

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA  
AMBIENTAL

**JULIETA BRAMORSKI**

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE SOLO E FERTILIZANTES NITROGENADOS POR  
EROSÃO EM ÁREAS AGRÍCOLAS: UMA ABORDAGEM INTEGRADA E  
EXPERIMENTAL DOS FATORES INTERVENIENTES NO PROCESSO**

**SÃO CARLOS  
2007**

**JULIETA BRAMORSKI**

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE SOLO E FERTILIZANTES NITROGENADOS POR  
EROSÃO EM ÁREAS AGRÍCOLAS: UMA ABORDAGEM INTEGRADA E  
EXPERIMENTAL DOS FATORES INTERVENIENTES NO PROCESSO**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Doutora em Ciências da Engenharia Ambiental.

**Orientador: Prof. Dr.Silvio Crestana**

**SÃO CARLOS**

**2007**

## **DEDICATÓRIA**

Ao Prof. Dr. Swami Marcondes Villela, pela presença iluminada em minha vida e pelo inestimável apoio e incentivo prestados durante todos os anos de pós-graduação. Meu carinho e amizade eternos!

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prf. Dr. Silvio Crestana, pela confiança em mim depositada, pela oportunidade deste trabalho, pelo incentivo e orientação.

A FAPESP pelo Auxílio à Pesquisa concedido, processo 05/59640-2.

A todos os funcionários da EMBRAPA Instrumentação Agropecuária, pelo convívio durante estes anos e por todo o auxílio prestado. Em especial ao pesquisador Lúcio Jorge, pela ajuda na obtenção das imagens digitais e uso do SIARCS e, Emerson de Stefani, pelos inúmeros favores prestados e pela gentileza e educação com que sempre me atendeu.

A chefia do EMBRAPA Pecuária Sudeste, pela viabilização do experimento em campo.

Aos funcionários da EMBRAPA Pecuária Sudeste pela construção do experimento, reparos no simulador de chuvas e participação ativa na execução dos ensaios. Em especial aos funcionários Wailton, Amadeu e Severino.

Ao Instituto Agrônomo de Campinas – IAC, pelo empréstimo do simulador de chuvas e do equipamento rugosímetro a laser, utilizados no experimento. Em especial a Dra. Isabella Clerice De Maria, por toda a ajuda na obtenção e análise dos dados e, ao Dr Sidney Vieira, por viabilizar o empréstimo do simulador de chuvas.

Ao Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva, da Universidade Federal de Itajubá pela contribuição no planejamento do experimento, apoio, incentivo e amizade.

A Renato Lemos e Silva, pela obtenção dos dados de rugosidade em campo e auxílio na execução do experimento.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP pela produção do sulfato de amônio enriquecido isotopicamente. Em especial ao Dr. Alberto Bendassoli, pela viabilização da produção da quantidade necessária ao experimento e, Dr. Paulo César Ocheuze Trivelin pelas sugestões valiosas para a execução do experimento e por todo o auxílio na análise dos dados.

Ao Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada e todos os seus funcionários. Em especial a secretária da Pós-graduação em Ciência da Engenharia Ambiental, Claudete Poianas, pela amizade, paciência e apoio.

A minha família, que compreende a minha ausência prolongada e me apóia ~ incentiva sempre.

Aos amigos, sempre presentes, me ajudando diretamente no trabalho ou fazendo companhia: Andréa Novelli, Liliane Lazzari Albertini, Fernanda Teixeira Marciano, Gisele Queiroz, Ana, Úrsula, Carol Galharte, Robson Valentin, Kênia, Ricardo Reis, Domingos Sávio Barbosa, entre outros.

Ao Junior, meu marido, sem o qual este trabalho teria se tornado uma tarefa mais difícil. Pela ajuda na execução do experimento em campo e discussão dos resultados, pelo apoio, compreensão, amor, amizade, companhia e muito mais.

***“O segredo é não correr atrás das borboletas. É cuidar do jardim para  
que elas venham até você”***

**Mário Quintana**

# **AVALIAÇÃO DA PERDA DE SOLO E FERTILIZANTES NITROGENADOS POR EROSÃO EM ÁREAS AGRÍCOLAS: UMA ABORDAGEM INTEGRADA E EXPERIMENTAL DOS FATORES INTERVENIENTES NO PROCESSO**

## **RESUMO**

A erosão do solo tem sido extensamente estudada dentro do ponto de vista agrícola, pois está relacionada a sérias perdas em termos de produtividade das mais variadas culturas e conseqüentemente, é causa de prejuízos econômicos. Recentemente tem-se dado atenção especial aos problemas ambientais relacionados à erosão, transporte e deposição de sedimentos, já que são, provavelmente, os mais significativos de todos os poluentes em termos de sua concentração na água e dos seus impactos e efeitos no transporte de substâncias químicas, entre elas o nitrogênio aplicado na forma de fertilizantes.

O foco central do presente trabalho foi a investigação dos padrões de transporte de sedimentos por erosão hídrica e suas influências na transferência de nitrogênio aos cursos d'água. A fonte de nitrogênio avaliada foi o sulfato de amônio aplicado superficialmente como fertilizante em um Latossolo Vermelho Amarelo, em diferentes preparos do solo, sem cobertura vegetal e sob chuva simulada em diferentes intensidades. Os resultados permitiram identificar a fração argilosa dos sedimentos erodidos transportados em suspensão na água da enxurrada como a principal via de transporte/transferência de nitrogênio proveniente do fertilizante. Este processo de transferência deu-se mais intensamente nas primeiras chuvas. Constatou-se que os valores de perdas de solo e água não influenciam a capacidade de transporte de nitrogênio entre a área de cultivo e os cursos d'água. O preparo do solo influenciou as concentrações de nitrogênio transportadas pela enxurrada. As concentrações de nitrogênio nos sedimentos são altas mesmo com baixo volume e intensidade de chuva.

# **EVALUATION OF SOIL AND NITROGEN FERTILIZERS LOSSES CAUSED BY EROSION IN AGRICULTURAL AREAS: A INTEGRATED AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE FACTORS INVOLVED IN THE PROCESS**

## **ABSTRACT**

Soil erosion has been extensively studied from the agricultural point of view, because it is related with serious damages in terms of a huge variety of plantations productivity and its consequent economic detriments. Currently, special attention is given to the environmental problems caused by erosion processes and the transport and deposition of the sediments, since they are, probably, the most significant pollutants in terms of its concentration in the water and its impacts and effects in the chemical substances transport, such as nitrogen which is applied in the form of fertilizer.

The central focus of the present work was the research of the standards sediment transport originated by the water erosion and their influences in the transference of nitrogen to the water bodies. The evaluated nitrogen source was the ammonium sulphate applied superficially as a fertilizer in a *Latossolo Vermelho Amarelo* soil, under different soil tillage systems, without vegetal covering and under different intensities of simulated rain. The results allowed to identified that the argillaceous fraction of the eroded sediments carried in the runoff suspension was the main way of the nitrogen transport/ transference derived from the fertilizer. This transference process was more intensely observed in the first rains. It was evidenced too, that the losses values of soil and water did not influence the nitrogen transport capacity between the planted areas and the water bodies.

Additionally, soil tillage influenced in nitrogen concentrations carried by the runoff. The nitrogen concentrations in the sediments were high, in spite of the low volumes and low intensities of the rain.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Inter-relações entre o processo erosivo e diversas formas de degradação ambiental.....	9
Figura 2: Suporte para os pluviômetros e posição do simulador durante a calibração.....	39
Figura 3: Distribuição espacial das parcelas .....	45
Figura 4: Par de parcelas padrão utilizadas nos ensaios. A direita observa-se a parcela padrão solo raspado. A esquerda observa-se a parcela padrão solo arado .....	48
Figura 5: Esquema geral da parcela .....	50
Figura 6: Localização da central administrativa da EMBRAPA Pecuária Sudeste (Fazenda Canchim) em relação a malha urbana de São carlos .....	56
Figura 7: Mapa de solos da Fazenda Canchim (Silva, 2004).....	60
Figura 8: Localização da área do experimento dentro dos limites da Fazenda Canchim.....	61
Figura 9: Mapa de declividades da Fazenda Canchim.....	62
Figura 10: Analisador Granulométrico de Solos .....	65
Figura 11: Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 1.....	66
Figura 12:Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 2.....	67
Figura 13:Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 3.....	68
Figura 14:Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 4.....	69
Figura 15: Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 5.....	70
Figura 16:Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 6.....	71
Figura 17: Retenção de Água no Solo – Parcela 1 .....	74

Figura 18: Retenção de Água no Solo – Parcela 2 .....	74
Figura 19: Retenção de Água no Solo – Parcela 3 .....	75
Figura 20: Retenção de Água no Solo – Parcela 4 .....	75
Figura 21: Retenção de Água no Solo – Parcela 5 .....	75
Figura 22: Retenção de Água no Solo – Parcela 6 .....	76
Figura 23: Agrupamento das parcelas quanto a concentração e diâmetro das partículas.....	
Figura 24: Agrupamento das parcelas quanto a pressão e umidade .....	ou
Figura 25: Posicionamento do simulador de chuvas .....	84
Figura 26: Volume de água escoada (L) nas parcelas experimentais após cada chuva.....	86
Figura 27: Volume total de água escoada (L) nas parcelas experimentais .....	87
Figura 28: Agrupamento das parcelas em relação ao volume de água escoada..	88
Figura 29: Sedimentos erodidos (g) nas parcelas experimentais após cada chuva .....	90
Figura 30: Total de sedimentos erodidos (g) nas parcelas experimentais .....	91
Figura 31: Agrupamento das parcelas em relação aos valores de sedimento erodido .....	92
Figura 32: Equipamento rugosímetro a laser, posicionado na parcela experimental de erosão. ....	100
Figura 33: Índices de rugosidade nas parcelas com solo raspado.....	103
Figura 34: Índices de rugosidade nas parcelas com solo arado.....	104
Figura 35: Parcela 6, com solo arado, antes dos ensaios.....	106
Figura 36: Parcela 6 ao final da primeira simulação.....	107

Figura 37: Parcela 6 após a última simulação.....	107
Figura 38: Aspecto das parcelas quanto ao tipo de preparo (solo raspado e arado, respectivamente).....	109
Figura 39: Diferença entre os tipos de preparo pelo teste ANOVA .....	109
Figura 40: Rugosidade superficial da parcela 1 antes da primeira simulação (RR= 3,8872) .....	111
Figura 41: Rugosidade superficial da parcela 1 depois da primeira simulação (RR= 3,0379 Precipitação= 30 mm/h) .....	111
Figura 42: Rugosidade superficial da parcela 1 depois da segunda simulação (RR= 3,6439 Precipitação= 30 mm/h) .....	112
Figura 43: Rugosidade superficial da parcela 1 depois da terceira simulação (RR= 3,1668 Precipitação= 70 mm/h) .....	112
Figura 44: Rugosidade superficial da parcela 2 antes da primeira simulação (RR= 12,2143) .....	113
Figura 45: Rugosidade superficial da parcela 2 depois da primeira simulação (RR= 11,7306 Precipitação= 30 mm/h) .....	113
Figura 46: Rugosidade superficial da parcela 2 depois da segunda simulação (RR= 11,1168 Precipitação= 30 mm/h) .....	114
Figura 47: Rugosidade superficial da parcela 2 depois da terceira simulação (RR= 10,8200 Precipitação= 70 mm/h) .....	114
Figura 48: Rugosidade superficial da parcela 3 antes da primeira simulação (RR= 5,9862) .....	115
Figura 49: Rugosidade superficial da parcela 3 depois da primeira simulação (RR= 6,0609 Precipitação= 30 mm/h) .....	115

Figura 50: Rugosidade superficial da parcela 3 depois da segunda simulação (RR= 6,2856 Precipitação= 30 mm/h) .....	116
Figura 51: Rugosidade superficial da parcela 3 depois da terceira simulação (RR= 5,7998 Precipitação= 70 mm/h) .....	116
Figura 52: Rugosidade superficial da parcela 4 antes da primeira simulação (RR= 13,0333) .....	117
Figura 53: Rugosidade superficial da parcela 4 depois da primeira simulação (RR= 12,9507 Precipitação= 30 mm/h) .....	117
Figura 54: Rugosidade superficial da parcela 4 depois da segunda simulação (RR= 13,0946 Precipitação= 30 mm/h) .....	118
Figura 55: Rugosidade superficial da parcela 4 depois da terceira simulação (RR= 13,0292 Precipitação= 70 mm/h) .....	118
Figura 56: Rugosidade superficial da parcela 5 antes da primeira simulação (RR= 4,4949) .....	119
Figura 57: Rugosidade superficial da parcela 5 depois da primeira simulação (RR= 4,7256 Precipitação= 30 mm/h) .....	119
Figura 58: Rugosidade superficial da parcela 5 depois da segunda simulação (RR= 4,3629 Precipitação= 30 mm/h) .....	120
Figura 59: Rugosidade superficial da parcela 5 depois da terceira simulação (RR= 4,4730 Precipitação= 70 mm/h) .....	120
Figura 60: Rugosidade superficial da parcela 6 antes da primeira simulação (RR= 6,5579) .....	121
Figura 61: Rugosidade superficial da parcela 6 depois da primeira simulação (RR= 10,7082 Precipitação= 30 mm/h) .....	121

Figura 62: Rugosidade superficial da parcela 6 depois da segunda simulação (RR= 9,3449 Precipitação= 30 mm/h) .....	122
Figura 63: Rugosidade superficial da parcela 6 depois da terceira simulação (RR= 10,1623 Precipitação= 70 mm/h) .....	122
Figura 64: Experimento reproduzido em laboratório .....	131
Figura 65: Exemplo de imagem obtida no experimento em laboratório .....	132
Figura 66: Exemplo da imagem binarizada no SIARCS.....	132
Figura 67: Parcela experimental com plot de solo marcado com azul de metileno .....	133
Figura 68: Imagem obtida antes da simulação de chuva .....	135
Figura 69: Imagem realçada no software Image Pró Plus.....	135
Figura 70: Área selecionada da imagem .....	135
Figura 71: Imagem binarizada pelo SIARCS para contagem de área.....	136
Figura 72: Evolução do perfil de solo contrastado ao longo da duração da chuva, na primeira simulação em solo arado .....	137
Figura 73: Evolução do perfil de solo contrastado ao longo da duração da chuva, na segunda simulação em solo arado.....	137
Figura 74: Evolução do perfil de solo contrastado ao longo da duração da chuva, na primeira simulação em solo raspado.....	138
Figura 75: Valores médios obtidos no perfil de solo contrastado, na segunda simulação em solo raspado e arado .....	139
Figura 76: Aspecto do Sulfato de Amônio ( <sup>15</sup> N) produzido no CENA/USP.....	146
Figura 77: Detalhe da linha de aplicação do sulfato de amônio na parcela experimental.....	147

Figura 78: Esquema da localização dos pontos de coleta das amostras de solo na parcela experimental.....	148
Figura 79: %NSedPF na Parcela 1.....	155
Figura 79: %NSedPF na Parcela 2.....	155
Figura 80: %NSedPF na Parcela 3.....	156
Figura 81: %NSedPF na Parcela 4.....	156
Figura 82: %NSedPF na Parcela 5.....	157
Figura 83: %NSedPF na Parcela 6.....	157
Figura 84: %NSPF nas diferentes profundidades na faixa “zero”.....	159
Figura 85: Agrupamento das faixas “zero” de todas as parcelas experimentais.....	162
Figura 86: Agrupamento das faixas “1” de todas as parcelas experimentais.....	162
Figura 87: Agrupamento das faixas “2” de todas as parcelas experimentais.....	163
Figura 88: %NSedPF na Parcela 1.....	167
Figura 89: %NSedPF na Parcela 2.....	164
Figura 90: %NSedPF na Parcela 3.....	167
Figura 91: %NSedPF na Parcela 4.....	164
Figura 92: %NSedPF na Parcela 5.....	168
Figura 93: %NSedPF na Parcela 6.....	165
Figura 94: %NSPF nas diferentes profundidades na faixa “zero”.....	170
Figura 95: Vazão média mensal (m <sup>3</sup> /s) do posto acima de Paulínea (62690000).....	175
Figura 96: Carga distribuída entrando no sistema ao longo do comprimento.....	176
Figura 97: Concentração ao longo do rio para o solo raspado.....	178
Figura 98: Concentração ao longo do rio para o solo arado.....	179

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Perfil hipotético de solo, contendo a maior parte dos horizontes principais.....	10
Tabela 2: Classificação das partículas do solo.....	12
Tabela 3: DMP dos solos das parcelas experimentais.....	72
Tabela 4: Densidade do solos das parcelas experimentais .....	73
Tabela 5: Perda de solo e água nos diferentes preparos do solo e intensidade de precipitação.....	85
Tabela 6: Taxa de erosão de acordo com o preparo do solo, após cada chuva ...	94
Tabela 7: Taxas totais de erosão em cada parcela.....	95
Tabela 8: Atributos físicos do solo.....	101
Tabela 9: Índices de rugosidade (Solo Raspado).....	103
Tabela 10: Índices de rugosidade (Solo Arado) .....	103
Tabela 11: Coeficientes de correlação ( $R^2$ ) das regressões entre rugosidade superficial e produção de sedimentos.....	123
Tabela 12: Produção total de sedimentos (g) nas parcelas. ....	124
Tabela 13: Volume escoado total nas parcelas.....	125
Tabela 14: Valores Nitrogênio Total (NT), Percentual de Nitrogênio no Solo Proveniente do Fertilizante (%NSPF) e Quantidade de Nitrogênio no Solo Proveniente do Fertilizante (QNSPF), por faixa de amostragem em cada parcela experimental.....	152
Tabela 15: Massas de solo das faixas nas parcelas experimentais .....	153

Tabela 16: Valores de Nitrogênio Total (NT), Percentual de Nitrogênio no Sedimento Proveniente do Fertilizante (%NSedPF) e Quantidade de Nitrogênio no Sedimento Proveniente do Fertilizante (QNSedPF),.....	165
Tabela 17: Massa de sedimento erodido em cada parcela experimental.....	166
Tabela 18 : Dados hidrológicos do rio Atibaia .....	174
Tabela 19: Extrapolação dos dados obtidos em campo e determinação dos fatores Sd e Sd" .....	
Tabela 20: Cálculo da diluição do nitrato a partir das médias obtidas nos 2 tipos de preparo do solo .....	177
Tabela 21: Valores de m/V para cada parcela experimental.....	182
Tabela 22: Área agrícola mínima necessária para que a concentrações de nitrato atinja níveis críticos.....	182



## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	1
OBJETIVOS .....	6
2.1 - OBJETIVO GERAL.....	6
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS PROCESSOS EROSIVOS.....	8
3.1.1 - Solo.....	10
3.1.1.1 - Características Físicas do Solo .....	11
3.1.1.2 - Natureza geológica das rochas formadoras do solo.....	14
3.1.2 - Erosão Hídrica .....	18
3.1.2.1 - Atributos físicos do solo e suas implicações no processo de erosão hídrica.....	20
3.2 - EROSÃO DOS SOLOS E SUAS IMPLICAÇÕES NOS RECURSOS HÍDRICOS .....	22
3.3 - EROSÃO EM ÁREAS AGRÍCOLAS: CAUSAS E CONSEQÜÊNCIAS .....	24
3.3.1 - Aporte de nitrogênio aos recursos hídricos de áreas agrícolas .....	26
3.4 - MODELOS DE PREDIÇÃO DE PERDA DE SOLO.....	28
3.5 - MÉTODOS DE PESQUISA EM EROSÃO DOS SOLOS.....	30

3.5.1 - Utilização de parcelas experimentais e simuladores de chuva .....	32
3.5.2 - Utilização de traçadores para a estimativa de perda de solo por erosão .....	33
3.5.3 - Outros métodos empregados para estimativa de perda de solo por erosão .....	35
4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4.1 - DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	38
4.1.1 - Utilização do Simulador de Chuvas .....	38
4.1.1.1 - Calibração do simulador de chuvas em campo.....	38
4.1.2 - Tipo de solo, localização, disposição espacial, cobertura e tipos de preparo do solo das parcelas experimentais.....	44
4.1.1.1 - Instalação das parcelas.....	46
4.1.1.2 - Preparação das parcelas.....	49
4.2 - INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO .....	49
4.3 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	51
4.3.1 - Análise Estatística.....	53
5- RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	54
6-CONCLUSÕES .....	185
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	187

# 1 - INTRODUÇÃO

---

O comprometimento da qualidade ambiental e o aumento da vulnerabilidade dos ecossistemas ocorrem por diversos fatores, entre eles a erosão dos solos.

O solo é um recurso básico que suporta toda a cobertura vegetal do planeta, essencial a sobrevivência. O fenômeno da erosão dos solos pode ocasionar, além de perda significativa de solos férteis, diversos impactos ambientais.

Além dos ambientais, os impactos econômicos também estão presentes, e em alta magnitude, já que quanto maior for a perda da camada fértil do solo, maiores serão os investimentos em tecnologia, mecanização e insumos que garantam a produtividade dos sistemas agrícolas.

No âmbito social, a erosão é apontada como uma das causas do êxodo rural. Com a inviabilização ou comprometimento da produção agrícola, muitos agricultores se vêem obrigados a abandonar suas terras e seguir para os centros urbanos em busca de melhores oportunidades.

O tema erosão tem sido mais extensamente abordado dentro do ponto de vista agrícola. Mais recentemente é que se tem dado atenção especial aos problemas ambientais do destacamento, transporte e deposição de sedimentos (SILVA e CRESTANA, 2004).

Nesta perspectiva, a erosão hídrica, causada pela chuva, tem sido o fator mais importante na degradação dos solos e conseqüentemente dos recursos hídricos em geral.

Os impactos ambientais originados pela erosão hídrica são mais representativos em sistemas agrícolas, pois, além de potencializar o transporte de substâncias químicas utilizadas nos plantios, promove a perda de matéria orgânica e biodiversidade desses solos, empobrecendo todo o sistema.

Para os trópicos, especificamente, o problema é ainda mais grave, pois os eventos de precipitação e, conseqüentemente, de escoamento superficial, são fatores que atuam de maneira intensa nos processos de perda de solo nessas regiões, compondo um cenário extremamente favorável aos processos erosivos e à degradação dos componentes ambientais do solo e da água (EL SWAIFY e DANGLER, 1982).

Desta forma, planejar os usos pretendidos em uma bacia agrícola torna-se atividade imprescindível. Porém, o planejamento deve ser realizado com base na observação de diversos fatores e processos ambientais.

A medição destes fatores é difícil. No caso da erosão, a determinação das perdas de solo, por métodos diretos, é morosa e cara, sendo essa uma das principais causas do crescente interesse dos pesquisadores pelos modelos de predição de erosão.

O grupo de pesquisa em “Desenvolvimento e Aplicações de Métodos, Modelos e Tecnologias Avançadas para Estudo de Atividades Agrícolas e Recursos da Água e do Solo”, liderado pelo Dr. Silvio Crestana, vêm, desde 2004, utilizando e aplicando diversos modelos de predição de perda de solo e transporte de solutos, como a EUPS, RUSLE, SWAT, AVSWAT, WEPP, entre outros. Pode-se, neste contexto, citar os trabalhos de MINOTI e CRESTANA (2004), SILVA *et al.*, (2004), SILVA *et al.*, (2005), MINOTI *et al.*, (2005), NEVES *et al.*, (2006).

Estes modelos, muitas vezes, utilizam dados empíricos ou, dados obtidos em ecossistemas com características distintas dos ecossistemas brasileiros.

Assim, uma das contribuições científicas deste trabalho é obter e disponibilizar dados reais, obtidos em campo, experimentalmente, para a calibração dos modelos utilizados em uma perspectiva mais próxima da realidade local, já que os ecossistemas brasileiros apresentam características peculiares. Otimizar os modelos de predição de perda de solos representa um ganho inestimável nas pesquisas em ciência do solo.

Porém, quantificar as perdas de solo é apenas o início da análise. Em se tratando dos impactos ambientais ocasionados pela erosão, sabe-se que, quando esta ocorre em uma área de cultivo agrícola, o solo transportado leva junto dele

diversos contaminantes, que finalmente serão depositados no fundo de corpos aquáticos, contribuindo para a degradação dos recursos hídricos.

Dentre os vários elementos químicos que podem ser aportados aos corpos hídricos, o nitrogênio merece especial destaque, já que é a base de inúmeros fertilizantes largamente empregados em diversas culturas. Além disso, o nitrogênio constitui nutriente essencial à produtividade de ambientes aquáticos, porém, quando as concentrações excedem a capacidade de utilização do elemento pelos componentes do sistema, ocorre um aumento exagerado da biomassa. Essa biomassa, por outro lado, consumirá altas taxas de oxigênio dissolvido na água, ocasionando a morte de peixes e outros organismos. Este processo é conhecido como eutrofização e é responsável pela degradação de inúmeros ecossistemas aquáticos. Em áreas agrícolas o aporte de nitrogênio aos corpos hídricos se dá por poluição difusa.

Diversos elementos e substâncias químicas contribuem para a poluição difusa e, a participação das mesmas é muito pouco conhecida, assim como a influência dos processos erosivos sobre o carreamento desses poluentes.

O tema desta tese surgiu da análise do produto final da erosão, ou seja, os sedimentos depositados no fundo de rios, lagos e reservatórios. Estes sedimentos geralmente apresentam altíssimas concentrações de nutrientes e algumas vezes, de metais pesados.

No entanto, ao se analisar apenas o produto final da erosão e suas conseqüências, abre-se uma lacuna no que concerne à questão central do processo como um todo, ou seja, as causas desta situação e as formas de minimizar a mesma.

Uma abordagem interessante seria quantificar e identificar os mecanismos que proporcionam e potencializam essa transferência de poluentes entre a bacia e os corpos aquáticos. Elucidada esta questão, abrir-se-ia um leque de opções tanto de possibilidades de manejo como de novas práticas conservacionistas para minimizar essas transferências e assim assegurar a manutenção da qualidade dos recursos hídricos, principalmente em bacias agrícolas.

Neste contexto, o interesse está em analisar a interação dos diversos fatores condicionantes do processo entre si, buscando abordar a origem do problema para buscar soluções na causa, e não na consequência.

Assim, o foco central deste trabalho está na investigação dos padrões de transporte de sedimentos por erosão hídrica e suas influências na transferência de nitrogênio proveniente de fertilizantes agrícolas.

Uma análise integrada dos fatores envolvidos, como precipitação, características físicas e cobertura do solo, bem como a utilização de traçadores de erosão e nitrogênio, virá a contribuir na elucidação de questões importantes acerca do potencial dos processos erosivos na degradação da qualidade dos recursos hídricos pelo aporte de nitrogênio oriundo de áreas de cultivo.

Ressalta-se que, a abordagem geral enfoca-se muito mais no âmbito conservacionista do que nos processos de diagnóstico/recuperação de impactos gerados pelas atividades agrícolas, o que gera, entre outros, informações importantes para os processos de planejamento ambiental e sustentabilidade na agricultura.

Esta tese é estruturada em capítulos distintos, referentes aos resultados e discussões, apresentando cada método de investigação utilizado bem como a integração dos métodos em uma análise unificada. Cada capítulo é composto de introdução, materiais e métodos, resultados e discussões e considerações finais.

