou-se que o efeito da chuva na redução da rugosidade ao acaso nos dois sistemas de pregar foi mais intenso do que no tratamento superfície lisa, e demonstrou que o tratamento escarificação compactado apresentou a mesma fragilidade que o pregar convencional, em relação à manutenção do microrrelevo do solo. A ação do impacto das gotas de chuva e da força cisalhante do escoamento superficial influenciou a redução da rugosidade nos tratamentos acima citados.

Após a ocorrência das chuvas naturais, observou-se que, em geral, o valor da rugosidade superficial ao acaso diminuiu em todos os tratamentos.

Avaliando os valores dos coeficientes de decaimento da rugosidade (Figura 4), nos tratamentos escarificação, pregar convencional e superfície lisa em solo compactado o modelo de regressão exponencial utilizado indicou que as chuvas influenciaram o valor do índice de rugosidade ao acaso. Verifica-se, com isso, que a rugosidade ao acaso teve uma redução maior nas chuvas iniciais do que nas finais, apesar da maior erosividade ( $630 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) ter ocorrido antes da terceira avaliação (Tabela 2).

As linhas de tendência do modelo exponencial ajustado evidenciam tendência semelhante na diminuição da rugosidade ao acaso para os três tratamentos em solo compactado. Entretanto, deve-se ressaltar que, mesmo assim, no cultivo mínimo ocorreram, após a incidência das chuvas naturais, os maiores valores de rugosidade ao acaso, em comparação com o sem pregar e pregar convencional, pois, a escarificação promoveu a formação de torrões de dimensões maiores na superfície do solo. Os valores obtidos no cultivo mínimo, para o coeficiente de decaimento da rugosidade superficial ao acaso, foram semelhantes aos obtidos por Bertol et al. (2007) e Zoldan Junior et al. (2008).

No tratamento superfície lisa compactado, observa-se que o coeficiente de decaimento foi maior do que no escarificação compactado e preparo convencional compactado. Portanto, a rugosidade ao acaso foi considerada como inalterada, neste tratamento pela ação das chuvas. Entretanto, deve-se observar que o valor da rugosidade ao acaso no momento anterior a aplicação das chuvas já era muito baixa, ocorrendo, com isso, uma redução de menor magnitude do que a ocorrida nos outros tratamentos.