São apresentados os seguintes capítulos:

- **CAPÍTULO 1:** Caracterização do local de estudo e determinação das características físicas iniciais dos solos nas parcelas experimentais.
- **CAPÍTULO 2:** Avaliação da produção de sedimentos e perda de água em parcelas experimentais com características distintas de preparo em diferentes intensidades de precipitação.
- **CAPÍTULO 3:** Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e suas relações com as perdas de solo e água.

- **CAPITULO 4:** Análise instantânea do processo erosivo durante os eventos de precipitação: utilização de traçador de contraste e obtenção de imagens digitais de alta resolução.
- **CAPITULO 5:** Avaliação das vias de perda de fertilizante nitrogenado (sulfato de amônio) pelo processo erosivo e suas potencialidades enquanto poluente de águas superficiais em áreas agrícolas: o uso do isótopo estável do nitrogênio como traçador dos processos de transporte.

## 2 - OBJETIVOS

---

### 2.1 - OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é caracterizar, experimentalmente, os processos de perda de solo e nitrogênio por erosão, em condições controladas de tipo e preparo de solo, comprimento e inclinação da vertente sob chuva simulada através da análise integrada dos fatores intervenientes e com o auxílio de traçadores dos processos erosivos e do transporte de nitrogênio, conferindo ao sistema maior precisão.

### 2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as perdas de solo, pelo método direto, em parcelas de erosão.
- Adaptar a utilização de traçadores de contraste juntamente a análise de imagens digitais, para a investigação dos padrões de transporte horizontal de solo.
- Avaliar o deslocamento de nitrogênio aplicado ao solo sob forma de fertilizante isotopicamente marcado ( $^{15}\text{N}$ ), identificando-se as perdas pela água e pelo solo em escalas espacial e temporal, em condições experimentais.
- Determinar os coeficientes de rugosidade superficial do solo durante eventos simulados de precipitação.



- Correlacionar os coeficientes de rugosidade obtidos com o processo de perda de solo e água durante eventos simulados de precipitação, bem como a influência do preparo do solo sobre estes fatores.
- Correlacionar os padrões de transporte de nitrogênio com os processos de perda de solo, água, preparo do solo e características físicas, identificando situações potencializadoras dos processos de arraste.
- Avaliar, de forma integrada, os fatores intervenientes neste estudo de forma a determinar precisamente, a influência desses fatores (intensidade e duração dos eventos pluviométricos, tipo de solo, declividade do terreno, preparo do solo) nos padrões de transporte de solo e nitrogênio em sistemas agrícolas.

## 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS PROCESSOS EROSIVOS

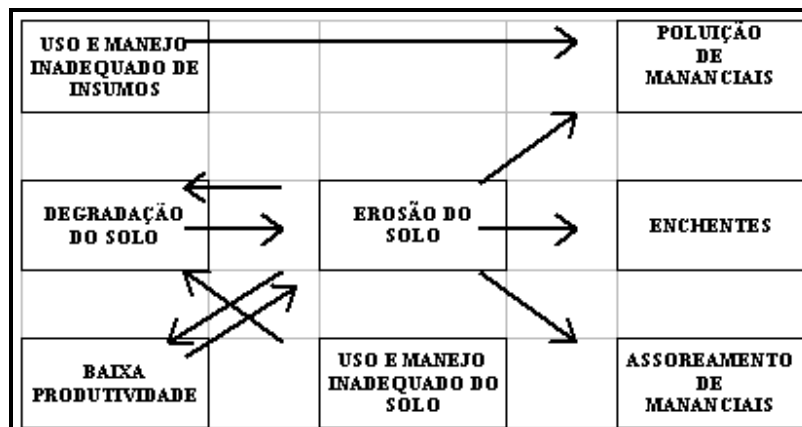
Entende-se por erosão o processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou fragmentos de rocha, pela ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo ou organismos (IPT, 1986).

Como qualquer outra questão de ciência, o problema da erosão transcende os seus significados como processo, revelando-se desta forma, uma questão cuja abordagem é sempre orientada segundo visões de mundo ajustadas a um contexto de domínio cultural (D'AGOSTINI,1999).

Os processos erosivos são condicionados, basicamente, por alterações do meio ambiente, provocadas pelo uso do solo nas suas várias formas, desde o desmatamento e a agricultura, até obras urbanas e viárias, que, de alguma forma, propiciam a concentração das águas de escoamento superficial.

Este fenômeno de erosão vem acarretando, através da degradação dos solos e, por consequência, das águas, um pesado ônus à sociedade, pois além de danos ambientais irreversíveis, produz também prejuízos econômicos e sociais, diminuindo a produtividade agrícola, provocando a redução da produção de energia elétrica e do volume de água para abastecimento urbano devido ao assoreamento de reservatórios, além de uma série de transtornos aos demais setores produtivos da economia.

A **Figura 1** apresenta uma síntese das inter-relações entre o processo erosivo e diversas formas de degradação ambiental.



**Figura 1: Inter-relações entre o processo erosivo e diversas formas de degradação ambiental**

A erosão é um problema que acompanha a humanidade desde seus primórdios, e em alguns momentos da história, se ela não foi o principal agente dizimador de uma civilização, certamente foi um dos mais importantes. Por outro lado, em algumas partes do mundo, tem-se encontrado formas alternativas, inteligentes e eficazes de combater, com sucesso, esse problema e garantir a produção agrícola e a sobrevivência das sociedades.

A compreensão do processo erosivo é complexa, pois envolve fatores de ordem física, meteorológica e antrópica/cultural.

A análise dos diversos fatores e, principalmente, a análise integrada das relações que os fatores possuem entre si fornece subsídios práticos e ideais que contribuem para a compreensão holística do processo e fornece bases sólidas para que se encontre a melhor forma de manejar o solo e sua cobertura, em termos conservacionistas.

Estes fatores exercem influência de forma e magnitude variável, conforme o local de ocorrência. Dentre os principais fatores atuantes destacam-se: o solo, a geologia, o clima, a topografia e a cobertura do solo.

### 3.1.1 - Solo

O solo é um dos agentes passivos do processo, que recebe atenção especial. Comumente, o solo é entendido como um corpo tridimensional formado por processos físicos, químicos e/ou biológicos, cujos agentes de formação são basicamente o clima, os fatores topográficos e a comunidade biótica e, cujo material de origem é a rocha matriz subjacente. É formado por diversas partículas de rochas em diferentes estádios de decomposição, água, substâncias químicas dissolvidas, gases e diversos organismos de diversos nichos ecológicos.

Uma característica comum de todos os solos é o de desenvolvimento em diferentes camadas aproximadamente horizontais, denominadas “horizontes”. Uma seção vertical do solo, expondo-a, é denominada perfil. O perfil do solo exprime a ação conjunta de vários fatores, e a seqüência de horizontes caracteriza o solo e determina-lhe o valor agrícola.

De acordo com BERTONI e LOMBARDI NETO (1990), a camada superficial do solo, denominada horizonte A, em geral, tem um alto teor de matéria orgânica e é de coloração mais escura. A camada subsequente, normalmente o horizonte B, contém mais argila e é bastante diferente na coloração, em geral bem mais clara que a superficial. Abaixo desta vem o horizonte C, constituído do material original, e o horizonte R, que é a rocha.

Os horizontes principais A,B e C, podem ser subdivididos de acordo com as propriedades que apresentam, de acordo com a **Tabela 1**.

**Tabela 1: Perfil hipotético de solo, contendo a maior parte dos horizontes principais.**

<b>01</b>	Detritos orgânicos não decompostos
<b>02</b>	Detritos orgânicos decompostos
<b>A1</b>	Horizonte escuro com alto teor de matéria orgânica
<b>A2</b>	Horizonte claro de máxima

	eluviação
<b>A3</b>	Transição entre A e B (mais próxima de A)
<b>B1</b>	Transição entre A e B (mais próxima de B)
<b>B2</b>	Horizonte de máxima acumulação de argila
<b>B3</b>	Transição para C
<b>C1</b>	Material intemperizado pouco afetado pelos processos de pedogênese
<b>C2g</b>	Horizonte em descontinuidade litológica e apresentando evidências de gleização
<b>R</b>	Rocha inconsolidada

### 3.1.1.1 - Características Físicas do Solo

O conhecimento das características do solo que podem influenciar o processo erosivo é de grande importância na orientação dos trabalhos de manejo do solo e controle da erosão (LEPSCH, 1993). Serão descritas a seguir as principais características do solo neste contexto, com base em BERTONI e LOMBARDI NETO (1990).

#### o **Textura**

A textura é o tamanho relativo das diferentes partículas que compõem o solo, e a sua quantificação é a granulometria. As partículas menores que 2 mm de diâmetro (areia, silte e argila), são as de maior importância, pois muitas das propriedades físicas e químicas da porção mineral do solo dependem das

mesmas. Assim, usualmente se consideram apenas as três frações menores para caracterizar a textura.

A **Tabela 2** apresenta a classificação das partículas em função de seu tamanho.

**Tabela 2: Classificação das partículas do solo**

<b>Nome</b>	<b>Intervalo de tamanho das partículas (mm)</b>
Cascalho muito grosso	64,00-32,00
Cascalho grosso	32,00-16,00
Cascalho médio	16,00-8,00
Cascalho fino	8,00-4,00
Cascalho muito fino	4,00-2,00
Areia muito grossa	2,00-1,00
Areia grossa	1,00-0,50
Areia média	0,50-0,25
Areia fina	0,250-0,125
Areia muito fina	0,1250-0,0625
Silte grosso	0,0625-0,0310
Silte médio	0,0310-0,0160
Silte fino	0,0160-0,00080
Silte muito fino	0,0080-0,0040
Argila grossa	0,0040-0,0020
Argila média	0,0020-0,0010
Argila fina	0,0010-0,0005
Argila muito fina	0,0005-0,00024

Fonte: American Geophysical Union (CARVALHO, N. de O., 1994)

As reações físicas e químicas no solo se verificam principalmente na superfície das partículas, daí a razão do maior interesse nas frações menores, que tem proporcionalmente uma superfície maior.

Solos arenosos são, em geral, soltos e não oferecem resistência à penetração das raízes, porém os muito arenosos, com baixa porcentagem de argila, são freqüentemente pobres em fertilidade e tem baixa capacidade de retenção de umidade. Solos com muita argila podem ter alta capacidade de retenção de umidade e pouca aeração e têm baixa produção, porém aqueles bastante argilosos, com boa agregação e grandes espaços porosos, podem ser altamente produtivos.

- **Estrutura**

A estrutura é a forma como se arranjam as partículas elementares do solo e, determina a maior ou menor facilidade de trabalho das terras, permeabilidade à água, resistência à erosão e condições ao desenvolvimento das raízes das plantas. Agregados estáveis em água permitem maior infiltração e maior resistência a erosão, porém agregados não estáveis tendem a desaparecer e dispersar. Sob o impacto das gotas da chuva, os agregados são sujeitos a se dispersarem. A estrutura geralmente determina a porosidade do solo.

- **Porosidade**

A porosidade refere-se a proporção de espaços ocupados pelos líquidos e gases em relação ao espaço ocupado pela massa de solo. O volume de poros representa, em média, a metade do volume do solo. Em geral, solos com textura mais fina têm maior porosidade e, solos arenosos menor porosidade. Porém, maior porosidade pode representar menor aeração. Dados de porosidade e densidade dos solos podem explicar a capacidade de compactação dos mesmos.

- **Permeabilidade**

É a capacidade de deixar passar água e ar através do perfil de solo. Em termos de movimento de água, é a condutividade hidráulica do solo saturado, usualmente medida, em termos de infiltração em milímetros por hora.

A permeabilidade está diretamente relacionada com o tamanho, volume e distribuição dos poros, e varia nos diferentes horizontes de dado solo. Nos solos arenosos, com grande quantidade de poros grandes, a permeabilidade é alta e o movimento da água nos poros é rápida. Nos solos argilosos a permeabilidade é baixa e o movimento da água nos poros é lenta.

### **3.1.1.2 - Natureza geológica das rochas formadoras do solo**

A rocha matriz sofre processo de intemperismo quando se encontra coberta pela camada de solo e também quando por algum motivo, ela aflora na superfície e passa a sofrer o impacto direto das águas da chuva e da ação do vento, entre outros agentes intempéricos.

A taxa de erosão desse tipo de material é muito variável, tanto quando se encontra coberto como quando se encontra descoberto. Depende da composição química e da consistência dos materiais, do comportamento da infiltração e do escoamento da água, da espessura da camada de rocha, da declividade e das fraturas existentes (CARVALHO, 1994), além das características dos agentes intempéricos locais.

### **Clima**

O clima exerce influência no processo erosivo de várias formas, através de agentes como o vento, a chuva e outros não tão comuns. A erosão causada pela chuva, denominada erosão hídrica, é a mais importante forma de erosão (ZACHAR, 1982). É causada pela chuva e pelo escoamento superficial, e é afetada por diversos agentes naturais e antropogênicos.

Os danos causados pelas gotas de chuva que golpeiam a superfície desprotegida de um solo a uma alta velocidade, constitui o primeiro passo no processo da erosão (BEASLEY, 1972).

A chuva é caracterizada por sua intensidade, duração e frequência. A intensidade é o fator pluviométrico mais importante do processo BERTONI e



LOMBARDI NETO (1990). Quanto maior a intensidade da chuva maior é a perda de solo por erosão.

A duração da chuva é o complemento da intensidade; a combinação destes determina a chuva total. Assim, quando se inicia uma chuva de intensidade uniforme, a água se infiltra por um período mais ou menos longo, dependendo das condições iniciais de umidade do solo e intensidade. Depois começa o escoamento superficial, que vai aumentando de intensidade em proporções cada vez menores, até alcançar uma quantidade estável.

A frequência da chuva também influi nas perdas de solo por erosão. Se os intervalos entre as chuvas são curtos, haverá enxurrada em chuvas mais volumosas mesmo em chuvas de menor intensidade.

As gotas de chuva que golpeiam o terreno são agentes que contribuem para o processo erosivo por, pelo menos, 3 formas:

- (a) desprendem partículas de solo no local que sofre o impacto;
- (b) transportam, por salpicamento, as partículas desprendidas;
- (c) imprimem energia, em forma de turbulência, à água superficial.

Estas gotas, cujo tamanho varia muito ao cair ao solo, têm, realmente, uma ação que atua como elemento compactador.

Além desta ação, a gota, ao cair, tem ainda a ação desagregadora (que é a que predomina), que faz saltar as partículas de solo. Estas partículas soltas são facilmente arrastadas pela lâmina de água que existe na superfície do solo. É fácil observar estas partículas que saltam por ocasião da chuva. As partículas menores, provenientes desta desagregação, serão arrastadas posteriormente no escoamento superficial de uma pequena lâmina de água, seja horizontal ou verticalmente, originando então a erosão laminar ou a erosão vertical ou interna NOLLA (1982).

Segundo ZACHAR (1982), junto com as partículas de solo são também lançados nutrientes e matéria orgânica, os quais são posteriormente carreados pela enxurrada.

A erosão é um processo de trabalho identificado pelo consumo de energia, em que a energia é usada em todas as fases da erosão: no rompimento dos agregados do solo, no salpicamento, na turbulência e no escoamento e transporte das partículas de solo.

### **Topografia**

O tamanho e a quantidade do material em suspensão arrastado pela água dependem da velocidade com que ela escorre, que por sua vez, é uma resultante do comprimento da vertente e da declividade do terreno (BERTONI e LOMBARDI NETO,1990).

Para RODRIGUES (1982), dentre os fatores topográficos, a declividade de um terreno é possivelmente o mais importante no condicionamento da gênese e evolução do processo erosivo.

No entanto, o comprimento da rampa não é fator menos importante, pois a medida que o caminho percorrido aumenta, não somente as águas se tornam mais volumosas, como também a velocidade de escoamento aumenta progressivamente e a maior energia resultante se traduz em erosão.

### **Cobertura Vegetal**

A cobertura vegetal influencia as taxas de escoamento superficial e erosão mais que qualquer outro fator físico individual.

De acordo com GALETI (1973), quanto mais vegetado for o solo, menor a erosão. A planta protege o solo em três níveis: nível das copas (folhas, ramos,etc.), nível de superfície do solo (troncos, serrapilheira) e, nível do interior do solo (raízes). A vegetação também acrescenta matéria orgânica aos solos,

tornando-os porosos, facilitando a penetração e retenção da água. Sombreiam o solo, diminuindo a evaporação e queima da matéria orgânica.

O fator cobertura do solo é de grande importância na prevenção e controle da erosão. O efeito da vegetação pode ser assim numerado:

- (a) proteção direta contra o impacto das gotas de chuva;
- (b) dispersão da água, interceptando-a e evaporando-a antes que atinja o solo;
- (c) decomposição das raízes das plantas que, formando canalículos no solo, aumentam a infiltração da água;
- (d) melhorando a estrutura do solo pela adição de matéria orgânica, aumentando, portanto a capacidade de retenção de água no solo;
- (e) diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada pelo aumento do atrito na superfície.

Desta forma pode-se concluir que as plantas, pela sua copa, raízes e serrapilheira, amortecem a queda das gotas de chuva, diminuindo o impacto sobre o solo, portanto, diminuindo a desagregação. Também evitam que a água ganhe velocidade, pela complexidade de seus sistemas. As raízes, em especial, dificultam a desagregação e arraste do solo e proporcionam ao mesmo as condições necessárias para que melhor retenham a água.

A cobertura do solo é um fator que está intimamente ligado a processos antrópicos, os quais explicam o modo pelo qual vem sendo manejado o solo de uma região, assim como sua cobertura. A ausência de cobertura é percebida logo no primeiro estágio erosivo.

### **3.1.2 - Erosão Hídrica**

A erosão hídrica inicia-se com o embate das gotas da chuva com o chão, desagregando as partículas do solo desnudo. Esta erosão é grande no início da precipitação e diminui após certo tempo, no qual forma-se uma lâmina d'água sobre o solo. Depois de desagregadas, as partículas são transportadas a certa distância, dependendo de fatores como declividade do terreno, obstáculos, tamanho das partículas, entre outros. O transporte, propriamente dito, envolve fatores distintos, que são: Desprendimento pelo impacto das gotas de chuva, transporte pelo impacto das gotas (saltitação), desprendimento pelo escoamento superficial, transporte pelo escoamento superficial (RIGUETTO, 1998).

A última fase do processo erosivo é a deposição ou assentamento do material, ou seja, sua parada (fim do transporte). Isto acontece quando o agente perde a sua força ou quando, eventualmente, encontra um obstáculo que o faça mudar de direção ou mesmo dividir o seu volume. Numa enxurrada, por exemplo, trazendo partículas grossas, arrastadas ao nível do solo, partículas médias em suspensão e finas em solução. As partículas grossas param tão logo encontrem um obstáculo, ou pela diminuição da declividade ou outros fatores; as partículas suspensas depositam-se quando a água perde a velocidade. As partículas finas vão a grandes distâncias, sendo, muitas vezes, transportadas aos lagos, reservatórios, mares e oceanos (BORDAS E SEMMELMANN, 1993).

A erosão hídrica dos solos pode ser controlada através de inúmeras ações, mas inspirada basicamente em uma única e suficiente necessidade: limitar a velocidade da água que escoar sobre a superfície do solo.

A erosão causada pela água pode se processar das seguintes formas: laminar, linear, deslizamento ou canais em sulcos e voçorocas. As três formas de erosão podem ocorrer simultaneamente no mesmo terreno.

a) Laminar: caracterizada por ocorrer remoção de uma fina camada e relativamente uniforme de solo pela precipitação e escoamento superficial. A erosão laminar, cuja forma de remoção das partículas é bastante seletiva, ocorre em toda a área e se dá pelo impacto das gotas de chuva.

b) Linear: na qual ocorre a formação de canais de dimensões variáveis, conforme as características da chuva, relevo e solo, principalmente solos recém cultivados. Ocorrendo acumulação de água em canais estreitos por curtos períodos, há remoção de solo destes canais desde a superfície até profundidades consideráveis, variando de 0,5 m até 25 m. A enxurrada, concentrada e em alta velocidade, condicionada pela topografia é que condiciona a remoção e transporte de sedimentos. A quantidade e tamanho dos sedimentos transportados na enxurrada dependem da velocidade do escoamento superficial e sua turbulência, os quais, por sua vez, são influenciados pela rugosidade superficial, comprimento da rampa, declividade e cobertura do solo (LOPES *et al.*,1987)

c) Deslizamento: constitui o deslizamento coletivo do solo em épocas de fortes chuvas continuadas, de grandes postas de terreno. São terras escorregadas por saturação extremada (perda da coesão das partículas de solo) e ação da gravidade em vertentes íngremes.

d) Canais: Processa-se de forma contínua e espontânea pela ação das correntes dos rios.

Todos os tipos de erosão são danosos. Entretanto, em termos de agricultura a erosão laminar é a mais importante, porque está sempre presente; onde há chuva há erosão laminar em menor ou maior grau; e ela “come” por igual, sempre uma camada da superfície de solo bom; ela funciona como se fosse um trator de lâmina raspando e levando para baixo (rio), constantemente, o solo superficial (GALETI,1973).

### **3.1.2.1 - Atributos físicos do solo e suas implicações no processo de erosão hídrica**

#### **o Rugosidade**

A rugosidade superficial do solo constitui o microrrelevo e se refere ao enrugamento da superfície, ocasionado por microelevações e microdepressões espacialmente distribuídas (LINDEN e VAN DOREN JUNIOR, 1986). O microrrelevo superficial é influenciado pelo preparo do solo (BERTOL *et al.*, 2006; CASTRO *et al.*, 2006), que afeta o volume de poros da camada preparada e que, com a cobertura por resíduos vegetais, influencia a armazenagem de água na superfície (Onstad, 1984), a infiltração de água no solo, a velocidade e volume de enxurrada, a retenção de sedimentos e, conseqüentemente, as perdas de solo (BERTOL *et al.*, 2006).

O microrrelevo superficial é dependente: do tipo e da intensidade de preparo, e do teor de água do solo antecedente ao preparo; da quantidade, tipo e manejo de resíduo vegetal existente no solo; e do tipo de solo (RÖMKENS & WANG, 1986). A rugosidade é afetada pela densidade e porosidade do solo (LEHRSCHE, *et al.*, 1987), e pela estabilidade de agregados em água (BERTOL *et al.*, 2006), as quais dependem do manejo do solo e, por isso, influenciam a qualidade da estrutura e regulam a velocidade e o grau de sua degradação.

Apesar de efêmera, a rugosidade superficial no solo induzida por métodos de seu preparo é requerimento importante nos sistemas de manejo de caráter conservacionista. 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, diminuindo os danos causados pela erosão hídrica.

#### **o Densidade**

A densidade do solo é um importante atributo físico dos solos, por fornecer indicações a respeito do estado de sua conservação, sendo uma das primeiras

propriedades a ser alterada pelos diferentes usos. Tem sido largamente utilizada na avaliação da compactação e, ou, adensamento dos solos (CAMARGO, 1983), sendo seu conhecimento necessário para conversão de resultados obtidos em base gravimétrica para volumétrica.

Quando ocorre a degradação da estrutura do solo, tem-se como efeito imediato o aumento da sua densidade, diminuição da macroporosidade e armazenamento de água ao longo do perfil, caracterizando a compactação desse solo. A densidade do solo encerra uma complexidade de fatores inerente a cada local de amostragem, o que leva às dificuldades da sua avaliação. Um dos principais fatores que contribuem para tal complexidade têm sido atribuídos à variabilidade espacial.

A densidade do solo é um atributo que é afetado pela estrutura do solo, grau de compactação, manejo e tipos de culturas. A maioria das culturas é seriamente afetada quando a densidade do solo ultrapassa  $1,5 \text{ g. cm}^{-3}$ , essencialmente por duas razões: primeiro, pela falta de  $\text{O}_2$  para a respiração das raízes, devido à baixa porosidade e má drenagem e, segundo, por impedimento mecânico para o crescimento das raízes, limitando-se a zona de absorção de água e nutrientes (SOUZA *et al.*, 1997).

Também em estudos realizados por SOUZA *et al.* (1997), se constatou que a movimentação de implementos agrícolas durante as diversas etapas da produção aumenta a densidade do solo e, conseqüentemente produz redução da porosidade total que, por sua vez, exercerá influência na capacidade de retenção de água, aeração, drenagem e condutividade hidráulica, afetando, assim, a produtividade das culturas.

- o **Condutividade hidráulica**

Sendo a condutividade hidráulica do solo um parâmetro que traduz a facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil de solo, sua determinação, principalmente no campo, torna-se imprescindível, visto que o movimento da água no solo está diretamente relacionado à produção das culturas agrícolas.

As propriedades que determinam a densidade do fluxo de água no solo são a condutividade hidráulica, que mede a habilidade do solo em conduzir água, e as características de retenção de água no solo, que expressam a sua habilidade em armazenar água (KLUTE e DIRKSEN, 1986). Assim, o conhecimento da condutividade hidráulica do solo é essencial para qualquer estudo que envolva o movimento da água no solo, seja para estudar a própria dinâmica da água, seja para estudar o transporte de elementos químicos, nutrientes e defensivos agrícolas, bem como seus impactos potenciais ao ambiente.

Além de variar com a umidade, detecta-se alta variabilidade espacial da condutividade hidráulica no solo, tanto em determinações no campo como no laboratório (JONG VAN LIER e LIBARDI, 1999).

- **Curva de retenção**

A compreensão e a avaliação do processo de redistribuição da água no solo são muito úteis para a Ciência do Solo e Engenharia Civil, particularmente em assuntos relacionados com a irrigação, drenagem, erosão, biologia da fauna e flora do solo, lixiviação de elementos químicos e orgânicos, poluição do solo e da água, dentre outros, porque a água que drena do perfil de solo pode ser um importante fator causador de vários problemas ambientais. Em muitas regiões do mundo, por exemplo, a água que drena subsuperficialmente dos solos tem contribuído para a poluição de rios e degradação de terras agrícolas pela formação de depósitos salinos, uma vez que a concentração de sais na água de drenagem dos solos severamente salinizados pode atingir valores de até 3 % (PREVEDELLO, 1995).

### **3.2 - EROÇÃO DOS SOLOS E SUAS IMPLICAÇÕES NOS RECURSOS HÍDRICOS**

A erosão do solo é reconhecida como um processo causador de inúmeros problemas ambientais, constituindo uma das principais fontes não pontuais de poluição dos recursos hídricos superficiais e, portanto, tem causado grandes



preocupações. O arraste de partículas de solo e de constituintes químicos (fertilizantes e pesticidas, por exemplo) pelo escoamento superficial gera sérios problemas ambientais, entre outros, como o assoreamento a contaminação de rios e lagos e a eutrofização (SILVA e CRESTANA , 2004).

Entre os fertilizantes aplicados, o nitrogênio e o fósforo, embora essenciais na obtenção de ótimos níveis de produtividade agrícola, são os poluentes mais importantes. Ambos quando aplicados acima da capacidade de absorção da cultura e fora da região de alcance das raízes, causam eutrofização dos corpos d'água quando os atingem. A eutrofização tem provocado a deterioração dos ecossistemas aquáticos, produzindo impactos ecológicos, econômicos, sociais e na saúde pública (SILVA e CRESTANA, 2004).

Com a redução da zona eufótica e, aumento de substrato para bactérias, haverá um consumo maior de oxigênio. Essa redução do oxigênio dissolvido e redução da produtividade primária devido a redução da zona eufótica implicará em desequilíbrio ecológico do sistema pois afetará toda a cadeia alimentar. Os sólidos em suspensão também provocam danos morfológicos e fisiológicos aos produtores primários que são os responsáveis pela captação da energia solar.

Segundo EILERS (2003), a erosão relacionada com as atividades agrícolas é uma das principais causas da diminuição da qualidade da água de rios e reservatórios nos Estados Unidos (URI e LEWIS, 1998), impondo pesadas perdas econômicas e ambientais aos usuários dos recursos hídricos.

De acordo com SIMÕES (2001), as soluções técnicas disponíveis para o controle da poluição de origem pontual, apesar de onerosas, são mais facilmente aplicáveis e apresentam resultados satisfatórios já comprovados. A poluição difusa, por sua vez, devido ao seu caráter sazonal e por atingir extensas áreas, envolve o manejo de toda a bacia de drenagem através de uma série de medidas mitigadoras bastante específicas em função da fonte de origem, do tipo de transporte, do regime das chuvas e das atividades humanas desenvolvidas.

Ao contrário das fontes pontuais, as fontes difusas atingem áreas extensas, em pequenas concentrações, mas com conseqüências crônicas ao meio ambiente. MARTINI e LANNA (2003) discutem medidas compensatórias

apresentadas como alternativas para controle da poluição agrícola não pontual e avaliam as possibilidades e limitações para sua utilização.

A consideração do ecossistema como um complexo multidimensional socioeconômico e ecológico tem reforçado que o manejo dos mesmos deve ser realizado com base em uma abordagem holística, interdisciplinar e multidimensional da teoria ecológica. Alterações ambientais induzidas pelo homem, dependendo da magnitude e da rapidez com que atuam, podem comprometer a plasticidade comportamental dos organismos e a resiliência do sistema. A não percepção, em tempo hábil, das modificações nos ecossistemas, resultantes das atividades antrópicas associadas ao uso e ocupação dos solos, tem determinado a utilização de análises ambientais não convencionais para prever e avaliar os efeitos destas atividades na perspectiva do manejo dos mesmos (SANTOS, 2000).

### **3.3 - EROÇÃO EM ÁREAS AGRÍCOLAS: CAUSAS E CONSEQÜÊNCIAS**

A erosão do solo agrícola tem se caracterizado como um dos mais preocupantes problemas causados pela agricultura tanto da perspectiva dos efeitos ambientais quanto dos problemas causados à própria produção agrícola (MARTINS e COIADO, 2001).

A agricultura, ao mesmo tempo em que assegura a provisão de alimentos e fibras, dada a tecnologia em uso, pode degradar sua própria base produtiva natural (impactos "in-situ"), bem como o meio ambiente fora da área agrícola (impactos "ex-situ") através da geração de subprodutos indesejáveis. Estes subprodutos podem ser divididos em duas grandes categorias: os sedimentos propriamente ditos, originados através do processo de erosão do solo, e os resíduos de agroquímicos (fertilizantes e agrotóxicos) que associados às partículas do solo e ao movimento das águas podem atingir os recursos hídricos superficiais ou subterrâneos e impactar os ecossistemas naturais remanescentes.

Em síntese, pode-se afirmar que o processo de erosão das terras agrícolas pode ocasionar impactos em dois grandes setores de atividade:

- o Setor agrícola
- o Setor não – agrícola

Os impactos atingem, principalmente, o ambiente aquático e sua biota, os reservatórios de água para abastecimento e geração de energia elétrica, a navegação, a pesca, entre outros, irradiando efeitos indesejáveis a uma série de setores que dependem dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade aceitáveis, ou que estão em contato direto com os mesmos.

Em terras utilizadas para fins agrícolas existem diversos tipos de manejo que podem alterar algumas das propriedades físicas e/ou químicas do solo, tendo por consequência a perda da fertilidade que levará à diminuição da produtividade e resistência à erosão, acarretando perdas de solo e água cada vez maiores.

Perdas de nutrientes e matéria orgânica, alterações na textura, estrutura e quedas nas taxas de infiltração e retenção de água são alguns dos efeitos da erosão sobre as características do solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

A perda de solo, provocada pela erosão, reduz a produtividade da terra, principalmente, devido a perda de nutrientes e a degradação de sua estrutura física (WOLMAN, 1985). FERRAZ DE MELLO *et al.*, (1989) apontam a importância dos processos erosivos nas perdas de nutrientes do solo. A compensação das perdas de nutrientes, normalmente, se faz pela reposição de fertilizantes industriais no solo.

Nos últimos 40 anos, cerca de um terço dos solos agrícolas mundiais deixaram de ser produtivos do ponto de vista agrícola, devido à erosão.

Atualmente, no Brasil, devido à erosão agrícola, para cada tonelada de grãos colhidos, dez toneladas de solo são arrastadas pelas chuvas, assoreando rios, lagos e barragens. Com o solo perdendo fertilidade há o aumento do uso de fertilizantes. Em média, 50% destes nutrientes não são absorvidos pelas plantas e desperdiçados (WALDERNAR, 2000)

A utilização de adubos sintéticos, em larga escala, tem gerado sérios problemas de qualidade das águas superficiais devido, principalmente, à perda de nutrientes por solos erodidos (TELLES, 1999).

### **3.3.1 - Aporte de nitrogênio aos recursos hídricos de áreas agrícolas**

Com a agricultura moderna, observou-se um aumento no emprego de adubos minerais e orgânicos.

Dentre os nutrientes com potencial poluidor encontra-se o nitrogênio (N), que é um nutriente essencial para as plantas e o mais aplicado na agricultura. O nitrogênio, em elevada concentração na água, contribui com a eutrofização e também pode afetar a saúde humana (DANIEL *et al.*, 1998).

Muitos estudos têm envolvido a qualidade da água superficial e a erosão do solo, mostrando que um dos principais mecanismos de perda de nutrientes dos ambientes é através da erosão hídrica do solo, uma vez que eles são transportados pela enxurrada, associados aos sedimentos ou dissolvidos na água (GBUREK e SHARPLEY, 1998).

A perda de nitrogênio via enxurrada pode ocorrer tanto na forma solúvel como na forma particulada (N orgânico + N mineral ligado ao sedimento). As formas solúveis de nitrogênio, principalmente o nitrato, são normalmente encontradas em baixas concentrações no escoamento superficial, enquanto que o N particulado é a principal forma de N transportado via superfície (GBUREK E SHARPLEY, 1998).

O nitrogênio é um nutriente que apresenta outras peculiaridades que dificultam ainda mais o seu manejo, originadas das múltiplas e complexas reações bioquímicas que influenciam a sua dinâmica, disponibilidade e eficiência no aproveitamento pelas plantas.

Para entender a complexidade dos processos envolvidos no aporte de nitrogênio, a partir de culturas agrícolas, aos recursos hídricos, torna-se essencial explorar as diversas transformações e interações envolvidas no ciclo do nitrogênio, tanto no solo como na água.

No solo, o ciclo natural do elemento se dá a partir da fixação do mesmo a partir da atmosfera e da decomposição de restos vegetais e animais em superfície.

Algumas bactérias associadas, principalmente, nas raízes de leguminosas (gênero *Rhizobium*), e outras de vida livre, possuem a capacidade de fixar o elemento a partir da atmosfera. Esse nitrogênio, na sua forma molecular é convertido a amônia ( $\text{NH}_3$ ) e posteriormente, ao íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). Este íon amônio é transformado, pela ação de bactérias específicas, a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e então a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), por bactérias do gênero *Nitrossomonas* e *Nitrobacter*, respectivamente. O nitrato é a forma mais assimilável pelas raízes das plantas, representando grande importância na nutrição vegetal. O processo de conversão do amônio a nitrato chama-se nitrificação.

Parte do nitrato produzido é convertido, novamente, a nitrogênio molecular, que é um gás, e volta a atmosfera. Este processo chama-se desnitrificação e é conduzido pela ação de bactérias, tais como *Pseudomonas* e *Clostridium*, em ambiente anaeróbico. Estas bactérias utilizam nitratos alternativamente ao oxigênio como forma de respiração e libertam para a atmosfera o nitrogênio molecular.

No processo de decomposição de organismos vivos sobre o solo ou incorporados a ele, algumas bactérias e fungos fazem a conversão da matéria orgânica em amônio, dando continuidade ao ciclo.

A aplicação de adubos nitrogenados ao solo deve levar em consideração o nível de fertilidade do solo, a melhor forma de aplicação, os atributos físicos e químicos do solo, entre outros. As diferentes formas de fertilizantes nitrogenados, bem como os diversos métodos de aplicação, condicionarão a maiores ou menores perdas do elemento do sistema.

O nitrogênio, em suas diversas formas no solo, pode ser perdido pela lixiviação, volatilização, na água da enxurrada e nos sedimentos erodidos.

Considerando que a água da chuva apresenta dois caminhos prováveis - a infiltração e o escoamento superficial - pode-se prever que o nitrogênio poderá alcançar sistemas sensíveis, como rios, lagos e águas subterrâneas.

No meio aquático essas formas nitrogenadas continuarão a sofrer inúmeras reações e participam das relações ecológicas atuantes.

Naturalmente, o ciclo do nitrogênio em meio aquático se dá da seguinte forma (ESTEVEZ, 1988):

-o nitrogênio é fornecido através da lavagem da água da chuva, material orgânico e inorgânico de origem alóctone e a fixação de nitrogênio molecular dentro do próprio ambiente.

-em meio aquático podem ser encontradas as seguintes formas nitrogenadas: nitrato, nitrito, amônia, íon amônio, óxido nitroso, nitrogênio molecular, nitrogênio orgânico dissolvido (peptinas, purinas, aminoácidos etc), nitrogênio orgânico particulado (bactérias, fitoplâncton, zooplâncton, detritos etc)

-durante a decomposição da matéria orgânica dissolvida e particulada dá-se a formação da amônia que, em pH ácido ou básico é convertida, por hidratação, ao íon amônio (amonificação)

-o amônio então, é reduzido a nitrito e nitrato por bactérias específicas (nitrificação)

-o nitrato formado pode ser reduzido a nitrogênio molecular, assimilado pelos produtores primários ou ainda reduzido a amônio (desnitrificação), completando o ciclo.

As formas e concentrações de compostos nitrogenados fornecidos aos ecossistemas aquáticos através das diversas atividades antrópicas (poluição pontual e difusa) introduzem desequilíbrios no ciclo como um todo e influenciam toda a gama de inter - relações ecológicas dependes no ambiente. Um aumento nas formas assimiláveis de nitrogênio pelos produtores primários poderá implicar em um super crescimento destas comunidades, aumentando o consumo de oxigênio dissolvido, comprometendo a penetração de luz solar, causando mortandade de organismos, e levando até mesmo a degradação completa e irreversível do sistema.

### **3.4 - MODELOS DE PREDIÇÃO DE PERDA DE SOLO**

Entre 1890 e 1947, a ciência limitava-se ao entendimento e à descrição qualitativa dos principais fatores que afetam o processo erosivo. Os trabalhos naquela época já reconheciam a complexidade do processo erosivo e foram os

primeiros a definir os fatores que influenciam no mecanismo, tais como: erodibilidade do solo, erosividade da chuva e da enxurrada e, da proteção da cobertura vegetal.

Trabalhos que abordam quantitativamente a questão da erosão começaram a ser desenvolvidos na década de 1930 e culminaram no desenvolvimento da "Equação Universal de Perda de Solos" – EUPS (WISCHMEIER e SMITH, 1965), um modelo estatístico.

Foi estabelecida com base em dados estudados em mais de 10000 lotes em 50 localidades situadas em 24 estados americanos (as rampas foram definidas como área de 22,10 m de comprimento por 1,80m de largura e 9% de inclinação), com características distintas de clima, solo, relevo e cultivo, submetidos, exclusivamente, a processos de erosão hídrica superficial do tipo laminar.

A Equação Universal de Perdas do Solo prediz a perda média anual de um solo de um local qualquer, através do produto de suas variáveis, cujos valores podem ser expressos numericamente, sendo representada pela equação a seguir:

$$A = R.K.L.S.C.P$$

onde:

A é a perda média anual de solo em  $t.ha^{-1}.ano^{-1}$  ;

R é o fator erosividade da chuva em  $MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$  ;

K é o fator erodibilidade do solo em  $t.ha.h.ha^{-1} .MJ^{-1} .mm^{-1}$ ;

L é o fator comprimento do declive;

S é o fator grau do declive;

C é o fator uso e manejo, e

P é o fator prática conservacionista.

As variáveis L,S,C,P são adimensionais.

A partir da EUPS, diversos modelos estatísticos e estocásticos foram desenvolvidos e aperfeiçoados com o intuito de estimar erosão hídrica. Dentre eles, pode-se citar a "Modified Universal Soil Loss Equation" - MUSLE (1975), a "Revised Universal Soil Loss Equation" - RUSLE (1990) (ambas desenvolvidas a partir da EUPS, o ANSWERS - "A model for Watershed Planning" (1980), o Chemicals, Runoff, Erosion and Agricultural Management Systems - CREAMS (1981), o "Integrated Land and Watershed Management Information System" - ILWIS (1988), o "Water Erosion Prediction Project" - WEPP (1989), o "Agricultural Nonpoint Source" - AGNPS (1989), o Semi-Distributed Land Use-Based Runoff Processes - SLURP (1997), entre outros.

A aplicação de modelos vem afirmar a tendência mundial de se abordar problemas ambientais de forma quantitativa (BOUMA, 1989). Como consequência, alguns dos modelos citados anteriormente procuram estimar não só as perdas de solo nas áreas agrícolas (impactos *in-site* da erosão), como era a abordagem principal dos primeiros modelos, como também buscam prever os efeitos da erosão nos cursos d'água que compõem a bacia hidrográfica agrícola (impactos *off-site*). Embora diversos autores tenham encontrado dificuldades em aplicar modelos de erosão em bacias hidrográficas, devido às suas diversas irregularidades (relevo, solos, cobertura vegetal), muitos avanços têm sido alcançados na aplicação nesta escala, inclusive incorporando ferramentas com os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Sistemas Inteligentes.

Apesar do esforço despendido na determinação dos fatores da EUPS no Brasil, o banco de dados existente no país ainda é insuficiente para sua utilização generalizada. Entretanto, sua aplicação é possível para algumas regiões, onde os parâmetros são disponíveis.

### **3.5 - MÉTODOS DE PESQUISA EM EROSÃO DOS SOLOS**

Os métodos de pesquisa utilizados para estudar a erosão pela água compreendem grande número de técnicas e procedimentos diferentes. Para



BERTONI E LOMBARDI (1990), a erosão reflete diretamente nos âmbitos físico, social e econômico e, os mesmos influenciam o processo erosivo.

Entre os fatores físicos pode-se destacar:

- características de intensidade, duração e frequência das chuvas;
- características físicas e químicas dos solos
- características da vegetação;
- influência do clima, vegetação e solo sobre a erosão e a enxurrada;
- efeito das práticas vegetativas, edáficas e mecânicas sobre as perdas de solo e água;
- efeitos econômicos das diferentes práticas e sistemas de manejo.

Vários são os experimentos de campo para estudar o fenômeno da erosão, podendo-se citar:

- os sistemas de talhões com calhas coletoras de enxurrada sob chuva natural com situações variadas de tipo de solo, cobertura vegetal e práticas de preparo e manejo;
- utilização de simuladores de chuvas em situações variadas de duração, intensidade e frequência de chuvas, tipo de solo, cobertura do solo, preparo e manejo;
- estudo de pequenas bacias hidrográficas;
- estudos do movimento da água na superfície do solo, o movimento através de seu perfil, a absorção, a evaporação e uso da água pelas culturas;

### **3.5.1 - Utilização de parcelas experimentais e simuladores de chuva**

Para soluções imediatas de alguns problemas agronômicos de caráter prático, as determinações das perdas de solo são realizadas no campo, de forma a repetir o mais aproximado possível as condições naturais da área. No entanto, alguns fatores intervenientes no processo erosivo apresentam limitações, como é o caso de experimentos com chuva natural. Neste caso, o auxílio de um equipamento simulador de chuvas se faz necessário e é muito útil.

Esses simuladores permitem obter em curto espaço de tempo grande quantidade de dados que, em condições naturais, além de demandar muito tempo, estariam expostos as constantes variações e mudanças, dificultando as conclusões.

De acordo com GUERRA (2005), os simuladores de chuva podem ter dimensões variadas e características diferenciadas, mas o princípio de uso desses equipamentos torna os simuladores mais ou menos semelhantes entre si. Trata-se de aparelhos que, como o próprio nome sugere, simulam chuvas em intensidades e quantidades desejadas pelo pesquisador. Eles devem estar a uma altura determinada do solo para que as gotas de chuva possam atingir a velocidade terminal, ou seja, bem semelhante à de uma chuva natural. Os simuladores podem ser utilizados tanto no campo como em laboratório, ou em ambos.

As críticas feitas ao uso de simuladores no campo estão relacionados à certa dificuldade de transporte e operação e ao suprimento de água (MORGAN, 1986). O vento também pode ser um fator limitante na sua operação, além da possibilidade de ocorrer uma chuva natural, durante o experimento, o que resultaria na paralisação do ensaio.

Porém, esses aparelhos vêm sendo cada vez mais utilizados por pesquisadores no mundo todo. Suas principais vantagens são as de produzir chuvas com a intensidade desejada e possibilitar a replicagem dos experimentos, quantas vezes forem necessárias, além de independender da

ocorrência de chuvas naturais, para realizar estudos que ampliem os conhecimentos sobre os processos erosivos.

Entre os métodos de estudo da erosão, os métodos diretos consistem nos mais apropriados e são, em geral, conduzidos em parcelas experimentais de dimensões pré-determinadas de acordo com o interesse da pesquisa.

As parcelas, acopladas a calhas ou reservatórios coletores da enxurrada, tem sido bastante utilizados para a determinação das perdas de água e solo por erosão em diversos países. Elas devem ser suficientemente grandes para que os dados obtidos tenham a melhor representatividade possível (BERTONI E LOMBARDI, 1999).

As parcelas de erosão são utilizadas, principalmente, em estudos da erosão por arrastamento superficial, que é a forma de erosão mais importante e, portanto, decisiva ao planejamento em áreas agrícolas.

Ao determinar as perdas de solo por arrastamento superficial pode-se estudar mais profundamente o efeito global das características do solo, da cobertura vegetal, dos tipos de preparo e das práticas de manejo. Em campo é exatamente esta análise das perdas globais por erosão superficial que interessam.

A determinação das perdas de solo por erosão poderá ser realizada de duas formas: quantitativa e qualitativa

Quantitativamente, a determinação se faz a partir da medição do volume e intensidade do escoamento e, qualitativamente, pela análise das substâncias e elementos transportados no sedimento erodido.

### **3.5.2 - Utilização de traçadores para a estimativa de perda de solo por erosão**

De acordo com MORRIS & MOONEY (2002), o uso de traçadores representa um método rápido, pouco oneroso e muito eficiente. Entre os diversos tipos de traçadores estão as esferas tingidas por diferentes colorações, como por exemplo, a tintura catiônica *azul de metileno*. Os mesmos autores concluíram,

através de experimentos com blocos intactos de solo, que a utilização de traçadores marcados com colorações específicas tem-se tornado um método preferencial em relação aos métodos empíricos para estimativas de fluxos preferenciais de água verticalmente infiltrada no solo.

Além disso, a marcação de esferas (que podem ser partículas de solo ou outro material, de acordo como os objetivos da investigação) pode ser utilizada com sucesso quando em parceria com sistemas de análise digital de imagens de solo.

Muitos autores produziram estudos utilizando o sistema de coloração/ contraste para marcar os fluxos preferenciais da água infiltrada no solo, sob diferentes condições (NORTCLIFF *et al.*, 1992; GOLABI *et al.*, 1995; DROOGERS *et al.*, 1998). É extensa a literatura internacional a respeito do uso de traçadores físicos (poliestireno branco, fragmentos de rocha) e traçadores de contraste na obtenção de imagens digitais (tintura azul de metileno, Brilliant Blue, fluorescência). Porém, seu uso está praticamente sempre relacionado a investigações no campo de infiltração (vertical) de água e solutos no solo. Além disso, os estudos estão limitados basicamente a escala laboratorial. Destacam-se os trabalhos de SCHINCARIOL *et al.*, (1993); PHILIP *et al.*, (1994); MIDDLETON *et al.*, (2000).

Com relação ao uso de traçadores físicos na investigação de processos erosivos cita-se o recente trabalho de ZHANG *et al.*, (2004), que utilizaram uma mistura de cascalho (3-4mm X 3-4mm X 1,5- 2 mm de diâmetro) e solo em *plots* abertos em uma área agrícola, a fim de monitorar o deslocamento horizontal (no declive) e lateral de solo, após eventos de precipitação. Ao final do experimento, os traçadores que migraram da parcela experimental (*plot*) foram localizados, e após lavagem e secagem em estufa, tiveram o peso determinado. O solo transportado (erosão) foi mensurado a partir do deslocamento dos traçadores a partir da expressão matemática desenvolvida por LOBB *et al.*, (1995,1999). Com base na observação dos traçadores e resultados obtidos, os autores propuseram mudanças importantes quanto ao tipo de manejo agrícola utilizado na área em questão, no sudoeste da China.

### 3.5.3 - Outros métodos empregados para estimativa de perda de solo por erosão

A necessidade de métodos inovadores para avaliar a erosão dos solos dirigiu atenção especial ao uso de radionuclídeos, em particular o uso de  $^{137}\text{Cs}$  para a obtenção de estimativas de erosão e deposição em solos agrícolas (ZAPATA, 2003). Vários radionuclídeos, principalmente os que emitem raios gama, tem sido utilizados para estudos de erosão ( $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{110}\text{Ag}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ).

Muitas pesquisas têm mostrado claramente o potencial de uso do radionuclídeo  $^{137}\text{Cs}$  como traçador em estudos de erosão e sedimentação. A técnica tem sido utilizada por vários grupos de pesquisa, principalmente em países desenvolvidos e recentemente em países em desenvolvimento, incluindo o Brasil (BACCHI *et al.*, 2003; LIBARDI *et al.*, 1999). O  $^{137}\text{Cs}$  é um radionuclídeo artificial, com tempo de meia-vida de 30,12 anos, produzido por fissão nuclear. A distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  no ambiente começou por volta dos anos 50 e início dos anos 60, através de testes nucleares, sendo transportado para a atmosfera, distribuído globalmente e posteriormente depositado na superfície através da precipitação pluvial (*fallout*).

De acordo com CORRECHEL *et al.*, (2003), estudos básicos demonstram uma rápida e forte adsorção do elemento nos horizontes superiores do solo (argilas), e apresenta baixa migração vertical em solos pouco perturbados após o *fallout*. As diferenças nos estoques de  $^{137}\text{Cs}$  dos perfis de solo, até a profundidade alcançada pelos implementos agrícolas, em relação aos observados em perfis de referência, não erodidos ou muito pouco erodidos após o *fallout*, permitem avaliar as taxas de perda de solo por erosão hídrica em condições locais. Existem certas limitações quanto ao uso desta técnica em países do hemisfério sul, sendo uma delas a deposição histórica do elemento sobre a superfície terrestre, que ocorreu basicamente no hemisfério norte, no final da década de 50.

LIU *et al.*, (2004) apresentam uma técnica baseada na utilização de elementos terrestres raros como traçadores na avaliação da erosão (REE- Rare Earth Element: Tracer Method). O REE pode ser utilizado para quantificar a distribuição da erosão de solos em áreas específicas e determinar as fontes de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas.

Os autores avaliaram a aplicação do método em campo e em laboratório sob condições naturais de precipitação e simulação da mesma, utilizando sete elementos traçadores: La, Ce, Nd, Sm, Eu, Dy e Yb. O procedimento básico foi preparar, distribuir e incorporar uma mistura homogênea de elementos terrestres raros e solo em vários *plots*, dentro de uma área erosiva. Depois de eventos de precipitação os sedimentos são coletados, a partir de um tanque que armazena a água de escoamento superficial e partículas de solo erodido, e as quantidades de traçadores são determinadas pela análise de ativação de nêutrons.

A concentração de traçadores foi calculada como indicado na expressão matemática apresentada a seguir:

$$C_j(g/kg) = \frac{KB_j}{y_j}, j = 1, 2, \dots, n \dots\dots\dots(Eq. 1))$$

Onde: n é o número de *plots* ;  $C_j$  (g/kg) a concentração do elemento específico no *plot j* (uma concentração uniforme para a profundidade de erosão esperada);  $B_j$  (g/kg) a concentração no solo dos elementos;  $y_j$  o valor de erosão relativa mais baixo esperado em um *plot j* baseado em experiências especializadas; K a taxa do elemento em relação a concentração do mesmo no solo.

A determinação das taxas relativas de erosão para os diferentes *plots* foi realizada a partir da equação seguinte:

$$\sigma = 1 - \sum_i^n W_j x 100\%; j = 1, 2, \dots, n \dots\dots\dots(Eq. 2)$$

Onde:  $\sigma$  é a taxa relativa de erosão;  $n$  é o número de *plots*;  $W_j$  a erosão calculada no *plot j*;  $W$  o valor total erodido na área experimental.

Os resultados permitiram concluir que a utilização de elementos terrestres raros como traçadores condiciona e facilita a observação da erosão do solo no tempo e no espaço. Os resultados, tanto em laboratório como em campo, em condições naturais e de chuva simulada, mostraram-se satisfatórios. A duração da chuva foi o fator que mais influenciou nas quantidades de solo depositado, já que durante chuvas de longa duração e baixa intensidade a deposição correspondeu a mais que 25% do material erodido, enquanto em chuvas de curta duração e alta intensidade, a deposição correspondeu a menos de 10% do material erodido.

## 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

---

### 4.1 - DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento consistiu em parcelas de erosão, em solo nu e com dois tipos de preparo. Cada parcela recebeu diferentes métodos traçadores do transporte de solo e nitrogênio sob condições controladas. O agente de transporte foi a água, fornecida a partir de um equipamento simulador de chuvas de propriedade do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Foram ajustadas precipitações em intensidades previamente definidas em 3 dias consecutivos.

#### 4.1.1 - Utilização do Simulador de Chuvas

Os ensaios foram planejados para acontecer no período de 3 dias, sendo as intensidades de precipitação desejadas:

1° dia: 30mm/h

2° dia:30mm/h

3° dia:70mm/h

Para que o aparelho simulador de chuvas possa ser utilizado sobre parcelas experimentais é necessário que sejam previamente calibrados, para se conhecer a pressão de água nos bicos e o número de bicos abertos para se obter uma precipitação desejada.

##### 4.1.1.1 - Calibração do simulador de chuvas em campo

O equipamento simulador de chuvas de braços rotativos foi nivelado sobre o terreno de modo que a pressão da água fosse igual em todos os bicos. Sob os braços que sustentam os bicos, foram dispostos sobre o terreno, 80 pluviômetros nivelados entre si, colocados 2,40 m abaixo do nível dos braços, sendo os pluviômetros de 7,0 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os pluviômetros foram



dispostos lateralmente ocupando uma área de 3,5 m de largura e 11 m de comprimento (similares as dimensões das parcelas utilizadas no estudo), ocupando 8 posições no sentido da largura e 12 posições no sentido do comprimento, sendo que a distância entre os pluviômetros foi de 0,50 m no sentido da largura e 1,0 m no sentido do comprimento.

A **Figura 2** mostra o suporte para colocação dos pluviômetros e a localização do equipamento simulador de chuvas.