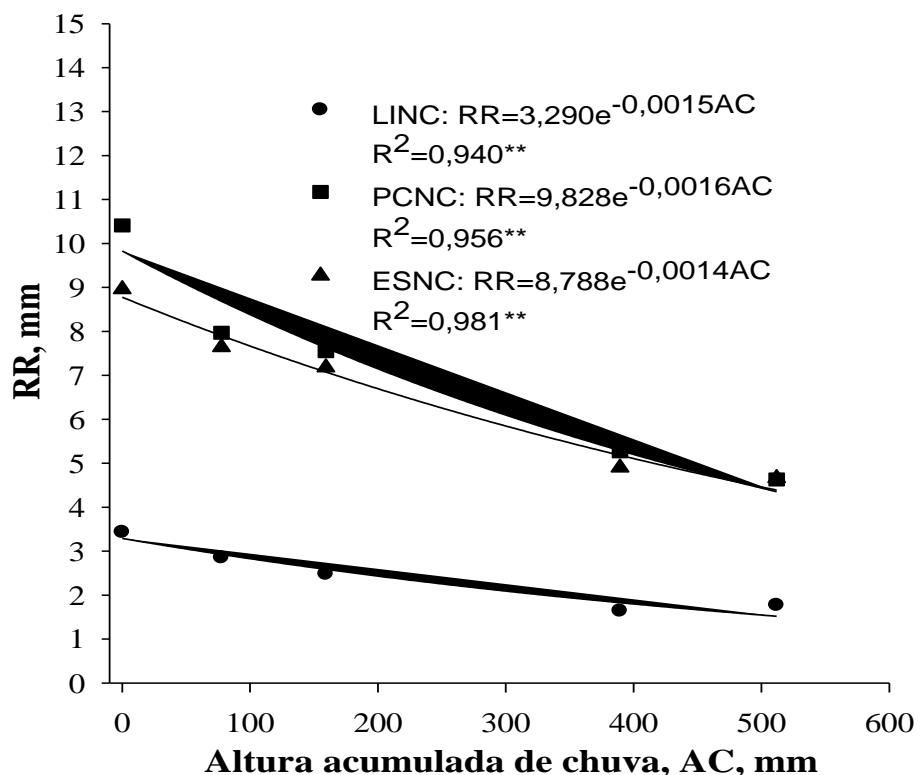


Figura 5. Relação entre a rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR) e altura de chuva (AC), média de duas repetições, em um Cambissolo Húmico alumínico léptico, em diversos tratamentos de preparo em solo não compactado. LINC: superfície lisa não compactada; PCNC: preparo convencional não compactado; ESNC: escarificação não compactada.

O comportamento da rugosidade ao acaso nos tratamentos escarificação, preparo convencional e sem preparo em solo não compactado (Figura 5), em função da aplicação das chuvas, foi semelhante ao que ocorreu nos mesmos tratamentos em solo compactado. Os coeficientes de decaimento (Figura 5), consideravelmente alto, nos tratamentos preparo convencional e escarificação em solo não compactado têm praticamente o mesmo valor

numérico, significando que a rugosidade teve decaimento de igual magnitude nestes tratamentos.

A erosividade das chuvas naturais influenciou o decaimento da rugosidade ao acaso da superfície do solo (Tabela 2). A primeira avaliação ocorrida, com altura de 78 mm de chuva acumulada, com três chuvas erosivas, equivalente a  $136 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$  de erosividade, ocasionou maior diminuição na rugosidade ao acaso da superfície do solo em comparação com outras chuvas. Isto ocorreu devido ao solo apresentar torrões de maior tamanho e depressões mais profundas. Assim ao incidir a chuva sobre os torrões, as partículas de solo que se desprenderam e foram depositadas nas depressões, rebaixando as microelevações e elevando a base das microdepressões e, por isso, diminuindo a rugosidade mais acentuadamente por ocasião da ocorrência dessa chuva. Em seguida a segunda avaliação, com uma altura de 230 mm acumulada, com uma chuva erosiva, equivalente a  $630 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$  também provocou um decaimento acentuado na rugosidade ao acaso do solo, esta apesar de apresentar maior altura e erosividade, não produziu um decaimento tão expressivo quanto na primeira avaliação, pois, o solo encontrava-se, neste momento mais adensado do que por ocasião de ocorrência da primeira avaliação. Nos tratamentos PCC, PCNC, ESC e ESNC, o coeficiente de decaimento da rugosidade superficial ao acaso do solo foi expressivamente maior do que o no LIC e LINC. Isto está relacionado com a alta rugosidade produzida pelos implementos agrícolas usados nos primeiros tratamentos citados e com a compactação do solo nos dois últimos tratamentos.

#### **4.2. Índice de tortuosidade superficial do solo**

As operações de preparo do solo aumentaram significativamente o valor da tortuosidade original, linear e ao acaso em comparação com o momento anterior ao preparo (Tabela 6).

O preparo do solo efetuado com uma operação de escarificador e com uma de arado e duas de grade aumentou a tortuosidade superficial em relação à antes do preparo (Tabela 6). Isto ocorreu tanto no solo compactado como no solo não compactado. A operação de escarificação em solo compactado (ESC) aumentou em 11,6 % a tortuosidade ao acaso em relação à antes do preparo, enquanto, essa mesma operação em solo não compactado (ESNC), aumentou essa rugosidade em 4%. Por outro lado, as operações com arado e grade em solo compactado (PCC) aumentaram a tortuosidade ao acaso em 9%, enquanto, em solo não compactado (PCNC), o aumento dessa rugosidade foi de 6,6%. O uso destes implementos agrícolas favoreceu a criação de torrões de grande dimensão por ocasião do preparo mecânico do solo. No entanto, houve tendência do escarificador maximizar esse favorecimento, comparado ao uso do arado combinado com grade. Portanto, o cultivo mínimo efetuado com escarificador, além de mais econômico, é mais conservacionista do solo, pois, minimiza os impactos negativos do preparo do solo. Isso é importante salientar, pois, as operações de preparo do solo devem contemplar as necessidades das plantas e as demandas conservacionistas do solo e da água, de maneira harmoniosa.

Considerando a condição após o preparo do solo, a rugosidade ao acaso foi equivalente a 98,6 % da tortuosidade linear e, esta, igual numericamente a tortuosidade original no tratamento PCC (Tabela 6). No tratamento PCNC, essa equivalência foi respectivamente de 98,3 % e de 99,9 %. Para o tratamento ESC, a tortuosidade ao acaso

equivaleu 97,6 % da tortuosidade linear, enquanto, esta, equivaleu 99,9 % da tortuosidade original. No tratamento ESNC, essa equivalência foi respectivamente de 98,3 % e de 100 %. Constatou-se, assim, que, a diminuição do valor do índice de tortuosidade foi maior quando se retirou a tendência da declividade do terreno e das marcas de preparo do solo, do que quando se retirou apenas a tendência da declividade do terreno para o cálculo do referido índice. Dados semelhantes a estes foram obtidos também por Zoldan Junior et al. (2008). Neste caso, as marcas de preparo do solo influenciaram mais a tortuosidade superficial, devido à baixa declividade do terreno (3 %).

Nos tratamentos superfície lisa compactada (LIC) e não compactada (LINC) não houve aumento na tortuosidade superficial do solo, pois, os mesmos não sofreram preparo algum, caracterizado pela ausência de revolvimento do solo no momento de implantação do experimento. Sendo estes valores semelhantes estatisticamente (Tabela 6).

Tabela 6. Tortuosidade da superfície antes e após o preparo do solo em um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições), Lages, SC, 2008

	TT original		TT linear		TT acaso	
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
LIC	1,003	1,003 <sup>ns</sup>	1,003	1,003 <sup>ns</sup>	1,002	1,002 <sup>ns</sup>
LINC	1,010	1,010 <sup>ns</sup>	1,009	1,009 <sup>ns</sup>	1,009	1,009 <sup>ns</sup>
PCC	1,003	1,108 <sup>**</sup>	1,003	1,108 <sup>**</sup>	1,002	1,093 <sup>**</sup>
PCNC	1,010	1,094 <sup>**</sup>	1,009	1,093 <sup>**</sup>	1,009	1,076 <sup>**</sup>
ESC	1,003	1,147 <sup>**</sup>	1,003	1,146 <sup>**</sup>	1,002	1,119 <sup>**</sup>
ESNC	1,010	1,067 <sup>**</sup>	1,009	1,067 <sup>**</sup>	1,009	1,049 <sup>**</sup>

LIC: superfície lisa compactada; LINC: superfície lisa não compactada. PCC: arado e grade consolidado; PCNC: arado e grade não consolidado; ESC: escarificação consolidado; ESNC: escarificação não consolidado; Efeito dentro da linha, comparando antes e após a operação de preparo do solo: <sup>\*\*</sup> Significativo pelo teste F ( $P<0,01$ ); <sup>ns</sup> Não significativo pelo teste F ( $P<0,05$ ).

A tortuosidade superficial, calculada com os dados originais (Tabela 6), foi 1,3 % maior do que a tortuosidade ao acaso (Tabela 6), na média dos tratamentos, o que concorda

com dados obtidos por Eltz & Norton (1997) e Bertol et al. (2006). Isto significa que, ao contrário do que ocorreu com a rugosidade, a declividade do terreno de 3 % em conjunto com as marcas do preparo do solo pouco influenciou a tortuosidade ao acaso.