**Figura 2: Suporte para os pluviômetros e posição do simulador durante a calibração**

O suprimento de água deu-se diretamente de um tanque de capacidade de 4000 L acoplado a um trator. A pressão foi ajustada a partir da rotação do trator.

Com o simulador parado e os 30 bicos abertos foi ligado o suprimento de água. Ajustou-se a pressão a partir da rotação 520 rpm e então foi coletado durante 30 segundos a água de 5 bicos aspersores, sendo um de cada raio, em

braços diferentes. Mediu-se o conteúdo em provetas determinou-se a vazão em L/min. Feito isso, desligavou-se o suprimento de água sem alterar a rotação.

Colocou-se então, os pluviômetros na posição determinada inicialmente e acionava-se o motor para que os braços girassem a uma velocidade de 4 rpm e voltava-se a ligar o suprimento de água, deixando em funcionamento por 2 minutos, cronometrados a partir do início da precipitação.

Encerrada a precipitação, mediu-se o volume de água contida nos pluviômetros em provetas graduadas. A intensidade de precipitação foi obtida pela seguinte fórmula:

$$h=V/A \qquad \qquad \qquad \text{Eq.3}$$

Sendo h= a altura de água em cm;

V= volume médio do 80 pluviômetros dados em mL

A= superfície de coleta dos pluviômetros dada em cm<sup>2</sup>

Multiplicou-se por 10 o resultado obtido para transformar em milímetros (mm) e ajustando-se o tempo de precipitação para 60 minutos, obteve-se o resultado final da precipitação, tanto para os 30 bicos totalmente abertos como para apenas 15 bicos abertos, em mm/h.

A seguir é representada a distribuição dos pluviômetros e os volumes coletados (mL), na calibração do equipamento com os 30 bicos aspersores abertos.

---

<b>11</b>			<b>9</b>			<b>12</b>
-----------	--	--	----------	--	--	-----------

---

<b>8</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
<b>8</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>8</b>
<b>8</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>10</b>
<b>7</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>9</b>
<b>9</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>10</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>7</b>
<b>12</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>7</b>
<b>8</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>11</b>
<b>12</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>13</b>	<b>10</b>
<b>10</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>8</b>

---

<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
-----------	-----------	-----------	----------	----------	----------	-----------

---

Com os trinta bicos abertos a precipitação ajustada foi de 70 mm/h, obtida com a rotação 520 rpm.

A seguir é representada a distribuição dos pluviômetros e os volumes coletados (mL), na calibração do equipamento com apenas 15 bicos aspersores abertos.

<b>4</b>			<b>3</b>			<b>3</b>
<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>5</b>

Com apenas 15 bicos abertos a precipitação ajustada foi de 30 mm/h, na rotação 520 rpm.

O coeficiente de uniformidade foi calculado pela fórmula de CHRISTIANSEN (1942):

$$C.U = 100 \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^n (xi - YI)}{Y.n} \right)}{Y.n} \quad Eq.4$$

Onde:

C.U= Coeficiente de uniformidade, em %.

$\sum_{i=1}^n (xi - YI)$  = somatórios dos valores individuais dos pluviômetros em relação a média

Y= média das observações

n= número de pluviômetros

O coeficiente de uniformidade da precipitação de 70 mm/hora (com todos os bicos abertos) foi de 85%.

Já, na precipitação de 30 mm/h (com apenas a metade bicos abertos), o coeficiente de uniformidade foi de 82%.

Coeficientes de uniformidade superiores a 80% podem ser considerados como precipitações de boa distribuição espacial, atingindo por igual toda a extensão da parcela. No presente trabalho as distribuições foram de 85% e 82% representando resultado satisfatório ao tipo de experimento a ser realizado.

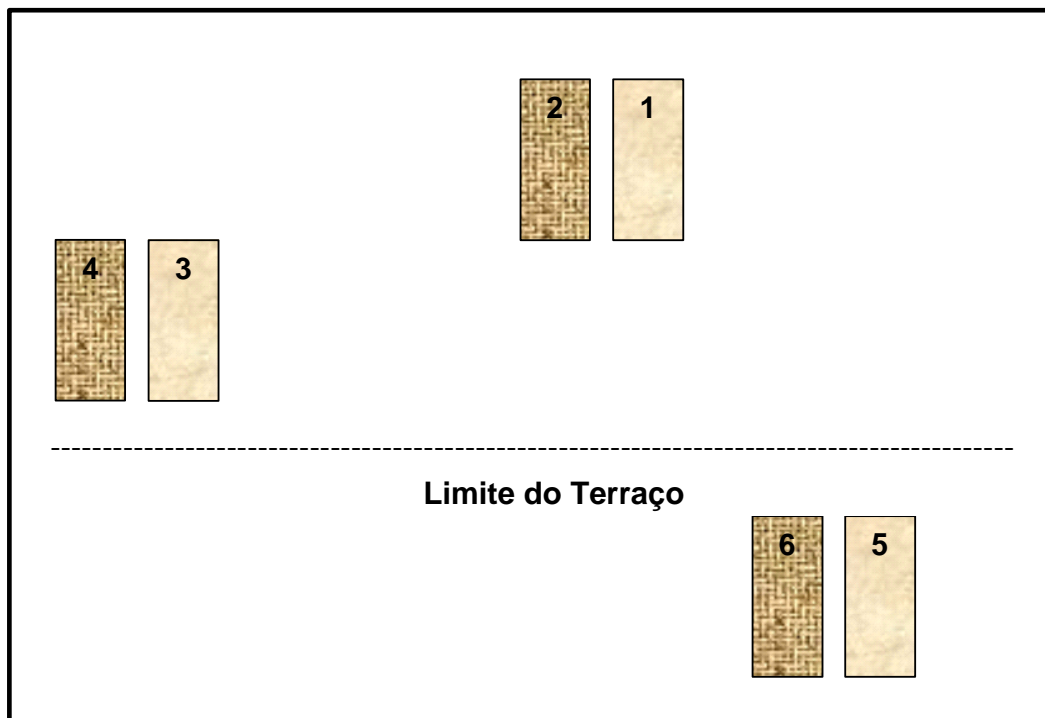
#### **4.1.2 - Tipo de solo, localização, disposição espacial, cobertura e tipos de preparo do solo das parcelas experimentais.**

A partir do Mapa Pedológico do Estado de São Paulo foi possível distinguir os tipos de solo mais representativos no estado. Dentre estes, atenção especial foi dada ao Latossolo Vermelho-Amarelo como base para os ensaios preconizados neste estudo.

Além disso, trata-se de solo altamente representativo dentro dos limites da área de estudo (Fazenda Canchim - EMBRAPA Pecuária Sudeste). A escolha ainda levou em consideração o grande interesse agrícola nestes solos, já que ocupam área de declives suaves, ótimos para a mecanização, entre outros atrativos. Além dos interesses agrícolas, foi considerado o fato da necessidade de utilização de caminhões pesados e inúmeras viagens do mesmo durante a execução dos ensaios com chuva simulada, podendo ser verificado nos requisitos necessários para a escolha da área experimental, apresentados a seguir:

- facilidade de acesso a veículos pesados (tratores, caminhões e tanques);
- não interferência com pesquisas em andamento, de responsabilidade dos pesquisadores da Embrapa Pecuária Sudeste;
- proximidade de fontes de abastecimento de água.

A disposição espacial das parcelas seguiu o pressuposto de que nenhuma parcela poderia estar posicionada na rota de fluxo de outra parcela, para evitar qualquer tipo de possível interferência. Assim, elas foram distribuídas no sentido da declividade, porém em posições paralelas umas as outras, conforme indicado no esquema apresentado na **Figura 3**.



**Figura 3: Distribuição espacial das parcelas**

Conforme observado na figura anterior as parcelas são numeradas de 1 a 6 e dispostas em pares (3 pares). Teoricamente, esses pares são considerados idênticos, seguindo-se a mesma metodologia de trabalho em cada um deles, de forma que os dados extraídos possam ser analisados estatisticamente. A análise estatística originará informações relevantes quanto a reprodutibilidade do experimento e, conseqüentemente, quanto a representatividade e confiabilidade dos dados extraídos.

O solo, em cada parcela, foi mantido sem cobertura vegetal e com 2 tipos de preparo:

**-solo raspado:** com o auxílio de uma lâmina metálica foi removido cerca de um centímetro de superfície do solo, coberto por gramíneas

**-solo arado:** inicialmente a vegetação foi removida e então procedeu-se a aplicação da aragem e gradeamento do solo (técnicas convencionalmente utilizadas).

Uma parcela em cada par recebeu a raspagem superficial (parcelas 1, 3 e 5) e a outra recebeu a aragem e gradeamento (parcelas 2, 4 e 6).

As parcelas com solo raspado cumprem a necessidade de se avaliar os traçadores em condições “naturais” do solo, ou seja, sem influência das técnicas de preparo e da cobertura vegetal.

#### **4.1.1.1 - Instalação das parcelas**

As dimensões utilizadas foram ajustadas a partir da parcela tradicional de WISHMEIER, que originalmente possui 25 m de comprimento por 4 metros de largura.

As parcelas de erosão apresentaram dimensões de 3,0 m de largura por 11,0 m de comprimento, apropriadas para estudos de erosão com o simulador de chuva de braços rotativos (SWANSON, 1965). e coerentes com os ensaios que seriam realizados (traçadores, perda de solo, rugosidade).

Cada parcela recebeu, na extremidade inferior da declividade, um reservatório de água com capacidade de 1000L e tubulação de PVC entre a parcela e o reservatório, para o direcionamento do escoamento superficial.

A **Figura 4** apresenta um par de parcelas padrão utilizadas nos ensaios.







**Figura 4: Par de parcelas padrão utilizadas nos ensaios. A direita observa-se a parcela padrão solo raspado. A esquerda observa-se a parcela padrão solo arado**

#### **4.1.1.2 - Preparação das parcelas**

As parcelas foram preparadas de acordo com cada componente a ser analisado:

- a) Traçador de Erosão (contraste):
- b) Traçador de Nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ )
- c) Perda de solo
- d) Rugosidade

Os detalhes das metodologias aplicadas serão apresentados em ocasião da apresentação dos resultados.

#### **4.2 - INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO**

Os métodos foram utilizados simultaneamente dentro de cada parcela. Portanto, faz-se necessário apresentá-los num mesmo esquema para uma visão integrada do experimento.

A **Figura 5** apresenta o esquema geral de cada parcela

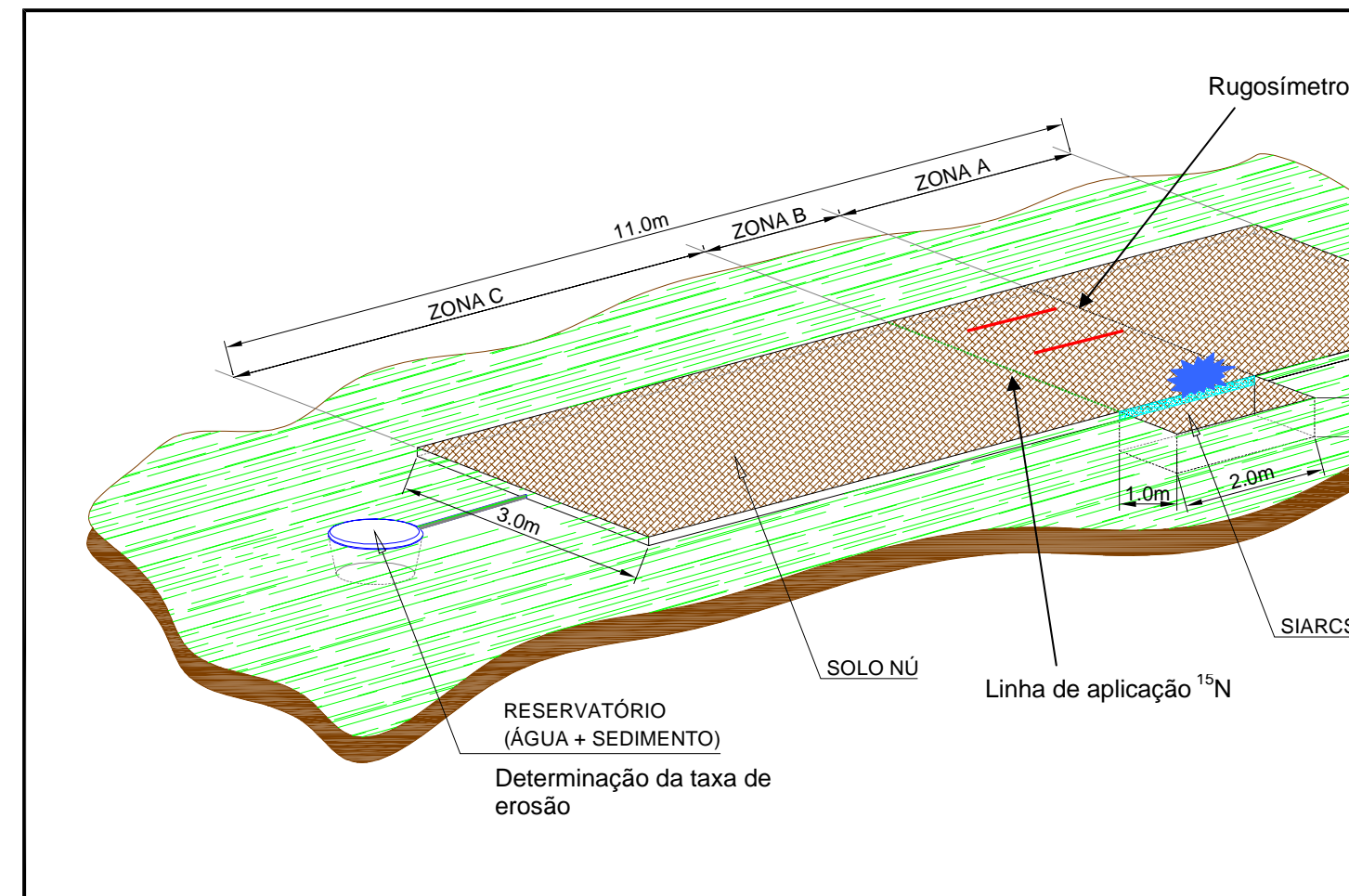


Figura 5: Esquema geral da parcela

### 4.3 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios foram realizados em 3 dias consecutivos. A seguir, são apresentadas as etapas de cada ensaio:

#### 1° dia

- leitura da rugosidade, antes da simulação de chuva, observado na Zona B da figura anterior.
- posicionamento das câmeras para captar as imagens do solo marcado com o azul de metileno, através da parede de acrílico, observada também na Zona B da figura anterior
- aplicação do Sulfato de Amônio enriquecido em 5% de átomos de  $^{15}\text{N}$ , observado no limite entre as Zonas C e B da figura anterior
- simulação de chuvas em cima de cada parcela. A aplicação foi realizada aos pares, ou seja, posicionando-se o simulador de braços rotativos entre duas parcelas distintas (solo raspado/solo arado). A chuva aplicada foi de 30 mm/h durante 12 minutos.
- leitura da rugosidade
- coleta de amostras após o término da simulação de chuvas: foram coletadas amostras da solução água-sedimento, armazenadas nos tanques de coleta em cada parcela, bem como a determinação do volume total escoado durante o ensaio.

#### 2° dia

- posicionamento das câmeras para captar as imagens do solo marcado com o azul de metileno, através da parede de acrílico, observada na Zona B da figura anterior
- simulação de chuvas em cima de cada parcela. A aplicação foi realizada aos pares, ou seja, posicionando-se o simulador de braços rotativos entre duas

parcelas distintas (solo raspado/solo arado). A chuva aplicada foi de 30 mm/h durante 12 minutos.

- leitura da rugosidade
- coleta de amostras após o término da simulação de chuvas: foram coletadas amostras da solução água-sedimento, armazenadas nos tanques de coleta em cada parcela, bem como a determinação do volume total escoado durante o ensaio.

### **3° dia:**

- posicionamento das câmeras para captar as imagens do solo marcado com o azul de metileno, através da parede de acrílico, observada na Zona B da figura anterior
- simulação de chuvas em cima de cada parcela. A aplicação foi realizada aos pares, ou seja, posicionando-se o simulador de braços rotativos entre duas parcelas distintas (solo raspado/solo arado). A chuva aplicada foi de 70 mm/h durante 6 minutos, caracterizando uma enxurrada.
- leitura da rugosidade
- coleta de amostras após o término da simulação de chuvas:
  - amostras da solução água-sedimento, armazenadas nos tanques de coleta em cada parcela, bem como a determinação do volume total escoado durante o ensaio;
  - amostras de solo na Zona C de cada parcela

Ressalta-se que, a utilização de tempos curtos de ensaio (6 e 12 minutos) foram necessários para a garantir a recuperação dos traçadores utilizados. O total precipitado sobre as parcelas foi de 19mm.

### **4.3.1 - Análise Estatística**

No intuito de avaliar a similaridade dos dados obtidos em cada par de parcelas (3 repetições) e, conseqüentemente, a confiabilidade dos dados obtidos, foram realizadas análises estatísticas apropriadas para cada caso. As análises estatísticas utilizadas e as justificativas do seu uso para cada caso foram apresentadas juntamente com a discussão dos resultados obtidos.

# 5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

## CAPITULO 1

### **CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO E DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS INICIAIS DOS SOLOS NAS PARCELAS EXPERIMENTAIS**

#### **BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOGI GUAÇU**

A Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Mogi Guaçu localiza-se na região nordeste do Estado de São Paulo e sudoeste do Estado de Minas Gerais, ocupando uma área de 14.653 Km<sup>2</sup>. O trecho paulista da Bacia do Rio Mogi Guaçu está compreendido entre os paralelos 21°45' e 22°45', e os meridianos 46°15' e 47°45'. Os principais afluentes são os rios Cachoeirinha, Eleutério, Jaguari Mirim, Oricanga, Itupeva, Cloro, do Peixe, do Roque, Quilombo e Mogi Mirim.

A sub-bacia do Médio Mogi-Superior, região onde está situada a microbacia do ribeirão Canchim, concentra índices elevados de vulnerabilidade em relação às águas subterrâneas, pois engloba área aflorante do Aquífero Botucatu-Pirambóia, nos municípios de Descalvado, Luiz Antônio, Santa Rita do Passa Quatro, além de todo o trecho do rio Mogi-Guaçu.

#### **MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO CANCHIM - *situação, extensão e limites***

A microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim está inserida na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Negros, a qual abrange os Municípios de São Carlos e Descalvado. Essa microbacia foi imediatamente selecionada como objeto de estudo

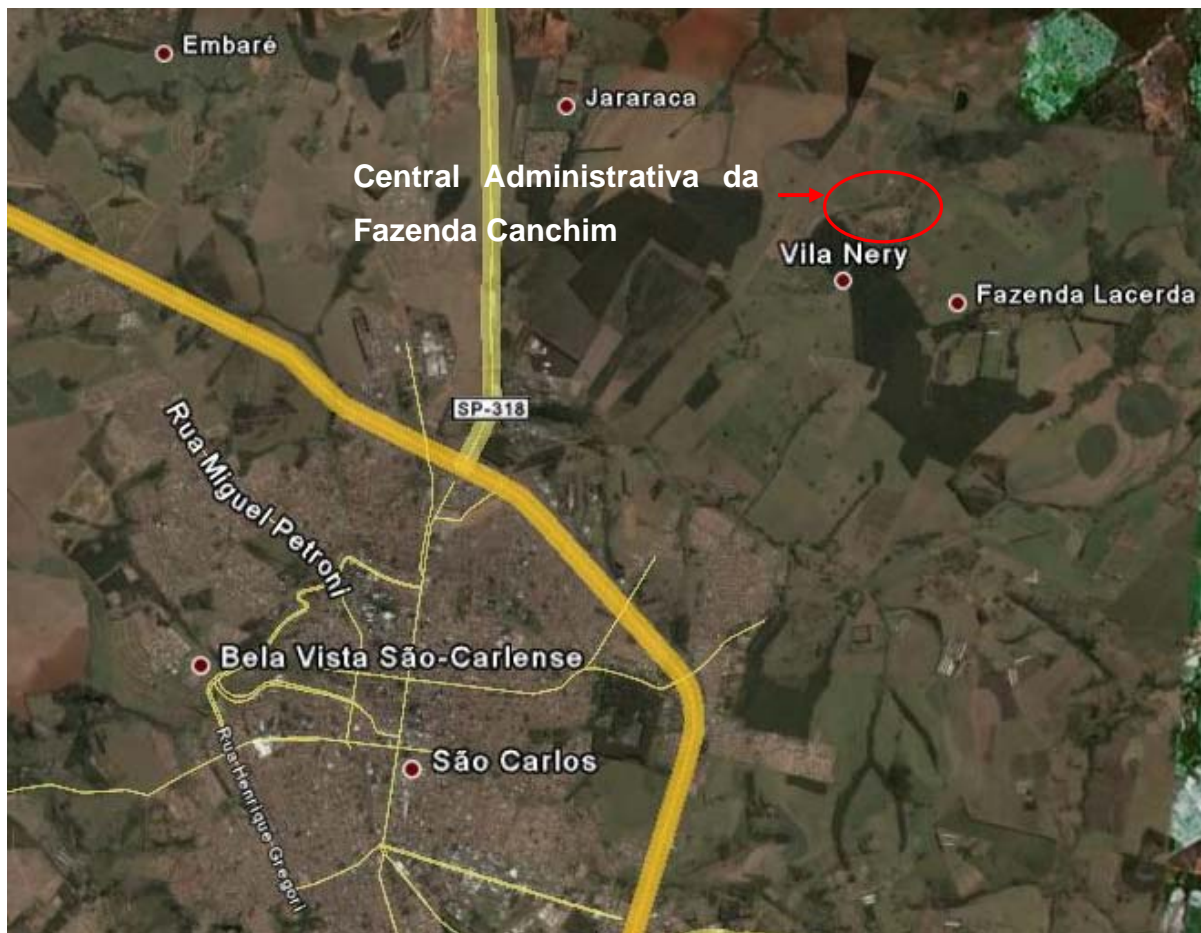


por estar inteiramente inserida na Fazenda Canchim, base física do Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste (EMBRAPA Pecuária Sudeste), facilitando, dessa forma, a realização de experimentos.

A Fazenda ocupa uma área de 2.662 ha e está localizada no sentido norte-nordeste da cidade de São Carlos, no Estado de São Paulo, entre os paralelos 21° 55' a 22° 00' de latitude sul e 47° 48' e 47° 52' a oeste de Greenwich. O Ribeirão Canchim é tributário da Bacia do rio Mogi Guaçu e rio Pardo. Faz limites, ao sul, com Chácara Vale Verde, Chácara Santa Tereza, Sítio Santo Antônio, Chácara dos Coqueiros e fazenda Dois Portões; a leste, com Fazenda Paraíso, Fazenda Morro Alto e Fazenda Primavera; a oeste, com Fazenda Canadá, Universidade Federal de São Carlos, Fazenda Engenho Velho e Fazenda Santa Rosa; e ao norte, com Fazenda Figueirinha e Chácara Santo Antônio (CALDERANO FILHO, 1998).

Estudo realizado no Ribeirão Canchim (PRIMAVESI *et al.*, 1999), para avaliar a qualidade da água próxima a sistemas de produção de leite e corte constatou que, de acordo com a legislação vigente, a qualidade da água enquadra-se nos padrões da classe 2 para a maioria dos parâmetros, com exceção do ferro e fósforo total. Este último enquadra a água como eutrófica, mesmo onde a prática de conservação de água e solo foram consideradas adequadas.

Nos trabalhos de CALDERANO FILHO (1998) e PRIMAVESI *et al.*, (1999) estão relacionadas uma série de informações relativas ao clima, à vegetação, hidrografia, geologia, geomorfologia e pedologia da microbacia.



**Figura 6: Localização da central administrativa da EMBRAPA Pecuária Sudeste (Fazenda Canchim) em relação a malha urbana de São Carlos**

Fonte: Google Earth 2007

### **Geologia e material de origem**

No Planalto de São Carlos ocorrem as seguintes formações geológicas: Botucatu (Grupo São Bento), Serra Geral (Grupo São Bento), Bauru (Grupo Bauru) e formações superficiais (recente)

Na fazenda Canchim aflora a seguinte litologia:

**-Aluviões:** sedimentos argilo-arenosos que ocorrem em planícies de inundação dos rios atuais. Ocorrem na parte NE da fazenda, às margens do ribeirão dos Negros e Canchim.

Esses sedimentos associados ao aporte de material das partes mais altas e aos resíduos orgânicos acumulados progressivamente, deram origem às Areias Quartzosas Hidromórficas, aos Gleis Pouco Húmidos, aos solos aluviais e aos solos orgânicos

**-Arenito Superficial:** ocorre capeando as rochas básicas, nas regiões topograficamente mais elevadas, entre as cotas de 850 a 912 m. Na área, a espessura do pacote é de pouco mais de 20 m, e onde a topografia intercepta este contato há exposição do Diabásio. Esse pacote com menor contribuição do Diabásio deu origem aos Latossolos Vermelho-Amarelo álicos e distróficos e ao Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico e em menor proporção ao Latossolo Vermelho-Escuro textura média.

**-Arenito Botucatu:** rocha constituída por grãos de quartzo arredondados, granulação fina de origem eólica. Aflora na parte norte e noroeste da fazenda. Deu origem às Areias Quartzosas álicas.

**-Diabásio:** rocha magmática intrusiva em arenitos da formação Botucatu, pertencente aos derrames basálticos da formação Serra Geral. Na área da fazenda aflora em forma de S, no sentido leste, oeste e noroeste. Deu origem às classes de solos: Latossolo Roxo, terra Roxa estruturada, latossolo Vermelho-Escuro argiloso, solos litólicos e Latossolos Variação Una.

## **Geomorfologia**

A região faz parte da província geomorfológica “Cuestas Basálticas” . Nesta província afloram, não individualizados, os basaltos e arenitos jurcretáceos pertencentes à formação Serra Geral, e sobre ela, nos níveis topográficos de cimeira, expõem-se os arenitos, siltitos e folhelhos da formação Botucatu e os arenitos e conglomerados basais do Grupo Bauru, com eventuais depósitos cenozóicos. O relevo encontra-se em vias de dissecação.

Dentro das regiões de paisagens naturais, apenas o planalto de São Carlos faz parte da fisiografia da área da fazenda. É um planalto residual cunheiforme, com relevo de topos aplainados, com suave caimento topográfico.

Dentro dos limites da fazenda este planalto pode ser dividido em três compartimentos fisiográficos distintos, caracterizados por conjunto variável de cotas, apresentando desníveis em forma de degraus, correspondendo às diferentes camadas de rochas e intercalações dos sedimentos com o Diabásio.

A maior altitude, 912 m, ocorre na parte sudoeste e oeste da área, e a menor, 688 m, na porção norte e nordeste da fazenda.

Dos três compartimentos fisiográficos distintos, a baixada é a que mais se destaca. Encaixada entre as cotas de 688 e 740 m, apresenta relevo suave em quase toda a sua extensão. Na várzea do ribeirão dos Negros, próximo à cota de 688 m, o relevo é plano, sujeito a inundações prolongadas.

Numa posição intermediária, entre as cotas de 750 e 850 m, aflora o Diabásio, que atravessa toda a fazenda em forma de S, no sentido leste-oeste e noroeste.

O terceiro compartimento, entre as cotas de 850 a 912 m, é representado pelo planalto, ocorrendo a formação superficial cenozóica de cimeira, onde se encontram os Latossolos Vermelho-Amarelo textura médio argilosa, sendo que a maioria dos córregos da área tem sua nascente nesta posição acima de 850 m.

## **Vegetação**

Da cobertura natural o cerradão é o tipo predominante, ocupando aproximadamente 16% da área, sendo caracterizado por tipo de vegetação que ocorre em zonas de transição entre o cerrado e a floresta tropical.

O cerrado ocupa 10% da área, sendo caracterizado por formação não-florestal herbáceo-lenhosa e herbáceo-arbustiva, constituindo tipo peculiar de vegetação, em que os elementos se distribuem em nítidos estratos rasteiros, arbustivo e arbóreo.

A floresta tropical subcaducifólia, que ocupa 5% da área, caracteriza-se por perder parcialmente as folhas na estação seca.

Além desses conjuntos, encontram-se ambientes de acumulação dos cursos de água, sujeitos ou não a inundações periódicas, cuja vegetação apresenta fisionomia arbustiva ou herbácea de acordo com a intensidade e duração da inundação, denominados de campo hidrófilo de várzea.

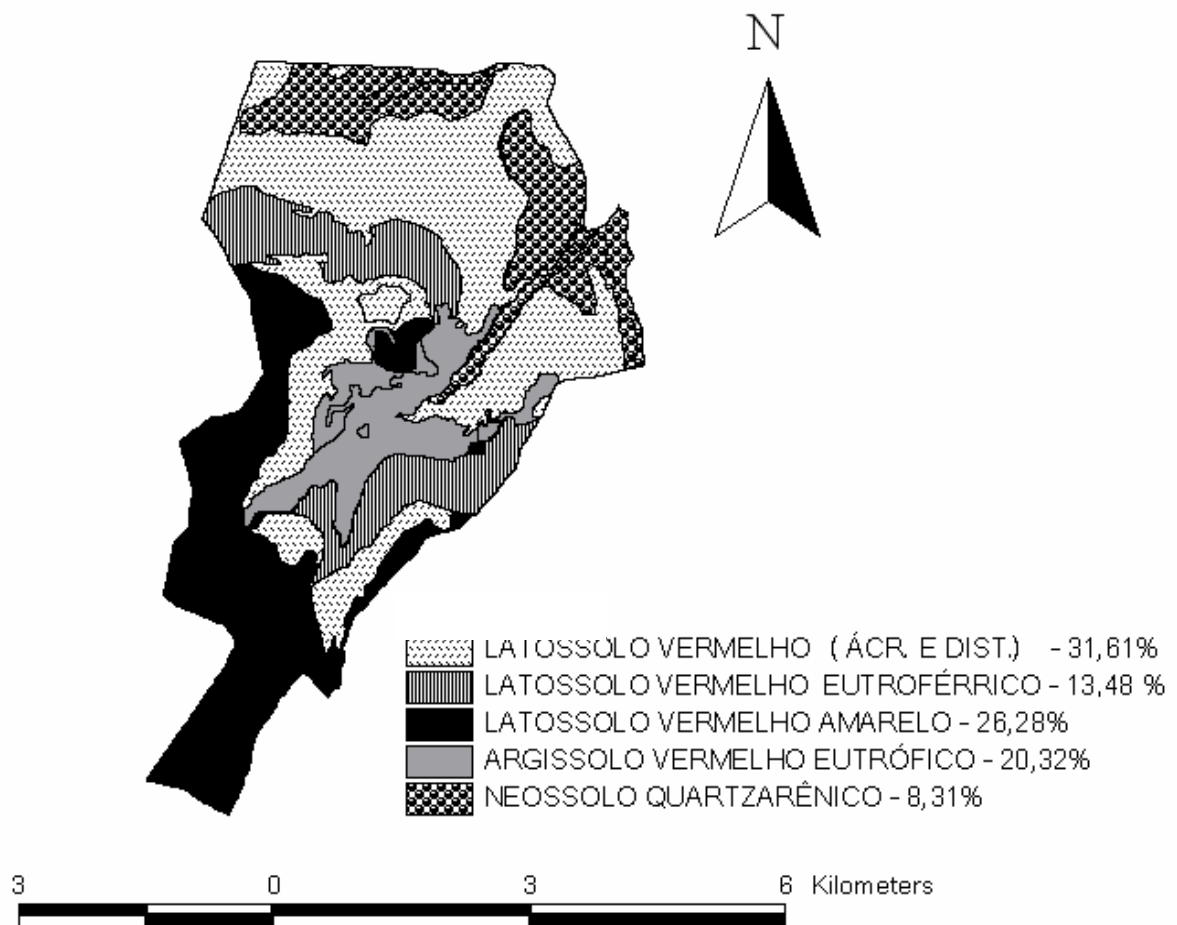
## **Clima**

O clima é tropical de altitude (860 m de altitude na região tropical). O clima da região segundo a classificação de Köppen é do tipo Cwa, clima quente com inverno seco, pois a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e do mês mais quente ultrapassa os 22°C, sendo o total de chuvas do mês mais seco inferior a 30 mm e média, e do mês mais chuvoso superior em dez ou mais vezes.

## **Pedologia**

Na Fazenda Canchim predominam os Latossolos Vermelho-Escuros, sendo encontrados em 34% da área, tanto na parte alta como na baixa, margeando o cinturão de Latossolo Roxo (12,6%) (que na nova classificação aparece junto a classe anterior) e Nitossolos (9,2%), formados sobre rocha basáltica, que chega a aflorar em diferentes pontos. Solos menos consolidados, como Argissolos (1,3%), Neossolo Quartzarênico (13,8%) e Neossolo Flúvico (0,5%), ocorrem nas cotas altimétricas mais baixas. Nas cotas mais elevadas ocorrem os Latossolos Vermelho-Amarelo (20,6%).

A **Figura 7** apresenta o mapa de solos da Fazenda Canchim.



**Figura 7: Mapa de solos da Fazenda Canchim (Silva, 2004 modificado de Calderano Filho, 1998)**

## ÁREA EXPERIMENTAL

A área experimental selecionada para o presente estudo está localizada no domínio dos Latossolos vermelho-amarelo, definido como LVa2 (Latosolo Vermelho-Amarelo Álico, A moderado, textura média, fase cerradão tropical subcaducifólio, declive A).

A **Figura 8** mostra a localização da área do experimento dentro dos limites da Fazenda Canchim.



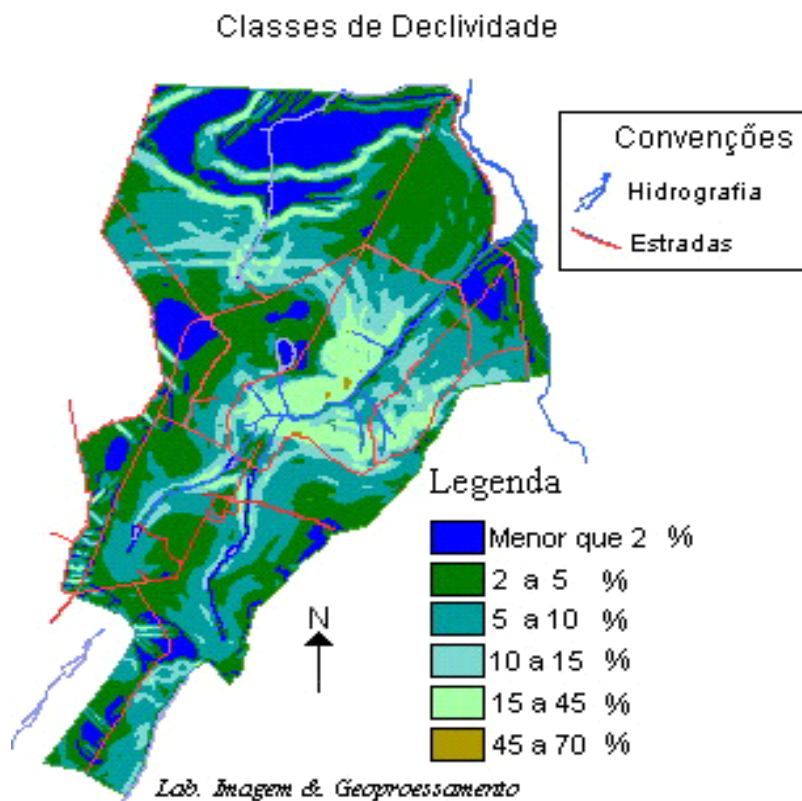
**Figura 8: Localização da área do experimento dentro dos limites da Fazenda Canchim.**

A área em questão foi delimitada em cerca de 0,5 hectare, necessário a instalação das parcelas e manobras com os tratores, caminhões e tanques em ocasião da realização dos experimentos.

Os Latossolos Vermelho-Amarelo Álicos consistem em solos profundos, perfis com mais de 200 cm de profundidade, com horizonte A espesso em torno de 30 cm. A transição entre os horizontes é gradual e difusa, pouco se distinguindo a diferenciação do conjunto de propriedades físicas ao longo do perfil. O gradiente textural de A para B é gradual, e pouco nítida a diferenciação entre os subhorizontes do B.

Apresentam textura média, com teores de argila entre 230 e 330 g Kg<sup>-1</sup> ao longo do perfil. A unidade ocupa 91,49 há, correspondendo a 3,45 % da área total mapeada por CALDERANO FILHO (1998).

O declive A, de acordo com as classes de declive da região representa valores entre 0 e 3%, ou ainda, entre 0 a 1,7 graus. São superfícies planas, em que o escoamento superficial é lento ou muito lento. Não oferece dificuldades para o uso de máquinas agrícolas, não há significativa erosão por água, exceto em encostas muito longas e de solos altamente erodíveis. A **Figura 9** apresenta o mapa de declividades da Fazenda Canchim.



**Figura 9: Mapa de declividades da Fazenda Canchim (Calderano Filho, 1998)**



## **CARACTERIZAÇÃO DE ALGUMAS PROPRIEDADES DOS SOLOS DAS PARCELAS EXPERIMENTAIS ANTES DOS ENSAIOS COM CHUVA SIMULADA**

O entendimento das propriedades do solo assume importância em diversas áreas, como a agricultura, irrigação e, principalmente, no tocante aos processos erosivos. As taxas de erosão são variáveis, sendo determinadas por fatores controladores, tais como erosividade da chuva, propriedades do solo, características das encostas e cobertura vegetal. Devido à interação desses fatores, algumas áreas erodem mais que as outras. O homem pode atuar como agente acelerador ou retardador dos processos erosivos, dependendo do tipo de uso e manejo do solo (BERTONI E LOMBARDI NETO, 1990).

O comportamento de cada solo, exposto a condições semelhantes de relevo, chuva e cobertura vegetal, é diferenciado segundo a condição física do mesmo, que confere maior ou menor resistência à ação das águas. As propriedades físicas dos solos assumem, então, um papel de grande importância, atuando, juntamente com outros fatores como determinantes da maior ou menor susceptibilidade à erosão, regulando a taxa de infiltração, influenciando o escoamento superficial e a resistência do solo ao impacto da gota de chuva. Sendo assim, conhecer as principais propriedades dos solos, torna-se extremamente relevante,

Feitas estas considerações, foram coletadas amostras deformadas de solo das parcelas experimentais para a determinação de algumas propriedades importantes em estudos de erosão. As amostras foram coletadas com o auxílio de um trado em profundidade de 0 -20 cm. Foram ainda coletadas amostras indeformadas com o anel volumétrico para a determinação da densidade do solo.

As partículas do solo são classificadas, conforme seus diâmetros, em areia (2 mm a 50  $\mu$ m), silte (50 a 2  $\mu$ m) e argila (menores que 2  $\mu$ m).

Comumente são utilizados os métodos da Pipeta e do Densímetro para análise granulométrica dos solos. São técnicas relativamente simples e de baixo custo, mas apresentam certas limitações:

- perturbam o meio (partículas em sedimentação);

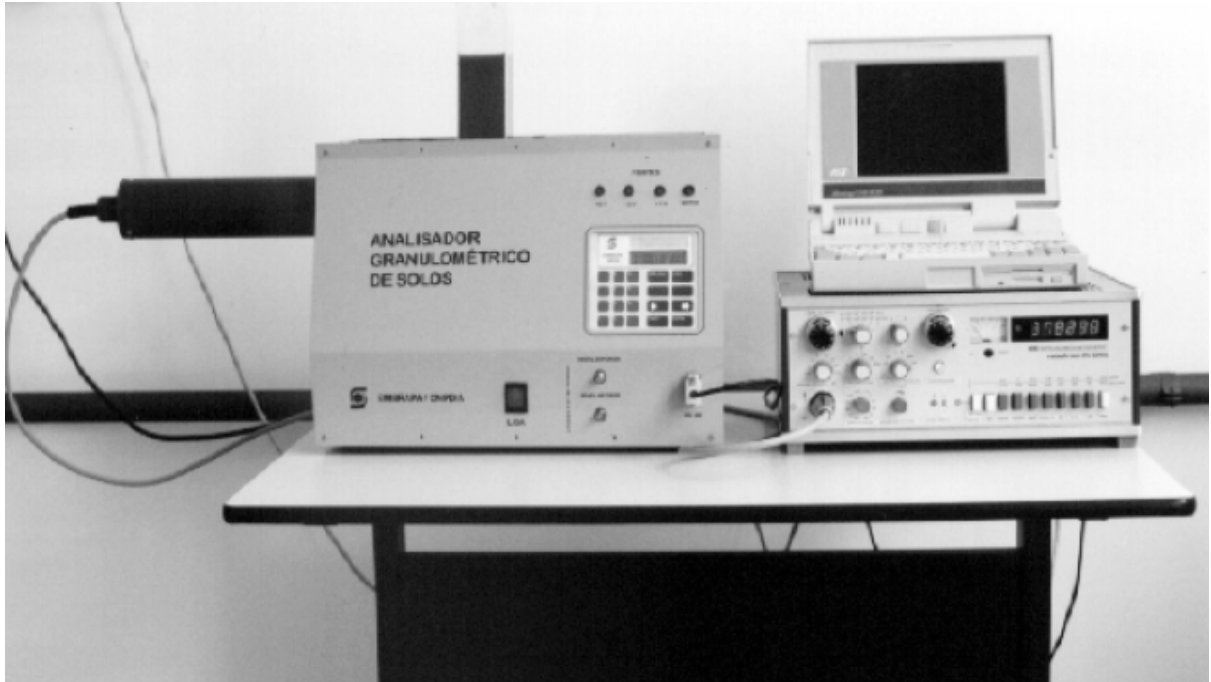
- é necessário a secagem das amostras em estufa, portanto, o tempo de medida é de, no mínimo, 24 horas;
- não possibilitam a determinação detalhada da curva de distribuição do tamanho das partículas;
- a porcentagem de areia é determinada à parte, por peneiramento.

Para eliminar as limitações descritas foi desenvolvido um método (VAZ *et al*, 1992) e um equipamento, o Analisador Granulométrico de Solos (**Figura 10**), para a medida da distribuição do tamanho as partículas do solo, baseados na atenuação de um feixe de raios gama (Lei de Beer-Lambert) e no princípio da sedimentação de partículas em um meio líquido (Lei de Stokes).

As amostras de solo foram então, analisadas com o “Analisador Granulométrico de Solos” e várias características dessas amostras puderam ser determinadas e correlacionadas:

- Concentração de partículas e diâmetro (distribuição do tamanho das partículas);
- Pressão e umidade das sub-amostras (retenção de água no solo)

Os dados gerados no equipamento foram tratados no aplicativo Qualisolo da EMBRAPA, em etapa final de implementação.



**Figura 10: Analisador Granulométrico de Solos**

As amostras foram coletadas antes do preparo do solo nas parcelas.  
Os resultados são apresentados a seguir:

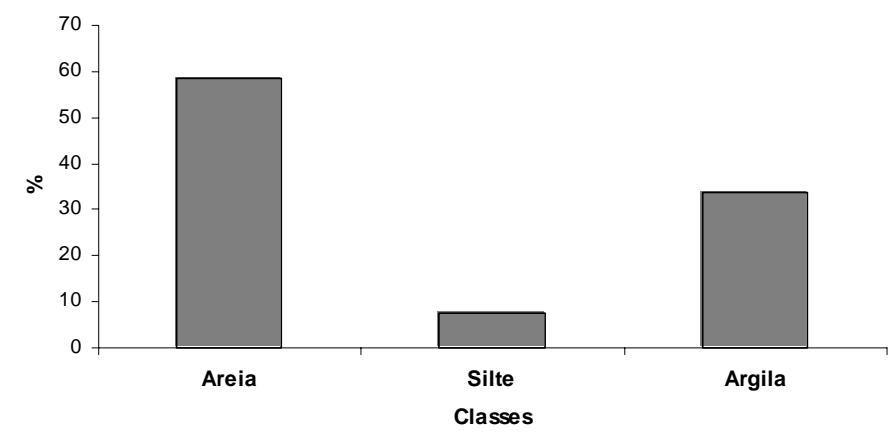
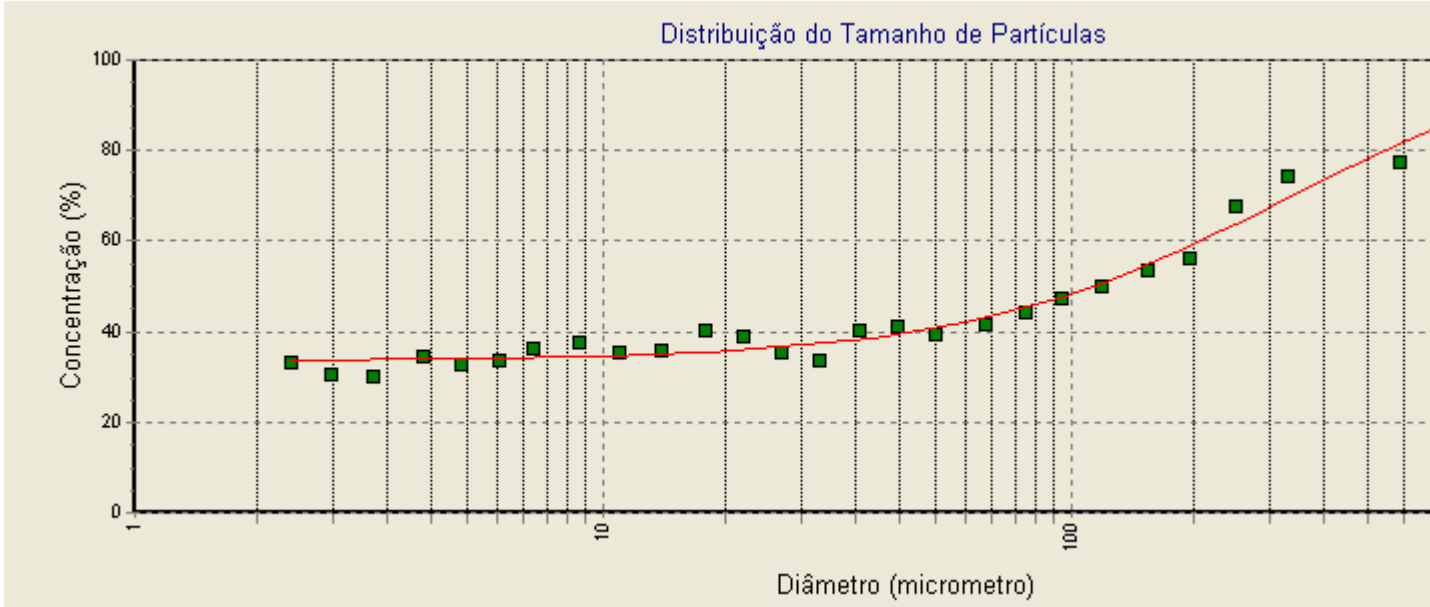


Figura 11: Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 1

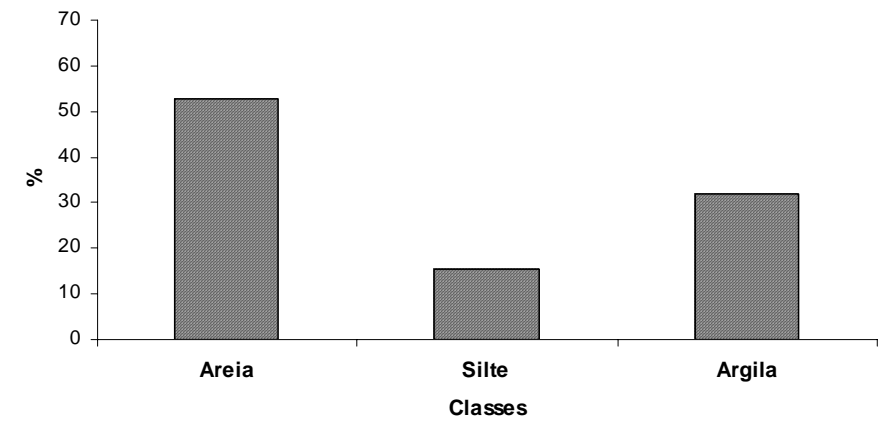
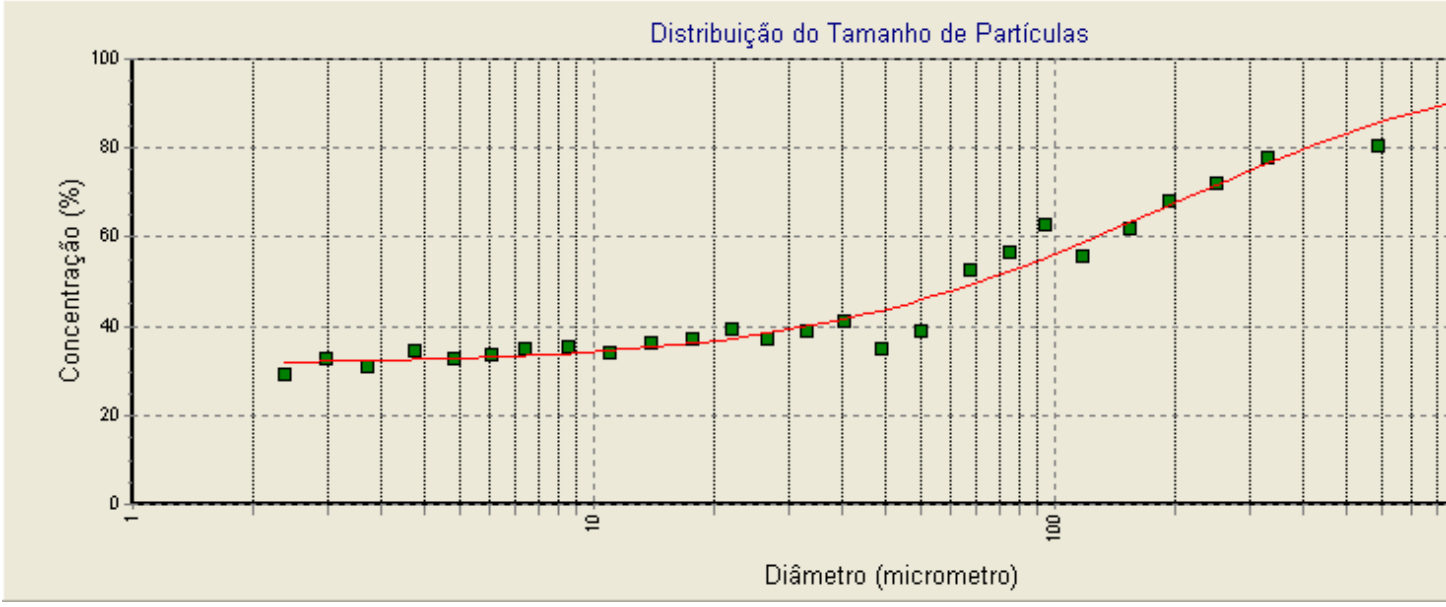


Figura 12: Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 2

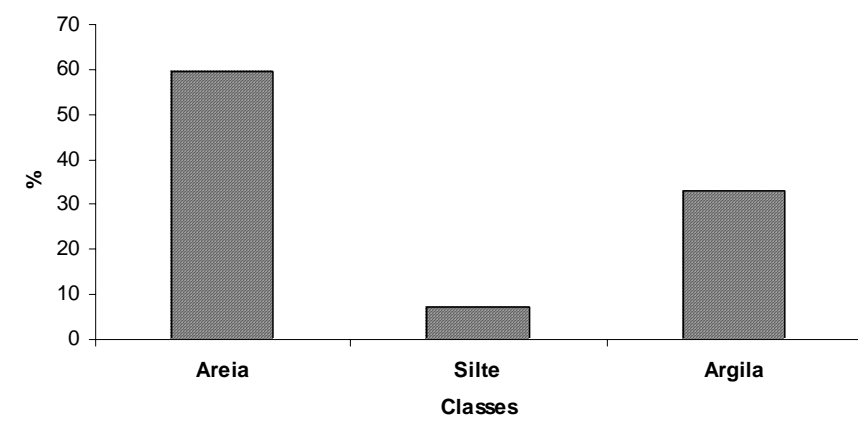
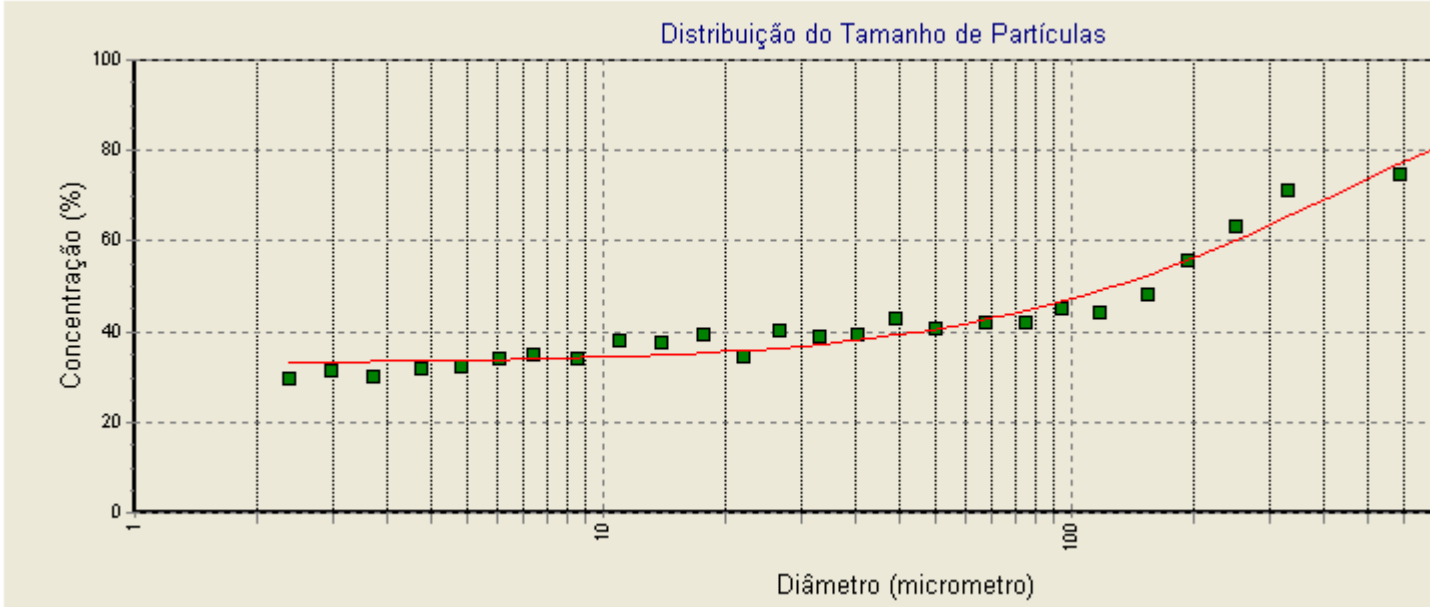