A retirada do efeito da declividade do terreno no cálculo, para obtenção da tortuosidade linear (Tabela 6), manteve o seu valor 1,1 % maior do que aquele obtido com os dados ao acaso (Tabela 6); este fato indica que a declividade isoladamente praticamente não teve efeito sobre a tortuosidade da superfície do solo, contrariamente ao que ocorreu com a rugosidade. Marcas de preparo do solo, mesmo direcionadas à pendente do terreno, não aumentam a tortuosidade superficial, mas, efetivamente, diminuem a capacidade do solo para armazenar água na superfície, em relação à rugosidade ao acaso.

Em todos os tratamentos efetuados no presente trabalho (Tabela 6), constata-se que os valores de índice de tortuosidade superficial ao acaso, já eram baixos no momento anterior ao início das chuvas, em relação aos demais sistemas de preparo do solo, indicando, com isso, o estado avançado de alisamento da superfície do solo, principalmente na condição sem preparo, cujo estado se agravou com a incidência das chuvas.

O índice de tortuosidade ao acaso, submetido ao tratamento escarificação compactado teve o maior valor, após o preparo do solo, com um aumento de 12% em relação à antes do preparo. Já o índice de tortuosidade sob preparo convencional (Tabela 6), antes das chuvas, também foi baixo nos dois graus de compactação, pois, as operações de preparo ocasionaram intenso destorramento e nivelamento do solo. Estas operações promoveram, em média, um aumento de 9% na tortuosidade no preparo convencional.

Tabela 6. Tortuosidade da superfície do solo antes (ANP) e após (APP) o preparo do solo e após a ocorrência de chuvas naturais, em seis tratamentos, de um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições), Lages, SC, 2008

Momento da determinação	Tratamento					
	LIC	LINC	PCC	PCNC	ESC	ESNC
Valores originais lidos no campo						
ANP	1,003	1,006	1,003	1,010	1,003	1,010
APP	1,003	1,010	1,108	1,094	1,147	1,067
Após 78 mm	1,002	1,006	1,072	1,054	1,092	1,052
Após 160 mm	1,001	1,004	1,067	1,047	1,069	1,041
Após 390 mm	1,001	1,002	1,030	1,018	1,032	1,021
Após 512 mm	1,001	1,003	1,023	1,013	1,023	1,016
Valores sem o efeito do declive						
ANP	1,003	1,009	1,003	1,009	1,003	1,009
APP	1,003	1,009	1,102	1,093	1,146	1,067
Após 78 mm	1,002	1,006	1,068	1,054	1,092	1,052
Após 160 mm	1,001	1,004	1,076	1,047	1,069	1,042
Após 390 mm	1,001	1,002	1,030	1,017	1,031	1,021
Após 512 mm	1,001	1,003	1,023	1,023	1,023	1,017
Valores sem o efeito do declive e das marcas de preparo, RR						
ANP	1,002	1,009	1,002	1,009	1,002	1,009
APP	1,002	1,009	1,093	1,076	1,119	1,049
Após 78 mm	1,002	1,005	1,061	1,026	1,072	1,033
Após 160 mm	1,001	1,004	1,059	1,037	1,052	1,024
Após 390 mm	1,001	1,002	1,024	1,014	1,022	1,010
Após 512 mm	1,001	1,002	1,020	1,011	1,017	1,008

LIC: superfície lisa compactado; LINC: superfície lisa não compactada. PCC: preparo convencional consolidado; PCNC: preparo convencional não consolidado; ESC: escarificação consolidado; ESNC: escarificação não consolidado.

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, consequentemente, 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.

A tortuosidade ao acaso da superfície do solo diminuiu com o aumento do volume de chuvas (Tabela 6), concordando com dados obtidos por Vidal Vázquez (2002). A menor diminuição ocorreu no tratamento LI, tanto em solo consolidado como em solo não consolidado, seguido do PCC e ESC. Nos tratamentos PCNC e ESNC, 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. 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, consequentemente, 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.