Figura 13: Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 3

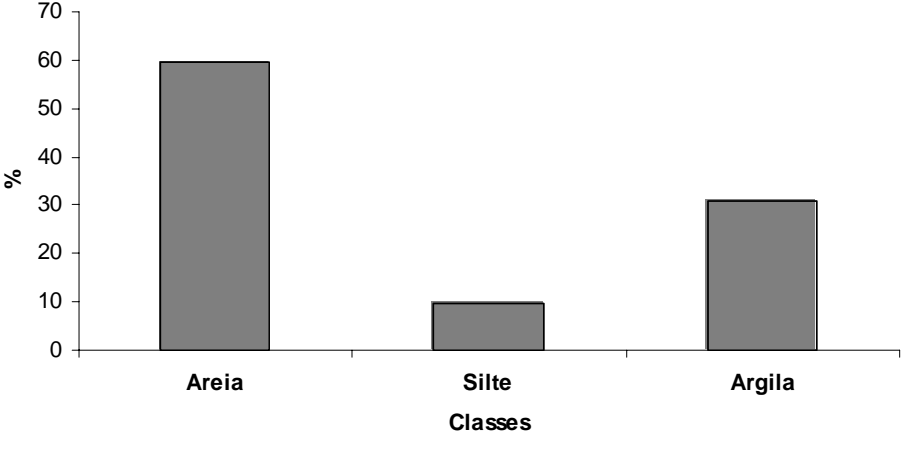
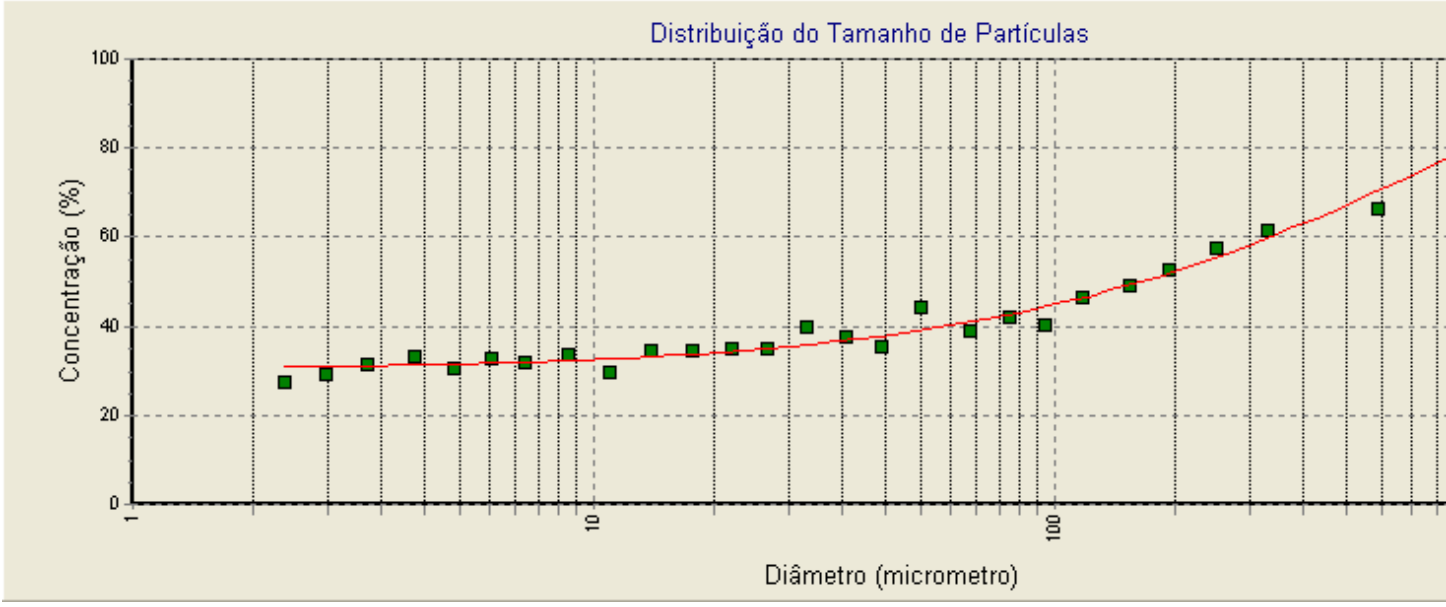


Figura 14: Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 4

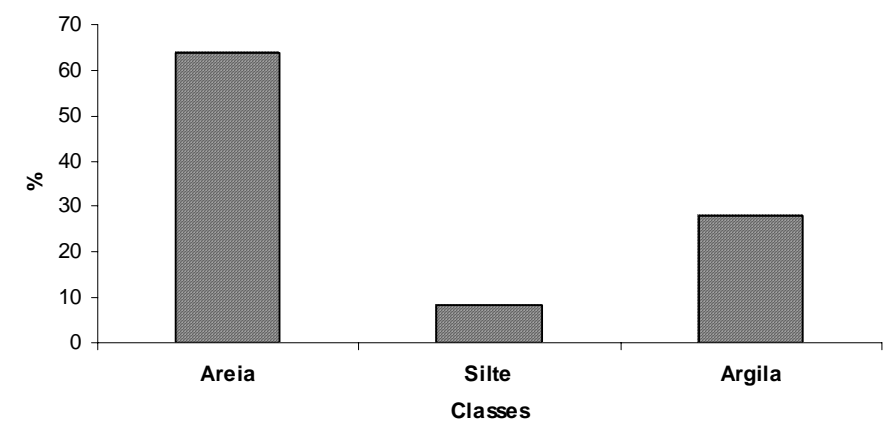
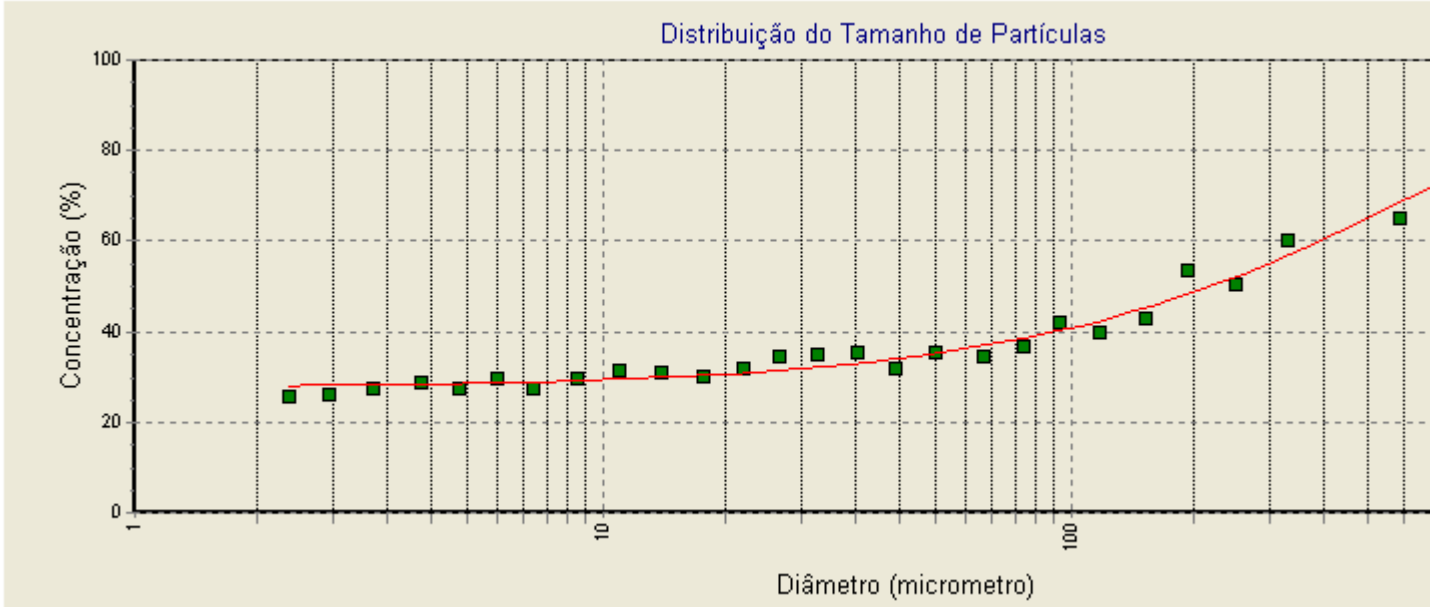


Figura 15: Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 5



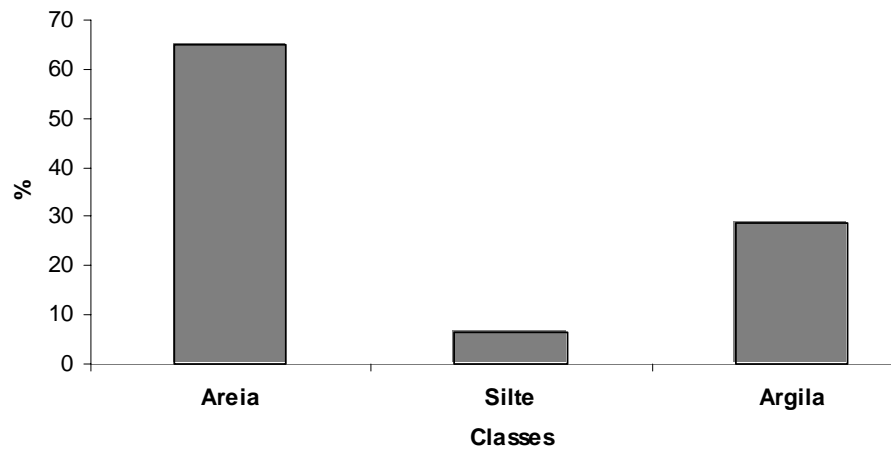
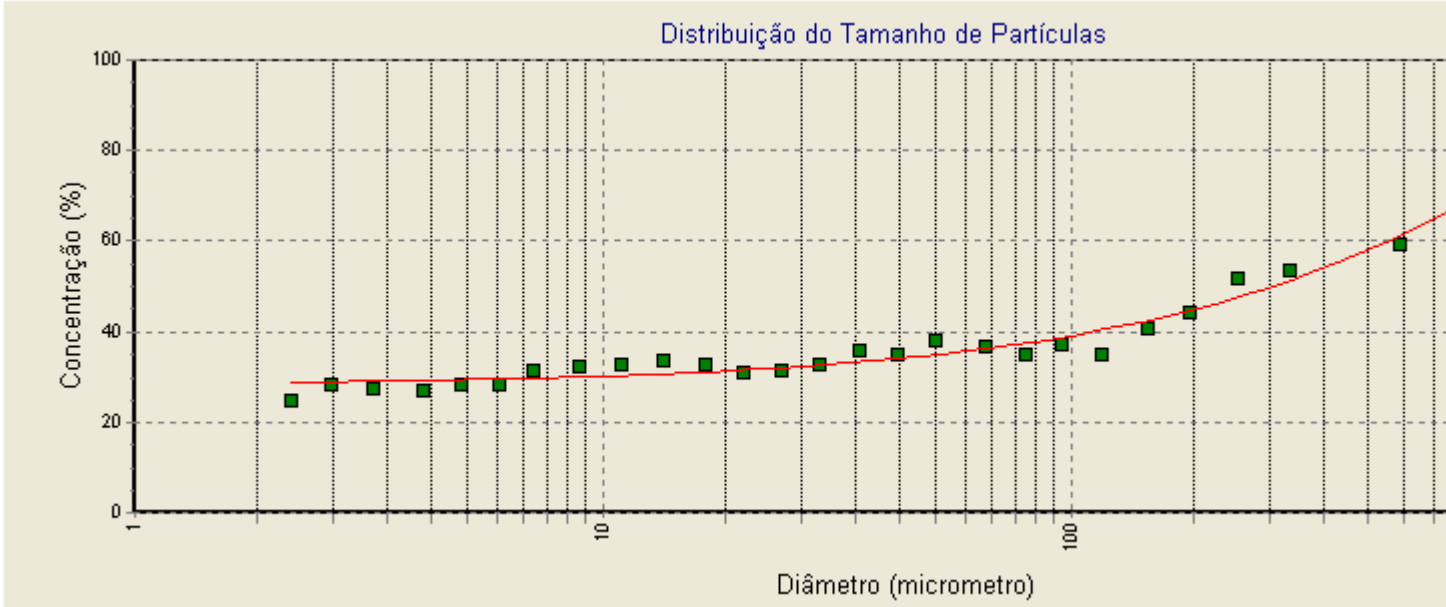


Figura 16: Distribuição do Tamanho das Partículas - Parcela 6

### Diâmetro Médio Ponderado - DMP

O DMP indica a percentagem de agregados grandes retidos nas peneiras com malhas maiores. Foram utilizadas peneiras de 2,0 mm, 1,0mm e 0,6 mm.

O DMP foi calculado pela seguinte equação:

$$DMP = \sum_{i=1}^n i \cdot w_i$$

**Onde:**

w<sub>i</sub>= proporção de cada classe em relação ao total

x<sub>i</sub>= diâmetro médio das classes (mm)

A **Tabela 3** apresenta os valores de DMP nas parcelas.

**Tabela 3: DMP dos solos das parcelas experimentais**

Parcelas	DMP(mm)
1	0,1880
2	0,1876
3	0,1876
4	0,1877
5	0,1868
6	0,1881

## Densidade

Os anéis volumétricos foram colocados em estufa a 100°C, até a estabilização do peso. A densidade foi determinada pela relação massa de solo/ volume (do anel volumétrico)

Os resultados são apresentados na **Tabela 4**.

**Tabela 4: Densidade do solos das parcelas experimentais**

Parcelas	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1	1,59
2	1,55
3	1,50
4	1,55
5	1,50
6	1,79

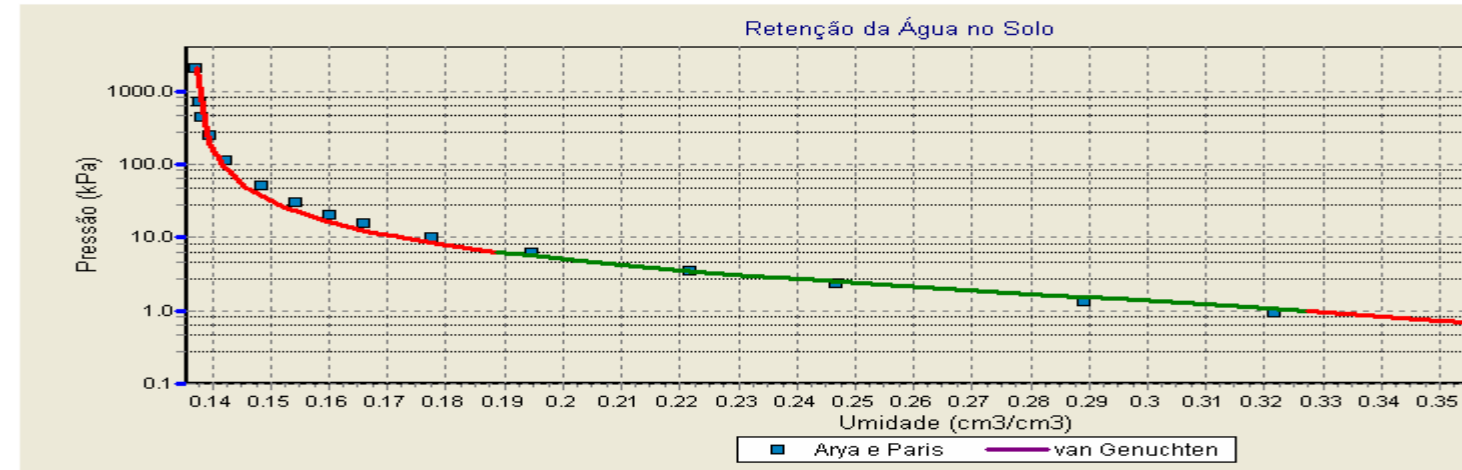


Figura 17: Retenção de Água no Solo – Parcela 1

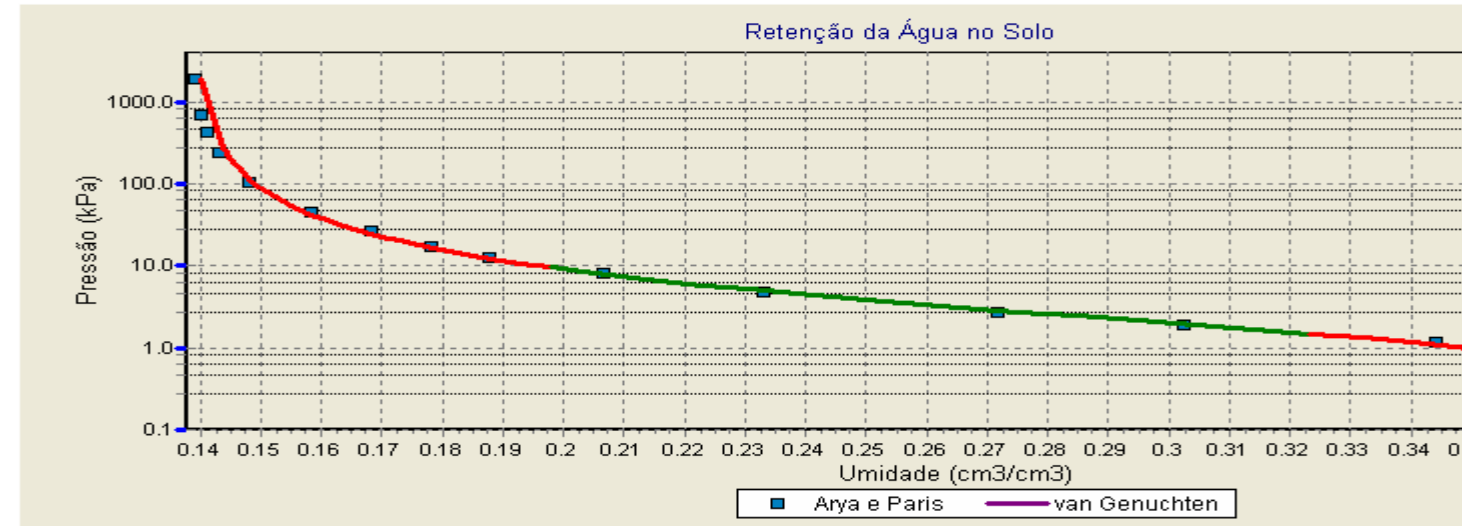


Figura 18: Retenção de Água no Solo – Parcela 2

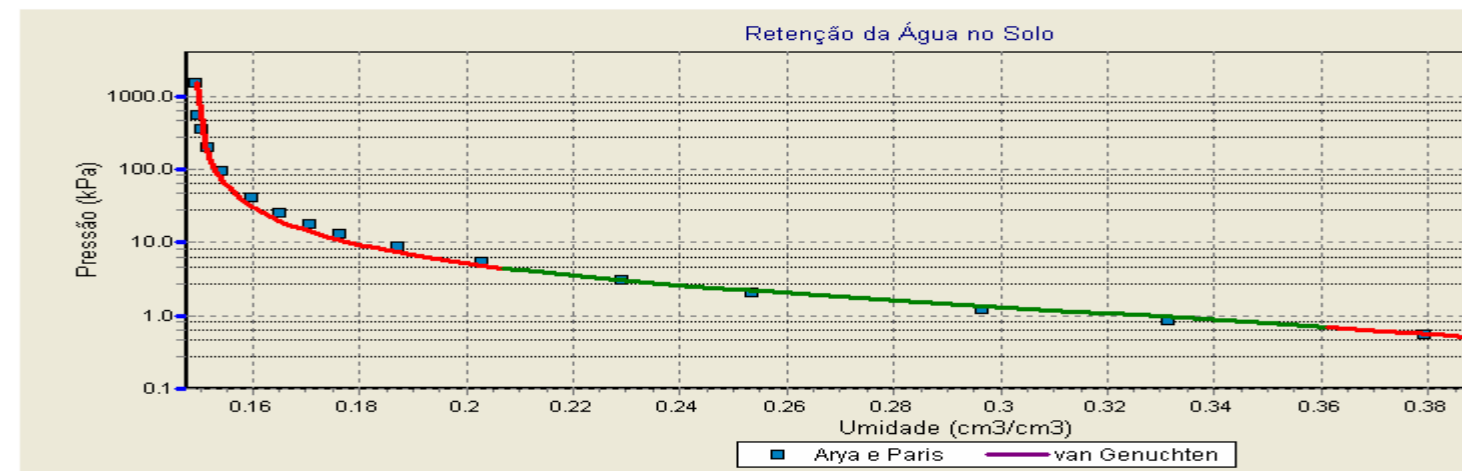


Figura 19: Retenção de Água no Solo – Parcela 3

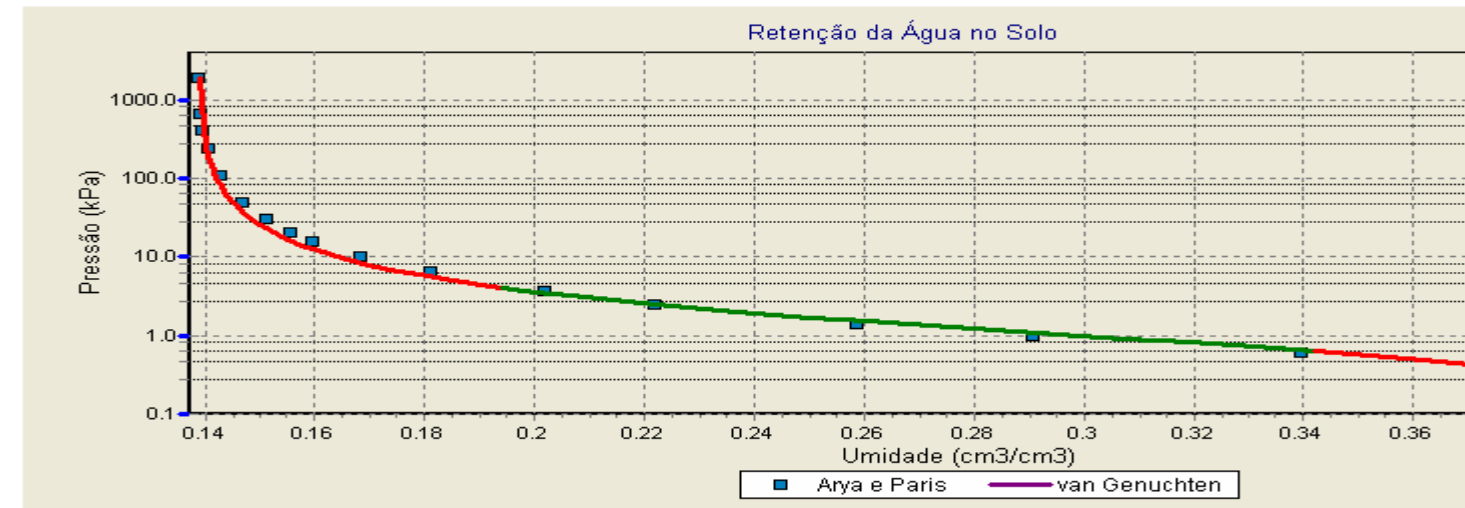


Figura 20: Retenção de Água no Solo – Parcela 4

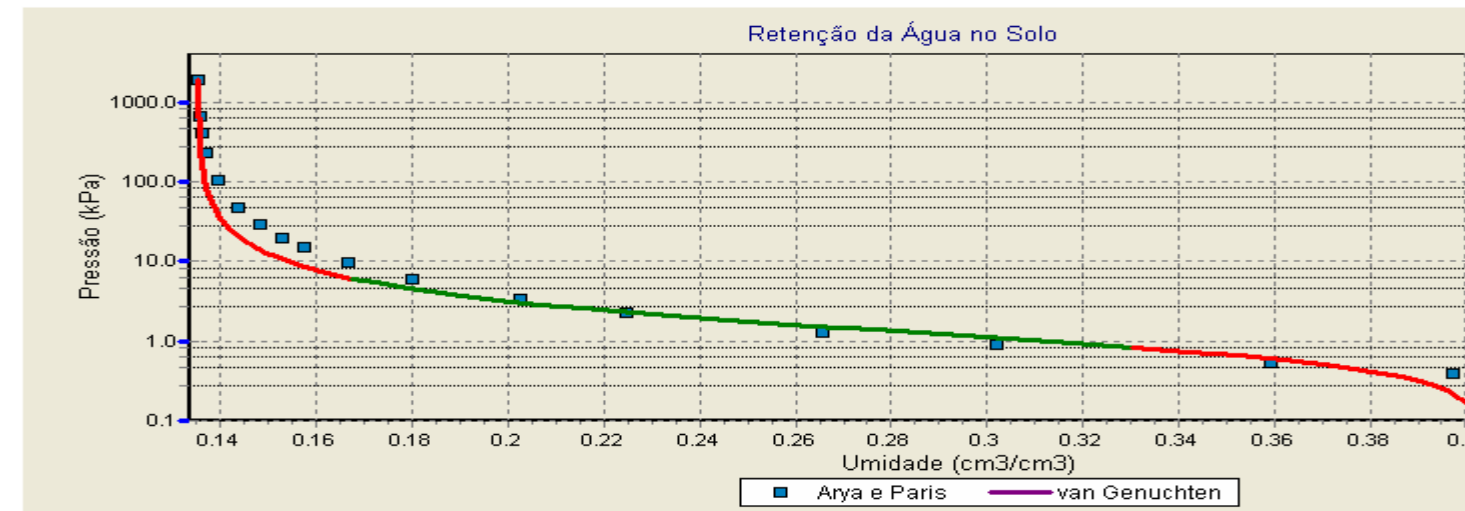


Figura 21: Retenção de Água no Solo – Parcela 5

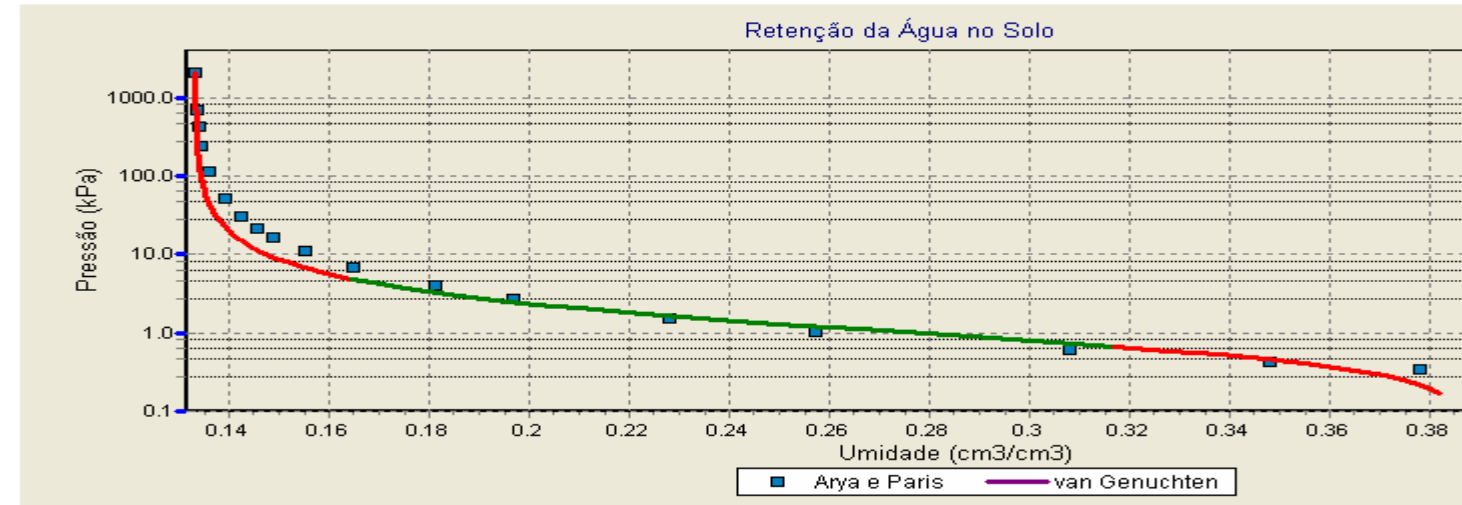


Figura 22: Retenção de Água no Solo – Parcela 6

A distribuição do tamanho das partículas, obtida através da análise granulométrica, é fundamental para o entendimento do efeito da textura nas propriedades físicas do solo. É importante também, na prática, para a indicação da qualidade do solo sob diversos aspectos, como drenagem, erosão, adsorção de nutrientes e pesticidas, entre outros.

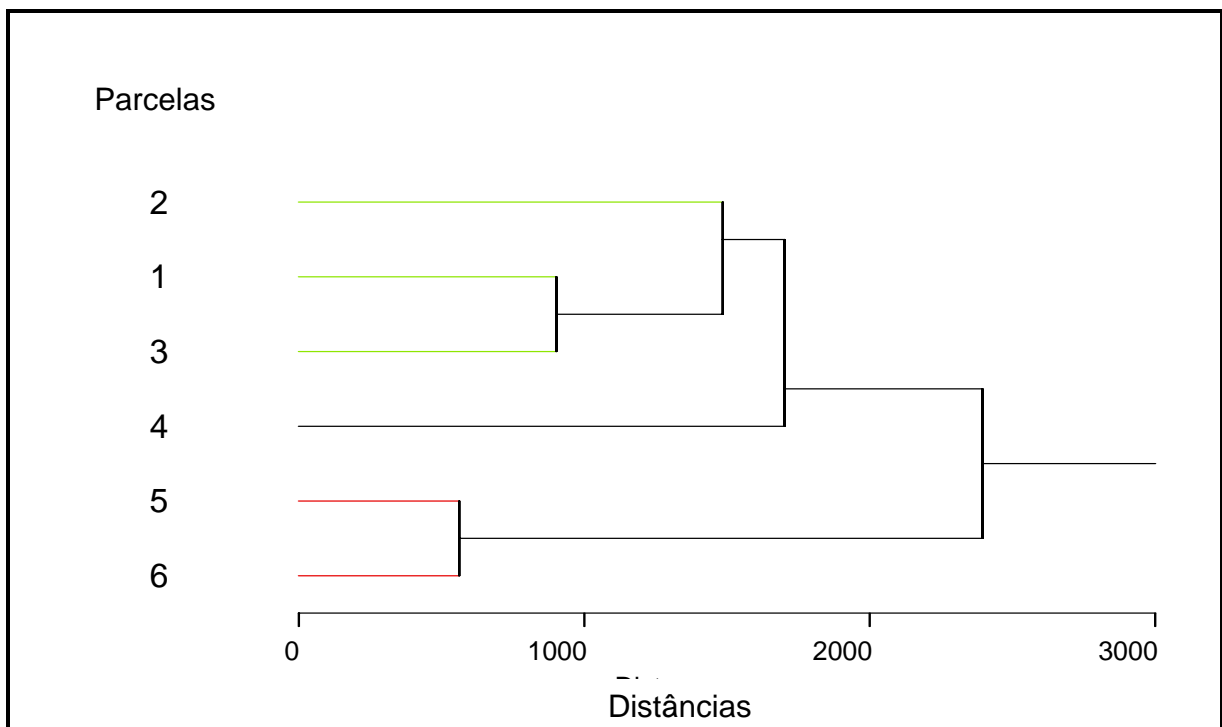
No intuito de conhecer a influência desta variável sobre os resultados obtidos neste estudo as parcelas foram comparadas quanto ao fator distribuição granulométrica para identificar a existência de diferenças significativas entre elas.

Desta forma, o resultado gerado contribui na explicação de diversos fenômenos que ocorrem durante o experimento.

Para esta finalidade foi utilizado o teste estatístico MANOVA (Análise Multivariada de Variância) seguido do teste T de Student. ( $p < 0,05$ ) para verificar se as parcelas eram significativamente diferentes entre si, em relação às duas variáveis: concentração e diâmetro das partículas. O teste T indicou um valor de  $p = 0,575$ , demonstrando que as parcelas são estatisticamente iguais quanto a estas variáveis.

Embora a MANOVA e o teste T não tenham indicado diferença estatística significativa entre as parcelas foi possível observar que na formação de grupos no cluster (**Figura 23**), se analisado à distância euclidiana média de 2394,5 as parcelas 5 e 6 são as que mais se assemelham, seguida de outro grande grupo composto pelas parcelas 1, 2, 3 e 4.

Cabe ressaltar que as parcelas 5 e 6 isolam-se das demais parcelas pela existência de uma curva de nível que separa a área do experimento e que, os solos dessas duas áreas são submetido ao longo dos anos a diferentes cultivos. O cultivo predominante na área das parcelas 5 e 6 é o milho e nas demais é a aveia.



**Figura 23: Agrupamento das parcelas quanto a concentração e diâmetro das partículas**

Com relação aos valores do DMP, pode-se verificar que são baixos, ou seja, os agregados concentram-se em sua maioria entre as peneiras 1,0 e 2,0 mm, na camada 0-20 cm (superfície)

Para AINA (1979), nas camadas próximas à superfície, a dominância de agregados com diâmetros inferiores a 2 mm pode estar relacionada com a deterioração da macroestrutura, pelos efeitos do preparo do solo. Esta situação pode proporcionar certa pulverização de seus integrantes, além de reduzir o teor de material orgânico e, conseqüentemente, suas ações na formação de agregados de diâmetros maiores (RUSSEL e RUSSEL, 1961).

Não se conhecem números absolutos para interpretar, através dos resultados da análise de agregados, quando um solo pode ser considerado de boas ou más propriedades físicas.

No entanto, aceita-se como sendo de baixa estabilidade, os solos com índice de agregação abaixo de 0,50 mm. Tais solos tornam-se impermeáveis quando irrigados,



formando crostas na superfície, a menos que práticas especiais de manejo sejam empregadas.

Não houve grande variação entre os DMP nas parcelas, mas pode-se verificar que os maiores valores são apresentados pelas parcelas 1 e 6. Os baixos valores de DMP encontrados no solo da área de estudo são explicados, principalmente, pela intensidade do preparo sucessivo, já que a área em questão é utilizada há anos com diversas culturas. Este fato, por si só, já indica um acentuado rebaixamento do teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, da atividade biológica e da resistência dos agregados à ação da água.

No caso da densidade dos solos, sabe-se que é um importante atributo físico, por fornecer indicações a respeito do estado de sua conservação, sendo uma das primeiras propriedades a ser alterada pelos diferentes usos. Tem sido largamente utilizada na avaliação da compactação e, ou, adensamento dos solos (CAMARGO, 1983)

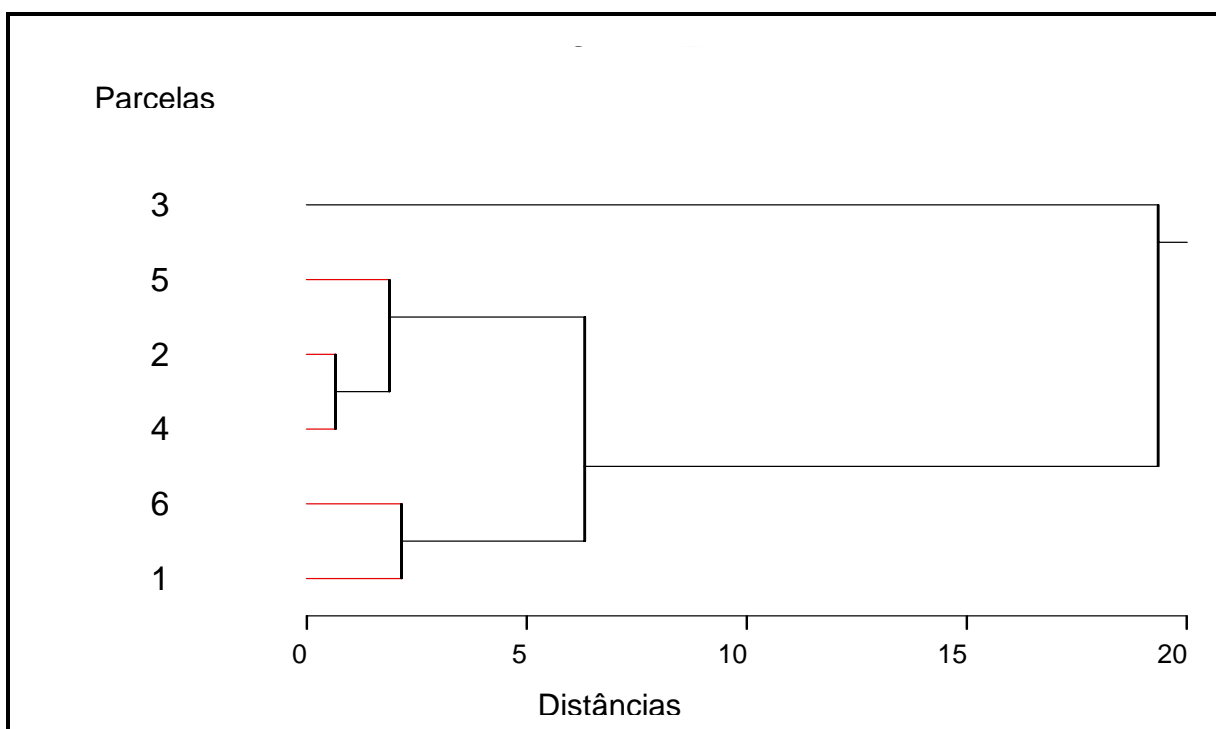
Quando ocorre a degradação da estrutura do solo, tem-se como efeito imediato o aumento da sua densidade, diminuição da macroporosidade e armazenamento de água ao longo do perfil, caracterizando a compactação desse solo. Observou-se que os valores de densidade seguem o mesmo padrão que o DMP, ou seja, maiores valores nas parcelas 1 e 6.

Os valores de pressão e umidade foram utilizados na determinação da curva de retenção de água no solo e condutividade hidráulica.

Desta forma surgiu o interesse de se verificar a variabilidades destes dados em relação a cada parcela analisada. Variações pronunciadas podem explicar os padrões obtidos bem como estabelecer que as parcelas não podem ser analisadas como se fossem triplicatas, ou seja, parcelas iguais com dois tipos de manejo e três repetições.

Para esta finalidade foi utilizado novamente o teste estatístico MANOVA, seguido do teste T de Student. ( $p < 0,05$ ) para verificar se as parcelas eram significativamente diferentes entre si, em relação às duas variáveis: pressão e umidade. O teste T indicou um valor de  $p = 0,984$ , demonstrando que as parcelas são estatisticamente iguais quanto a estas variáveis.

Embora a MANOVA e o teste T não tenham indicado diferença estatística significativa entre as parcelas foi possível observar que na formação de grupos no cluster (**Figura 24**), se analisado à distância euclidiana média de 6,63 verificam-se 3 grandes grupos formados pelas parcelas 2 e 4 e 5, parcelas 1 e 6 e a parcelas 3, isolada.



**Figura 24: Agrupamento das parcelas quanto a pressão e umidade**

As curvas de retenção de água no solo obtidas nesse estudo, são típicas de solos arenosos onde a umidade cai mais bruscamente com o aumento da tensão aplicada. Apesar da diferença de formato, as curvas apresentam comportamento semelhante quanto à capacidade de retenção de água nas diferentes tensões aplicadas.

A curva de retenção da água no solo é de grande importância na agricultura para indicar quando e quanto irrigar e, por ser uma medida indireta da distribuição do tamanho de poros, é um parâmetro da qualidade dos solos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

- As variáveis analisadas não apresentaram variações significativas entre si, podendo-se, portanto, considerar as parcelas experimentais semelhantes quanto a distribuição do tamanho de partículas de solo e capacidade de retenção de água;
- Pode-se verificar pequena variação nos valores do DMP, com os maiores valores nas parcelas 1 e 6 e densidade com valor destacadamente mais alto na parcela 6;
- Houve formação de grupos para as características de: concentração de partículas e diâmetro, bem como pressão e umidade. Os grupos de similaridade formados, apesar de não identificadas diferenças estatisticamente significativas para estas características entre as parcelas, podem auxiliar na compreensão do comportamento de uma série de fenômenos analisados neste estudo;
- O aplicativo Qualisolo fornece informações importantes acerca do manejo apropriado para determinados solos, mostrando, portanto intervalos de valores considerados ótimos para o mesmo. Neste estudo estes valores foram utilizados no intuito de suprir informações acerca de características intrínsecas dos solos estudados e suas variações. As parcelas experimentais são distribuídas espacialmente de forma muito próxima umas das outras, esperando-se, portanto poucas variações nos valores obtidos, como foi demonstrado no resultado das análises efetuadas.

# **AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E PERDA DE ÁGUA EM PARCELAS EXPERIMENTAIS COM CARACTERÍSTICAS DISTINTAS DE PREPARO EM DIFERENTES INTENSIDADES DE PRECIPITAÇÃO**

## **INTRODUÇÃO**

A degradação do solo nos trópicos, apesar de considerado um grande problema, necessita ainda de avaliações mais precisas e abrangentes no que concerne aos aspectos físicos, químicos e ambientais, de forma integrada (OLDEMAN *et al.*, 1990).

A erosão é um dos principais fatores responsáveis pelo decréscimo na produtividade agrícola, provocando perdas de solo, água e nutrientes.

O homem, com suas práticas inadequadas de agricultura, tornou-se um agente importante na deflagração de processos erosivos importantes. Isso porque os diferentes sistemas de cultivo propiciam diferentes condições finais de exposição do solo aos agentes erosivos, visto que promovem mobilização e cobertura vegetal diferenciada, ocasionando diferentes graus de proteção contra as perdas de água e solo.

Dentre as formas de erosão, a hídrica é, em grande parte do nosso planeta, a mais importante forma de erosão (ZACHAR, 1982). Esta é causada pela chuva e pelo escoamento superficial, sendo afetada por um grande número de agentes naturais e antrópicos. Os processos hidrológicos que afetam a erosão do solo, o transporte de sedimentos erodidos, a deposição de sedimentos e as características físicas, químicas e biológicas, coletivamente, determinam, em parte, a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Fundamentalmente, o processo de erosão hídrica do solo pela água da chuva é condicionado pelos fatores chuva, solo, topografia, cobertura, manejo e práticas utilizadas.

O processo erosivo causado pela água das chuvas tem abrangência em quase toda a superfície terrestre, em especial nas áreas com clima tropical, onde os totais pluviométricos são bem mais elevados do que em outras partes do planeta. Além disso, em muitas dessas áreas, as chuvas concentram-se em certas estações do ano, o que agrava, ainda mais, a erosão (GUERRA, 1999). O processo tende a acelerar à medida que mais áreas são desmatadas para exploração de madeira e, ou, produção agrícola, uma vez que os solos ficam desprotegidos da cobertura vegetal e, conseqüentemente, as chuvas incidem diretamente sobre a superfície do terreno.

A quantificação dos processos erosivos atuantes e a influência dos fatores intervenientes no mesmo são de fundamental importância para estudos que explorem o potencial de degradação do fenômeno da erosão dos solos sobre os recursos hídricos de áreas agrícolas.

Em razão do exposto, desenvolveu-se este trabalho, objetivando estudar o efeito do preparo do solo, sem cobertura vegetal, e da intensidade da chuva sobre as perdas de solo e água, em parcelas experimentais de Latossolo Vermelho-Amarelo, utilizando-se um simulador de chuvas de braços rotativos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foram simulados 3 eventos de precipitação em 3 dias consecutivos, nas 6 parcelas experimentais, com 2 tipos de preparo: solo raspado e solo arado.

Ao final de cada evento de precipitação (30 mm, 30 mm e 70 mm, respectivamente), o volume total escoado em cada parcela foi coletado. Em laboratório, procedeu-se a determinação da concentração de sedimentos por litro de solução (água+sedimento), pelo método de evaporação.

Os resultados mostram a taxa de erosão em parcelas de área conhecida, de 33 m<sup>2</sup> (área da parcela), com diferentes tipos de preparo do solo e, podem ser extrapolados para áreas maiores. A **Figura 25** mostra o posicionamento do simulador de chuvas no momento dos ensaios.



**Figura 25: Posicionamento do simulador de chuvas**

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **Produção de água e sedimentos**

A **Tabela 5** apresenta os valores de solo erodido e água escoada nos dois tipos de preparo do solo, em cada parcela experimental, de acordo com a chuva simulada incidente.

**Tabela 5: Perda de solo e água nos diferentes preparos do solo e intensidade de precipitação**

Preparo		Solo Raspado			Solo Arado		
chuva (mm)	Parcelas	Solo (gramas)	Água (Litros)	Parcelas	Solo (gramas)	Água (Litros)	
30	1	6,85	1,50	2	4,60	1,50	
	3	4,80	1,50	4	0,60	1,30	
	5	1,25	1,20	6	1,60	0,80	
30	1	1,95	6,00	2	1,15	6,40	
	3	4,80	2,00	4	0,90	1,50	
	5	2,00	1,20	6	3,45	2,00	
70	1	6,65	12,00	2	0,90	6,60	
	3	2,00	19,00	4	1,35	10,20	
	5	1,30	12,00	6	2,55	11,00	

A **Figura 26** mostra a representação gráfica dos resultados de volume escoado apresentados na tabela anterior, em cada evento de simulação.

Em todas as parcelas houve um contínuo acréscimo dos volumes escoados em função da chuva incidente. Percebe-se que a capacidade de infiltração da água no solo foi excedida logo na primeira simulação e aumentando gradualmente até a última simulação de chuva que, por apresentar intensidade superior às demais, resultou em um volume escoado extremamente elevado em relação às outras chuvas, em todas as parcelas.

Cabe ressaltar que a duração das chuvas de 30mm/h de intensidade foi de 12 minutos e o total de água utilizado foi de 2000 L por parcela. Assim, 6 mm de chuva incidiram em cada parcela, em cada evento de simulação com a intensidade em questão.

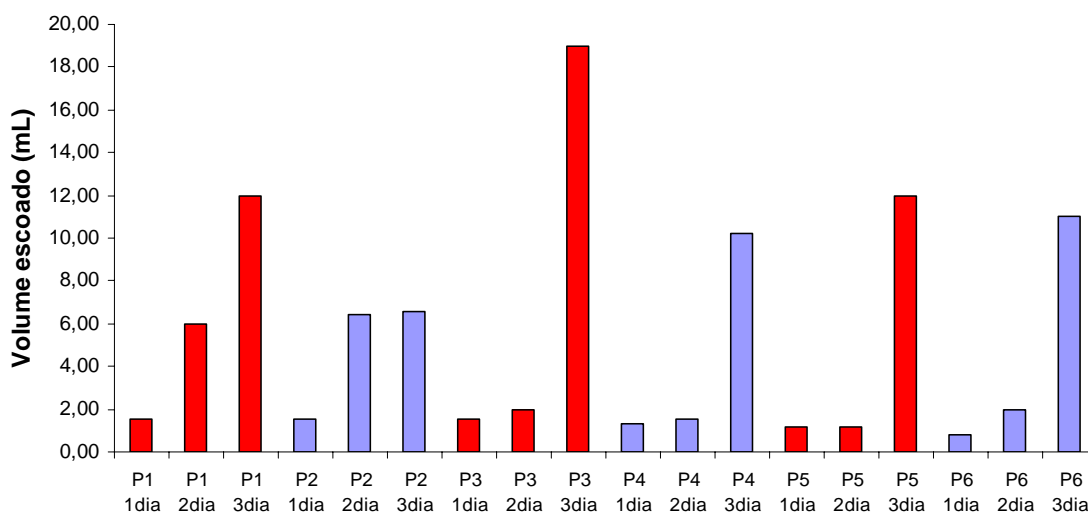
No caso da última chuva, com 70 mm/h de intensidade, o tempo de duração foi de 6 minutos, totalizando 7 mm de chuva incidente (2000 L por parcela).

Pode-se, portanto, verificar a influência da intensidade da chuva sobre a produção de água nas parcelas, já que a última chuva teve uma diferença de apenas 1 mm a mais em relação as outras, sendo o volume incidente em cada parcela o mesmo utilizado nos outros eventos de simulação.

Para confirmar a análise, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para verificar se existiram diferenças significativas entre os volumes escoados nas parcelas com solo raspado ao longo dos ensaios com chuva simulada. O resultado foi positivo, ou seja, houve diferenças significativas, entre a segunda e terceira simulação ( $p=0,008$ ).

O mesmo ocorreu com as parcelas de solo arado ( $p=0,002$ ). Confirma-se, desta forma, a influência da intensidade da precipitação sobre os padrões de escoamento superficial de água.

Há que se considerar também que, por se tratar de solos com ausência de cobertura vegetal, as gotas de chuva, já nas chuvas iniciais, causam um impacto importante na superfície do solo, selando os poros e conseqüentemente tornando o terreno mais impermeável.



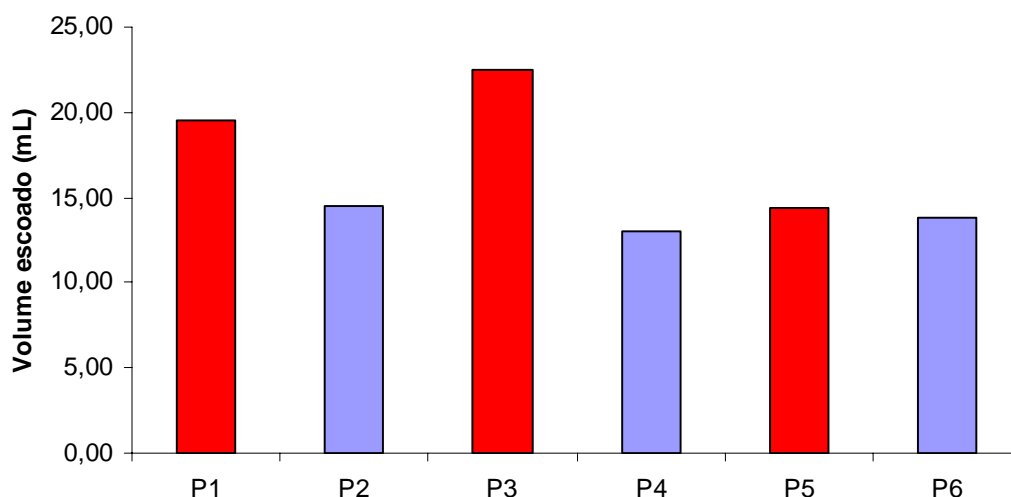
**Figura 26: Volume de água escoada nas parcelas experimentais após cada chuva**



A **Figura 27** mostra a representação gráfica dos resultados de volume escoado, em termos totais em cada parcela.

Se analisadas as diferenças entre as parcelas, pode-se observar maior escoamento superficial de água nas parcelas 1, 3 e 5, que apresentaram o mesmo tipo de preparo, ou seja, solo raspado.

As parcelas com solo arado apresentaram volumes menores em função da rugosidade e porosidade originadas por este método de preparo.

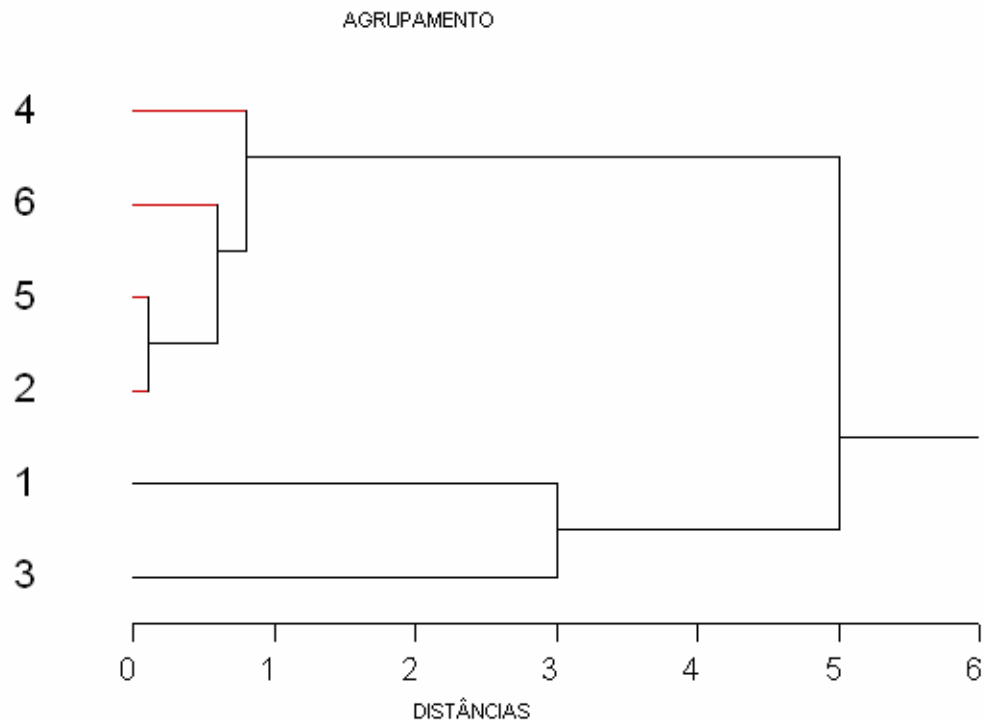


**Figura 27: Volume total de água escoada nas parcelas experimentais**

Foi realizada uma análise de agrupamento a partir dos resultados de volume escoado total em cada parcela (ou seja, a somatória de todos os eventos de simulação), para conferir a similaridade entre as parcelas experimentais utilizadas e relacioná-la possivelmente ao tipo de preparo do solo. A **Figura 28** apresenta o *cluster* das parcelas em relação ao volume total escoado. Ao corte de 3,1 de distância observa-se a formação de 2 grupos distintos: um formado pelas parcelas 1 e 3 e o outro pelas parcelas 2, 4, 6 e 5.

Em uma análise direta, pode-se afirmar que os grupos de similaridade são influenciados pelo tipo de preparo do solo, ou seja, o padrão de escoamento é similar

entre as parcelas de solo raspado, ocorrendo o mesmo com as parcelas de solo arado, com exceção da parcela 5. O padrão de escoamento superficial é diferente nos tipos de preparo em questão.



**Figura 28: Agrupamento das parcelas em relação ao volume de água escoada**

A **Figura 29** apresenta o gráfico com os resultados da produção de sedimentos após cada evento de simulação, em todas as parcelas.

Observa-se grande heterogeneidade nos dados apresentados, dificultando o estabelecimento de um padrão de perda de solo, já que esta variável se comportou de formas bem diversificadas entre os eventos de simulação de chuva em todas as parcelas.