Considerando-se os tratamentos ESC e ESNC, a variação na tortuosidade ao acaso após o preparo foi de 12% e 4%, respectivamente. Já nos tratamentos PCC e PCNC, o aumento da tortuosidade ao acaso foi de 9 % e 6,6 % respectivamente, em relação à rugosidade anterior ao preparo; nos tratamentos LIC e LINC, não houve variação na

tortuosidade antes da implantação do experimento e após a instalação, pois estes não sofreram nenhum revolvimento do solo (Tabela 4).

## 5. CONCLUSÕES

1. O preparo do solo com arado e grade e com escarificador aumenta a rugosidade superficial em relação à antes do preparo, tanto em solo não consolidado (recém preparado) quanto em solo consolidado (mantido em pousio por três anos). O aumento da rugosidade ao acaso é de 3,72 vezes para o preparo com arado e grade e de 3,88 vezes para o escarificador, na média do consolidado e não consolidado.
2. A consolidação do solo, condicionada pelo tempo em que o mesmo é mantido sem preparo, influencia a rugosidade superficial do solo, independentemente do tipo de preparo efetuado posteriormente. Para o caso do preparo com arado e grade, o aumento pelo preparo é de 4,58 vezes no solo consolidado e de 3,04 vezes no não consolidado, em relação à antes do preparo; enquanto, para o preparo com escarificador, no solo consolidado o aumento pelo preparo é de 5,49 vezes e de 2,61 vezes no solo não consolidado, também em relação à antes do preparo.
3. A altura de chuva influencia a rugosidade superficial do solo, independentemente do tipo de preparo e do grau de consolidação do solo, numericamente falando; tal influência independe também do efeito da declividade do terreno e das marcas de preparo do solo. No caso do solo sem cultivo, ela diminui de 4,49 mm imediatamente antes da ocorrência de chuva para 3,04 mm após a ocorrência de 512 mm de chuva, na média das condições em que ela é estudada; no solo preparado com arado e grade, o valor inicial é de 13,53 mm imediatamente após o preparo e antes da chuva e o final é de 6,76 mm após 512 mm de

chuva; enquanto, no caso do solo preparado com escarificador, o valor inicial é de 16,49 mm e o final de 8,28 mm.

4. A rugosidade ao acaso da superfície do solo decresce com o aumento da altura de chuva, independentemente do tipo de preparo e do grau de consolidação do solo; o modelo  $y = ae^{-bx}$  se ajusta aos dados com significância estatística ( $p < 0,01$ ). Para o solo consolidado, o coeficiente de determinação é de 0,67; 0,87; e 0,97, para os tratamentos sem preparo do solo, preparo com arado e grade e preparo com escarificador, respectivamente. Para o solo não consolidado, tal coeficiente para os referidos tratamentos é respectivamente de 0,94; 0,96; e 0,98.

5. A rugosidade linear aumenta com a rugosidade original e, esta, com a rugosidade ao acaso; o modelo  $y = a+bx$  se ajusta aos dados com significância estatística ( $p < 0,01$ ). Essas relações permitem afirmar que a declividade do terreno tem maior influência (coeficiente angular = 1,13) do que as marcas de preparo do solo (coeficiente angular = 0,67) sobre a rugosidade superficial.

6. A tortuosidade superficial do solo apresenta as mesmas tendências da rugosidade superficial, porém, com menor magnitude de valores e menores diferenças, em termos numéricos, entre as condições em que essa variável é estudada. O menor valor é igual a 1,001 para a tortuosidade ao acaso no solo sem preparo consolidado após a ocorrência de 512 mm de chuva e, o maior, igual a 1,147 para a tortuosidade original no solo recém preparado com arado e grade na condição não consolidado.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLMARAS, R. R.; BURWELL, R. E.; LARSON, W. E. & HOLT, R.F. **Total porosity and roughness of the interrow zone as influenced by tillage.** USDA, 22p. (Cons. Res. Report, 7), 1966.
- 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 of America Proceedings**, v. 31, p.550-556, 1967.
- BERTOL,I. **Relações da erosão hídrica com métodos de preparo do solo, na ausência e na presença de cobertura vegetal por resíduos culturais de trigo.** Porto Alegre, Universidade federal do Rio Grande do Sul, 1986. 148p. (Dissertação de Mestrado).
- BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D. & BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola.**, 58:555-560, 2001.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JR., W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:155-163, 2004.
- BERTOL, I; GUADAGNIN, J.C.; GONZÁLEZ, A. P.; AMARAL, A.J. DO; BRIGNONI, L.F. Soil tillage, water erosion, and calcium, magnesium and organic carbon losses. **Scientia Agricola**, Piracicaba-Braz, v.62, n.6, p.578-584, Nov./Dez. 2005.
- BERTOL, I.; AMARAL, A. J.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; PAZ GONZÁLEZ, A.; BARBOSA, F. T. & BRIGNONI, L. F. Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.543-553, 2006.
- BERTOL, I.; PAZ GONZÁLES, A. & VIDAL VÁZQUEZ, E. Rugosidade superficial do solo sob diferentes doses de resíduo de milho submetido à chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.103-110, 2007.
- BERTOL, I.; ZOLDAN JUNIOR JUNIOR, W.A.; FABIAN, E.L.; ZAVASCHI, E.; PEGORARO, R. & PAZ GONZÁLEZ, A. Efeito de escarificação e da erosividade de chuvas sobre algumas variáveis de valores de erosão hídrica em sistemas de manejo de

- um Nitossolo Háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p.747- 757, 2008.
- BOIFFIN, J. **La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l' action des pluies**. 1984. 320p. Tese de Doutorado - Paris - INA – PG.
- BURWELL, R. E.; ALLMARAS, R. R. & AMEMIYA, M. A. Field measurement of total porosity and surface microrelief of soils. **Soil Science Society Proceedings**, v.27, p.697-700, 1963.
- BURWELL, R.E.; ALLMARAS, R.R. & SLONEKER, L.L. Structural alteration of soil surfaces by tillage and rainfall. **J. Soil Water Conservation**, 21:61-63, 1966.
- BURWELL, R.E. & LARSON, W.E. Infiltration as influenced by tillage induced random roughness and pored space. **Soil Science Society Proceedings**, v.33, p.449-452, 1969.
- CASTRO, L. G.; COGO, N. P. & VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.339-352, 2006.
- CNEC, Diagnóstico da utilização dos recursos hídricos. Porto Alegre: DNA EE/CNEC, 1993.
- COGO, N. P. **Effect of residue cover, tillage induced roughness, and slope length on erosion and related parameters**. 1981. 346p. Tese de Doutorado - West Lafayette, Purdue University.
- COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C & FOSTER, G.R. Effect of crop residue, tillageinduced roughness and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p.1005-1008, 1983.
- COGO, N. P.; MOLDENHAUER, W. C. & FOSTER, G. R. Soil loss reductions from conservation tillage practices. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.368-373, 1984.
- CURRENCE, H. D. & LOVELY, W. G. The analysis of soil surface roughness. **Transaction American Society Agricultural Engineers**, v.13, p.710-714, 1970.
- DEXTER, A. R. Effect of rainfall on the surface micro-relief soil. **Journal of Terramechanics**, v.14, No.1, p.11-22, 1977.
- DULEY, F.L. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. **Soil Science Society of America Proc.**, 4:60-64, 1939.
- ELTZ, F. L. F. & NORTON, L. D. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage, and canopy cover. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.1746-1755, 1997.
- JOHNSON, C.B.; MANNERING, J.V. & MOLDENHAUER W.C. Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses. **Soil Science Society of America Journal**, v.43, p.772-777, 1979.

- KAMPHORST, E. C.; JETTEN, V.; GUÉRIF, J.; PITKANEN, J.; IVERSEN, N. V.; DOUGLAS J. T. & GONZÁLES, A. P. Predicting depressional storage from soil surface roughness. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.1749-1758, 2000.
- KUIPERS, H. A relief meter of soil cultivation studies. Neth. **Journal Agricultural Science**, v.5, p.255-262, 1957.
- LADO LIÑARES, M. & TABOADA CASTRO, M.M. Medida de la rugosidad Del suelo em terrenos de cultivo. In: GÓMEZ ORTIZ, A. & SALAVADOR FRANCH, F. (eds.). **V Reunión Nacional de Geomorfología**. Barcelona, p. 731-734, 1988.
- LARSON, W.E. Tillage requirements for corn. **Journal Soil Water Conservation**, v.17, p.3-7, 1962
- LARSON, W.E. & GILL, W.R. Soil physical parameters for designing new tillage systems. In: ConservationTillage. Ankeny, **Soil Conservation Society of America**, 1973. p.13-22
- LEVIEN, R. ; COGO, N. P. Erosão na Cultura do Milho em Sucessão à Aveia Preta e Pousio Descoberto, em Preparo Convencional e Plantio Direto, com Tração Animal e Tratorizada.. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 3, p. 683-692, 2001.
- MIRANDA, J. G. V. **Análisis fractal del microrrelieve del suelo**. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad da Coruña. 313p., 2000.
- MOORE, I. D. & LARSON, C. L. Estimating micro-reliefsurface storage from point data. **Transaction American Society Agricultural Engineers**, v.20, p.1073-1077, 1979.
- ONSTAD, C. A. Depressional storage on tilled soil surfaces. **Transaction American Society Agricultural Engineers**, v.27, p.729-732, 1984.
- RENARD, K. G.; FOSTER, G. R. & WEESIES, G. A. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)**. Washington, USDA, 1997. 384p. (Agricultural Handbook, 703).
- RÖMKENS, M.J.M. & WANG, J.Y. Soil roughness changes from rainfall. **Transaction American Society Agricultural Engineers**, v.30, p.101-107, 1987.
- SALEH, A. Soil roughness measurement, chain method. **Journal Soil and Water Conservation**, v.48, p.527-592, 1993.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O. & BALBINOT JR., A. A. Erosão hidrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:427-436, 2000.
- STEICHEN, J. M. **Infiltration and random roughness of a tilled and untilled claypan soil**. **Soil Tillage Res.** 4:251-262, 1984

SKIDMORE, E.L. Comments on chain method for measuring soil roughness. **Soil Science Society of American Journal**, v.61, p.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**. 2002. 430p. Tesis Doctorado. Facultad de Ciencias, Universidad da Coruña. A Coruña

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

WAGNER, L. E. Profile meter program. Documentation. United States. Departament of Agriculture. Agricultural Research Service. **Wind Erosion Research Unit**. 27p., 1992.

WAGNER, L. E. & Yiming Yu. Digitazion of profile meter photoghaphs. **Transaction American Society Agricultural Engineers** 43(2): 412-416, 1991.

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, **United States Departament of Agriculture**, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537).

ZOBECK, T. M. & ONSTAD, C. A. Tillage and rainfall effects on random roughness: A review. **Soil & Tillage Research**, v.9, p.1-20, 1987.

ZOLDAN JUNIOR. W.A. **Rugosidade superficial do solo ocasionada por uma operação de escarificação aplicada após cinco anos e meio de uso de sistemas de manejo do solo, e suas relações com a erosividade da chuva e erosão hídrica em um Nitossolo Háplico**. 2006. 100p. Dissertação de Mestrado - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages-SC.

ZOLDAN JUNIOR, W.A.; BERTOL, I.; PEGORARO, R.; FABIAN, E.L.; ZAVASCHI, E. & VIDAL VÁZQUEZ, E. Rugosidade superficial do solo formada por escarificação e influenciada pela erosividade da chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.353-362, 2008.