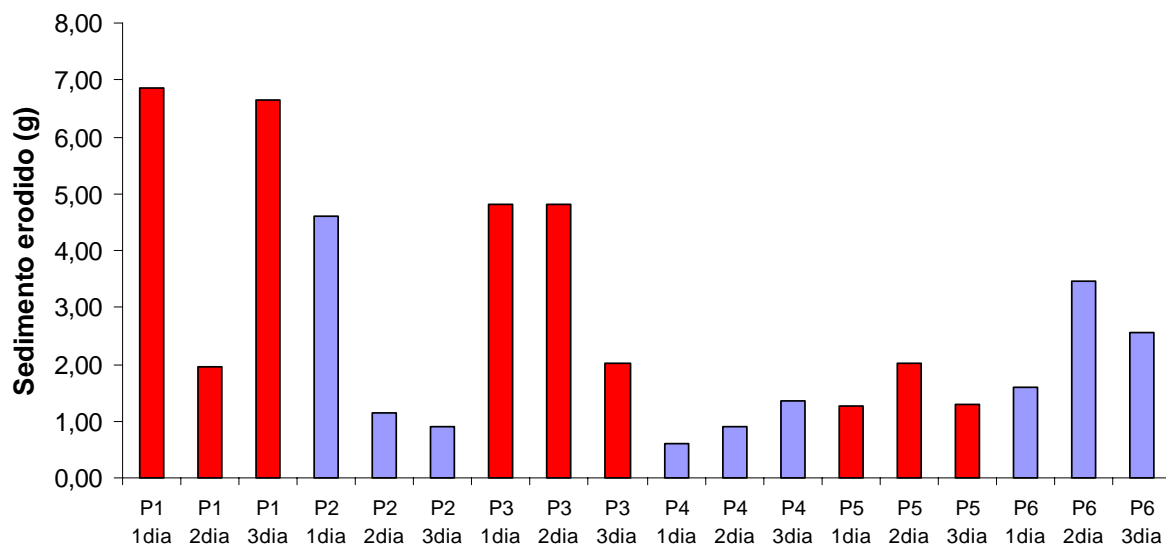
Se analisadas as parcelas com solo raspado, verifica-se que houve alta produção durante o primeiro evento de simulação nas parcelas 1 e 3. Na fase inicial do experimento o solo encontrava-se com pouca umidade, desta forma a desagregação das partículas de solo pelo embate das gotas de chuva foi mais pronunciada. Acredita-

se que parte considerável do solo desagregado nesta fase seja atribuído ao processo de erosão por salpicamento. No caso da parcela 1, durante a segunda precipitação, houve diminuição na quantidade de sedimentos erodidos.

Nesta mesma parcela, após a última chuva incidente, de intensidade maior e em curto intervalo de tempo houve um aumento do poder erosivo da enxurrada. Porém, nas demais parcelas, os valores finais de produção de sedimentos diminuíram. Entre os fatores que podem explicar os resultados obtidos, acredita-se que irregularidades do terreno, já que este é utilizado há anos na rotação de inúmeras culturas, tenham promovido uma maior declividade da rampa no caso da parcela 1, aumentando a velocidade do escoamento superficial e, portanto, sua capacidade em desagregar partículas quando submetida a intensidades maiores de precipitação. Nas outras parcelas a diminuição nas quantidades de sedimentos erodidos durante a última chuva pode ser explicada pela formação de crostas superficiais que promoveram a compactação superficial dos solos nessas parcelas, cuja declividade menos acentuada não promoveu velocidade da enxurrada suficiente para refletir nas quantidades erodidas.

Nas parcelas com solo arado pode-se verificar que a parcela 2, localizada imediatamente ao lado da parcela 1, apresentou o mesmo comportamento de alta produção de sedimentos durante a primeira simulação. Após os eventos seguintes de precipitação os valores sofreram decréscimo gradual, o que demonstra o efeito do preparo do solo na produção de sedimentos. Neste caso a enxurrada, mesmo que associada ao maior declive observado, tem sua ação desagregadora desfavorecida pela criação de micro depressões e micro elevações superficiais, que além de diminuir a velocidade da mesma ainda atuam como barreira ao transporte dos sedimentos desagregados do solo. Na parcela 4 ocorreu o inverso, ou seja, o processo iniciou com baixa produção de sedimentos e sofreu acréscimo contínuo ao longo dos eventos de precipitação, demonstrando a perda de capacidade do solo em reter sedimentos em sua superfície e a influência da intensidade da precipitação neste caso. O mesmo ocorreu com a parcela 6, porém com um decréscimo final na produção, indicando a influência da intensidade da precipitação e ao mesmo tempo de características do solo que promovem condições maiores de retenção de partículas de solo na superfície.

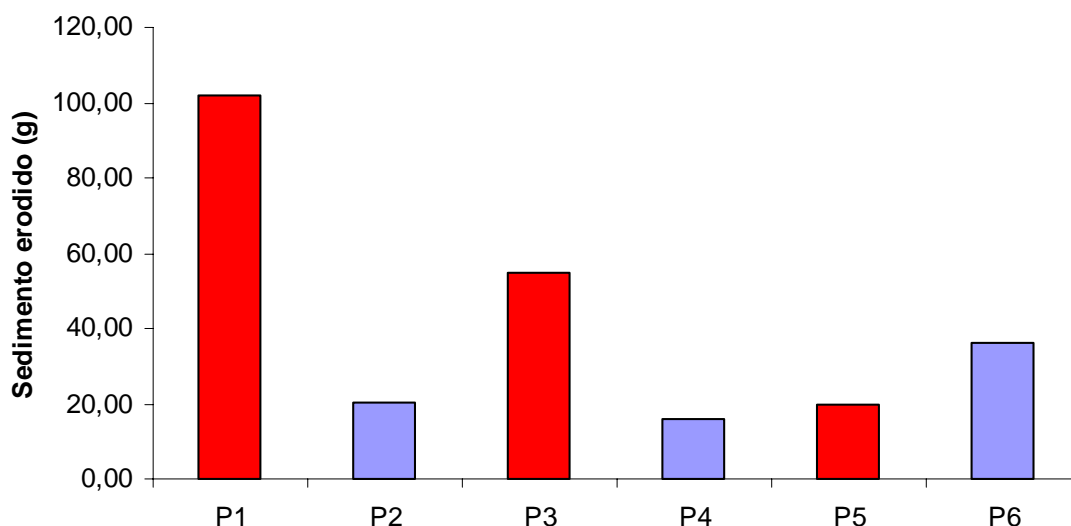
Acredita-se que este tipo de preparo do solo contribua de forma eficaz na diminuição da velocidade do escoamento superficial, embora a sua influência em relação a diminuição do processo erosivo durante eventos de precipitação seja mais notória em rampas mais inclinadas.



**Figura 29: Sedimentos erodidos nas parcelas experimentais após cada chuva**

A **Figura 30** mostra a representação gráfica dos resultados de sedimentos erodidos, em termos totais em cada parcela. No entanto, os valores apresentados referem-se à concentração de sedimentos encontrada no escoamento superficial, resultado da concentração de sedimentos por litro de solução, multiplicada pelo volume total escoado.

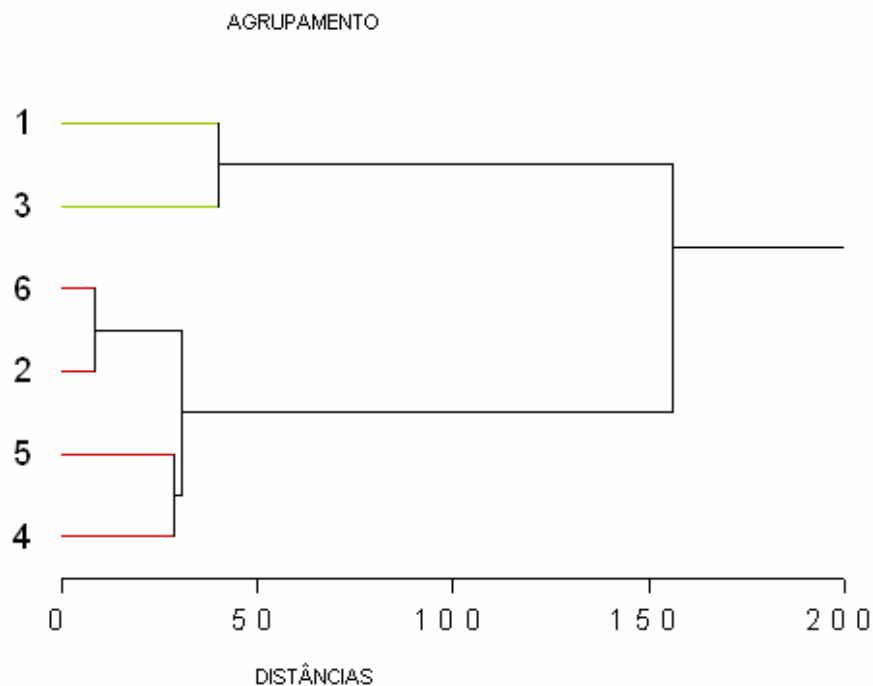
Se observadas as diferenças nos valores totais erodidos pode-se confirmar a influência do tipo de preparo do solo.



**Figura 30: Total de sedimentos erodidos nas parcelas experimentais**

Neste sentido, foi realizada uma análise de agrupamento a partir dos resultados de total de sedimentos erodidos em cada parcela (ou seja, a somatória de todos os eventos de simulação), para conferir a similaridade entre as parcelas experimentais utilizadas e relacioná-la possivelmente ao tipo de preparo do solo. A **Figura 31** apresenta o cluster das parcelas em relação a produção de sedimentos. Ao corte de 50 de distância observa-se a formação de 2 grupos distintos: um formado pelas parcelas 1 e 3 e o outro pelas parcelas 2, 4, 6 e 5.

Este resultado reforça a influência do tipo de preparo do solo sobre a intensidade dos processos erosivos atuantes.



**Figura 31: Agrupamento das parcelas em relação aos valores de sedimento erodido**

Cabe uma última consideração acerca da influência dos tipos de preparo do solo nas perdas de água por escoamento superficial e produção de sedimentos. Em relação às perdas de água, elas foram bem menos influenciadas pelos métodos de preparo do que as perdas de solo. Acredita-se que nas relações de perda de água por escoamento as características da precipitação incidente, bem como algumas propriedades físicas do solo, exerçam maior controle dos padrões observados, concordando, portanto com os trabalhos de BERTOL *et al.*, (1989) e LEVIEN *et al.*, (1990).

No intuito de identificar os componentes que explicam a variação dos resultados apresentados foram realizadas análises de regressão.

Correlacionando os valores de escoamento superficial e produção de sedimentos em cada parcela é possível afirmar que apenas nas parcelas 1 e 2 existe correlação baixa, de 83,1% e 5,4%, respectivamente. Nas demais parcelas o escoamento

superficial pode ser considerado o componente que influencia diretamente na produção de sedimentos. Os valores de correlação obtidos foram:

- ⇒ Parcela 3: 99,8%
- ⇒ Parcela 4: 100%
- ⇒ Parcela 5: 99,7%
- ⇒ Parcela 6: 99,1%

Os resultados de volume escoado superficialmente foram correlacionados com os valores de densidade do solo. Em um primeiro momento foram correlacionados apenas os valores das parcelas de solo raspado. Em seguida, apenas os valores obtidos nas parcelas de solo arado. As correlações encontradas foram baixas, de 2,2% e 0,1%, respectivamente.

A correlação entre a produção de sedimentos e a densidade dos solos foi baixa em ambos os casos, parcelas de solo raspado e de solo arado, com 39,9% e 35,5% respectivamente.

Os valores de produção de sedimentos foram correlacionados com os valores de Diâmetro Médio das Partículas (DMP) e demonstraram alta correlação nas parcelas com solo raspado, de 97%. Já, o solo arado, apresentou baixa correlação, de apenas 18,8%. Isso demonstra que menores valores de DMP favorecem maior perda de solo por erosão, ocasionada pela maior desagregação das partículas e conseqüentemente maior facilidade em serem transportadas pela água até distâncias maiores.

### **Cálculo da taxa de erosão**

A taxa de erosão em cada parcela de 33 m<sup>2</sup> foi obtida através do cálculo de concentração de sedimentos em suspensão, na solução água-sedimento escoada superficialmente, durante os eventos de precipitação.

Sabendo-se a produção de sedimentos em uma área de tamanho conhecido é possível extrapolar os valores para hectares, como unidade básica agrícola.

A **Tabela 6** apresenta a taxa de erosão por hectare nos dois tipos de preparo do solo.

**Tabela 6: Taxa de erosão de acordo com o preparo do solo, após cada chuva**

<b>SOLO RASPADO</b>					
<b>P</b>	<b>Tipo de preparo</b>	<b>g/L</b>	<b>L</b>	<b>g/parcela</b>	<b>Ton/ha</b>
<b>1</b>	Primeira simulação	6,85	1,50	10,28	0,0031
	Segunda simulação	1,95	6,00	11,70	0,0035
	Terceira simulação	6,65	12,00	79,80	0,0242
<b>3</b>	Primeira simulação	4,8	1,50	7,20	0,0022
	Segunda simulação	4,8	2,00	9,60	0,0029
	Terceira simulação	2	19,00	38,00	0,0115
<b>5</b>	Primeira simulação	1,25	1,20	1,50	0,0005
	Segunda simulação	2	1,20	2,40	0,0007
	Terceira simulação	1,3	12,00	15,60	0,0047
<b>SOLO ARADO</b>					
<b>P</b>	<b>Tipo de preparo</b>	<b>g/L</b>	<b>L</b>	<b>g/parcela</b>	<b>Ton/ha</b>
<b>2</b>	Primeira simulação	4,6	1,50	6,90	0,0021
	Segunda simulação	1,15	6,40	7,36	0,0022
	Terceira simulação	0,9	6,60	5,94	0,0018
<b>4</b>	Primeira simulação	0,6	1,30	0,78	0,0002
	Segunda simulação	0,9	1,50	1,35	0,0004
	Terceira simulação	1,35	10,20	13,77	0,0042
<b>6</b>	Primeira simulação	1,6	0,80	1,28	0,0004
	Segunda simulação	3,45	2,00	6,90	0,0021
	Terceira simulação	2,55	11,00	28,05	0,0085

A **Tabela 7** apresenta as taxas totais de erosão em cada parcela e os dados obtidos em quilos e toneladas por hectare em cada caso.



**Tabela 7: Taxas totais de erosão em cada parcela**

<b>Parcela</b>	<b>Produção (g em 33 m<sup>2</sup>)</b>	<b>Produção (kg/ hectare)</b>	<b>Produção (Ton/hectare)</b>
1	100,43	30,84	0,0308
2	87,10	6,12	0,0061
3	83,96	16,60	0,0166
4	87,00	4,81	0,0048
5	59,57	5,90	0,0059
6	37,45	10,97	0,0110

As taxas apresentadas referem-se a uma precipitação total de 19 mm.

Quando avaliada a taxa total de erosão em uma área maior, através da extrapolação dos dados, as diferenças entre os tipos de preparo do solo considerados neste estudo são evidentes, com exceção das parcelas 5 que apresentou baixa produção de sedimentos.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

- A intensidade da precipitação demonstrou influenciar os volumes de água escoada superficialmente, com diferenças significativas na última simulação;
- Os tipos de preparo do solo proporcionaram condições distintas de movimentação de água sobre a superfície do solo. A criação de micro depressões e micro elevações, condicionadas pelo método de preparo (aragem), proporcionaram maiores condições de infiltração de água no solo, refletindo em menores volumes de escoamento;
- Os valores totais de perda de solo e água demonstraram que esta última é bem menos influenciada pelos métodos de preparo do que a perda de solo;

- Quanto às perdas de solo, além dos métodos de preparo, a declividade da rampa parece ser um fator que influencia fortemente os valores encontrados;
- Quando correlacionados os valores de escoamento e perda de solo, percebeu-se alta correlação nas parcelas, 3, 4, 5, e 6, superiores a 99%;
- Nas parcelas 1 e 2 houve baixa correlação entre produção de água e sedimentos, indicando que o fator declividade condiciona uma situação onde a erosão é mais influenciada pela velocidade da enxurrada e da própria erodibilidade do solo;
- Nos solos sem preparo (raspado) os valores de DMP demonstraram influenciar na magnitude dos processos erosivos, ou seja, quanto menor os valores de DMP maior a perda de solo por erosão, condicionada pela menor estabilidade dos agregados (maior facilidade em desagregar);
- Foi possível determinar a taxa de erosão, em ton/ha, em um Latossolo Vermelho Amarelo, sem cobertura vegetal e dois tipos de preparo do solo, sob precipitações erosivas de 6 mm, 6mm e 7 mm, consecutivamente, bem como para o total de 19 mm. Estes dados podem ser utilizados com sucesso na derivação do fator K da EUPS, representando dados consistentes obtidos sob condições de campo.

## ALTERAÇÕES NA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO SOLO PELO PREPARO E PELA CHUVA E SUAS RELAÇÕES COM AS PERDAS DE SOLO E ÁGUA

### INTRODUÇÃO

A cobertura do solo e a rugosidade superficial induzida por métodos de preparo constituem as condições físicas de superfície do solo mais importantes do ponto de vista de redução da erosão hídrica. A cobertura é fundamental na dissipação da energia cinética das gotas da chuva, impedindo seu impacto direto na superfície do solo, enquanto a rugosidade é importante na retenção da água na superfície, com conseqüente diminuição da velocidade e do volume da enxurrada, e no aprisionamento dos sedimentos da erosão (ALLMARAS *et al.*, 1966; COGO *et al.*, 1983, 1984).

Para BURWELL *et al.*, (1966), o tipo de preparo do solo pode originar dois tipos de rugosidade: orientada e ao acaso. A rugosidade orientada é determinada pelo método de preparo do solo e é identificada por observação direta enquanto que, a rugosidade ao acaso caracteriza-se pela presença de picos e depressões não identificáveis por simples observação.

Os dois tipos de rugosidade reduzem as perdas de água e solo por erosão hídrica, já que a deposição dos sedimentos erodidos ocorre no mesmo local onde se dá o fenômeno, em virtude das microdepressões formadas pela rugosidade dos solos BERTOL *et al.*, (1987, 1989). No entanto, a direção da rugosidade orientada deverá ser disposta no sentido transversal ao do declive.

Por outro lado, a chuva pode modificar as condições físicas da superfície do solo criadas pelo preparo, graças à desagregação de suas partículas pela ação combinada da energia das gotas e a enxurrada associada, reduzindo a rugosidade superficial e, conseqüentemente, a retenção e a infiltração superficiais de água no

solo. Isso pode favorecer o selamento superficial, especialmente nas microdepressões da rugosidade, que vai se refletir em maiores perdas de água e solo por erosão hídrica, principalmente nos solos com pouca ou nenhuma cobertura vegetal (BURWELL & LARSON, 1969; JOHNSON *et al.*, 1979).

São variáveis que influenciam a rugosidade superficial do solo: tipo e intensidade do preparo, umidade do solo, quantidade e tipo de resíduo vegetal e tipo de solo (ALLMARAS *et al.*, 1966; COGO, 1983), bem como declividade do terreno. A rugosidade é, ainda, afetada pela estabilidade dos agregados, densidade e porosidade do solo (LEHRSCHE *et al.*, 1987), as quais determinam, em parte, a qualidade da estrutura e regulam a velocidade e o grau de sua degradação.

Nas áreas agrícolas, a rugosidade superficial é alterada principalmente pelo preparo do solo. Quando o solo é submetido a um sistema de manejo conservacionista, em que seu preparo é executado por meio de escarificador, seguido ou não de gradagem, apresenta a superfície mais rugosa do que quando submetido a um sistema de manejo convencional, em que o preparo é executado por meio de aração com arado de discos seguida de gradagens (BERTOL *et al.*, 2006). Portanto, nos sistemas de manejo conservacionistas, com exceção da semeadura direta, a rugosidade superficial do solo é maior do que nos sistemas convencionais.

O índice de rugosidade proposto por ALLMARAS *et al.* (1966) é o mais utilizado na avaliação da rugosidade superficial dos solos (GAMERO & BENEZ (1990), COAN (1995) e OLIVEIRA (1997)), sendo as medidas feitas após o preparo, determinado-se o índice de rugosidade da superfície mobilizada.

A rugosidade resultante da ação dos equipamentos, em relação ao estado natural em que o solo se encontrava, é função do tipo de solo e dos implementos utilizados. Desta forma, solos mais ondulados podem se tornar mais uniformes após a ação de certos equipamentos, bem como solos com superfície mais plana podem tornar-se mais rugosos.

Os tipos de implementos utilizados no preparo do solo condiciona, em parte, maiores ou menores volumes de enxurrada.

A mecanização do solo, mais especificamente a utilização de implementos agrícolas, confere aos mesmos boa permeabilidade inicial. No entanto, o aumento da

taxa de infiltração da água, promovida pelo rompimento da camada superficial, não se mantém ao longo do tempo, devido à ação da chuva (BRESSION e BOYFFIN, 1990).

Com os avanços na pesquisa de processos erosivos o interesse pela medida e modelagem do microrrelevo, na superfície do solo tem aumentado, principalmente em modelos matemáticos de perda de solo, que utilizam a evolução da retenção de água em superfície, durante os episódios de chuva (DE ROO *et al.*, 1995). Dentro desse contexto, conhecer a variabilidade espacial da rugosidade superficial condicionadas por diferentes tipos de manejo e, submetidos à ação das chuvas, torna-se imprescindível para o desenvolvimento de tais modelos, pois, a maioria das propriedades do solo não variam aleatoriamente, mas apresentam correlação ou dependência espacial (MILLER *et al.*, 1988).

Considerando tais aspectos, o objetivo desta análise foi avaliar as alterações ocorridas na rugosidade superficial do solo pelas ações do preparo, no caso solo raspado (sem preparo) e solo arado, bem como a influência das chuvas sobre a rugosidade superficial e evolução da mesma durante os eventos de precipitação. Procurou-se ainda correlacionar os índices de rugosidade aos valores de perda de solo e água nos mesmos eventos de precipitação, apresentados no capítulo anterior (Capítulo 2).

## MATERIAIS E MÉTODOS

A rugosidade superficial do solo foi estudada determinando-se a variação da altura de dados pontuais espaçado a cada 1 cm, medidos com um rugosímetro a laser acoplado a um computador portátil com as leituras automaticamente registradas (DE MARIA *et al.*, 2003), em uma área de 1 m<sup>2</sup> de superfície do solo, resultando em 10.000 pontos de leitura.

As leituras foram realizadas nas parcelas de erosão instaladas em Latossolo Vermelho-amarelo da Fazenda Canchim, apresentando 2 tipos de preparo do solo e 3 repetições:

- **Solo raspado (sem preparo):** apenas foi removida a cobertura vegetal do solo

- **Solo arado (sentido transversal ao do declive):** utilização de um arado de disco e uma gradagem

Sobre os tratamentos utilizados, foram aplicados 3 testes de chuva simulada com intervalos de 24 horas e 2 intensidades:

- **Primeiro dia: 30 mm/h durante 12 minutos**
- **Segundo dia: 30 mm/h durante 12 minutos**
- **Terceiro dia: 70 mm/h durante 6 minutos**

Foram realizadas leituras em todas as parcelas antes das simulações de chuva para caracterizar a rugosidade inicial dos solos.

Após a aplicação de cada precipitação simulada eram realizadas novas leituras nas 6 parcelas. Assim, foram realizadas 4 leituras em cada parcela: antes do ensaio, após a primeira, após a segunda e após a terceira simulação de chuva.

A posição do rugosímetro foi a mesma em todas as parcelas. Foram feitas marcações para que o equipamento fosse posicionado exatamente no mesmo lugar em todas as leituras.

A **Figura 32** mostra a localização do rugosímetro na parcela.



**Figura 32: Equipamento rugosímetro a laser, posicionado na parcela experimental de erosão.**

## **Determinação dos índices de rugosidade (RR)**

O índice de rugosidade calculado em todas as parcelas, antes dos ensaios com chuva simulada e após cada evento, foi o proposto por ALLMARAS *et al.*, (1966) modificado por CURRENCE, H.D. & LOVELY, W.G., (1970), sendo:

$$I = S \cdot X \qquad \text{Eq. 5}$$

Onde:

I= índice de rugosidade superficial;

S= desvio padrão dos logaritmos das elevações;

X= média entre as elevações.

Para a realização desses cálculos foram utilizadas as leituras do rugosímetro, num total de 9.000 pontos amostrados por evento, uma vez que, por causa de erros de leitura na borda de cada área amostrada em algumas das determinação, as 10 últimas linhas de leitura, 1000 pontos, foram subtraídos da análise final.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **Características do solo antes das leituras**

Algumas características do solo após a adequação das parcelas experimentais, que podem influenciar os padrões obtidos no presente estudo, estão apresentadas na **Tabela 8**.

**Tabela 8: Atributos físicos do solo**

<i>Parcelas</i>	<i>Granulometria (%)</i>			<i>Umidade (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<i>Argila</i>	<i>Silte</i>	<i>Areia</i>		
1	33,8	7,6	58,6	0,235178	1,59
2	31,9	15,5	52,6	0,253893	1,55
3	33,2	7,3	59,5	0,249943	1,50
4	30,8	9,6	59,6	0,228258	1,55
5	28,0	8,1	63,8	0,235261	1,50
6	28,8	6,4	64,8	0,216261	1,79

De acordo com os resultados apresentados, as características em questão não apresentam variação significativa entre si, como pode ser verificado no Capítulo 1. Assim, pode-se dizer que os valores de granulometria, umidade e densidade dos solos antecedentes às chuvas simuladas aplicadas não constituem fonte de variação na presente análise.

#### **Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva**

As **Tabelas 9 e 10** apresentam os índices de rugosidade (RR) obtidos para cada parcela, após cada ensaio de simulação de chuva.

A **Figura 33** apresenta os valores de rugosidade superficial do solo antes dos ensaios de chuva simulada e após cada evento, nas parcelas com solo raspado e a **Figura 34** nas parcelas com solo arado.

As diferenças entre os valores dos coeficientes de rugosidade entre as parcelas de mesmo preparo antes das simulações de chuva referem-se basicamente as variações decorrentes do processo de preparação do solo e das irregularidades naturais do terreno da área de estudo.

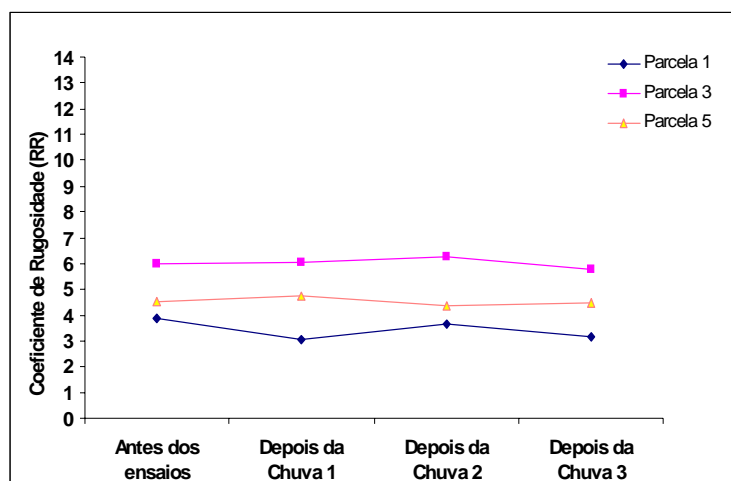


**Tabela 9: Índices de rugosidade (Solo Raspado)**

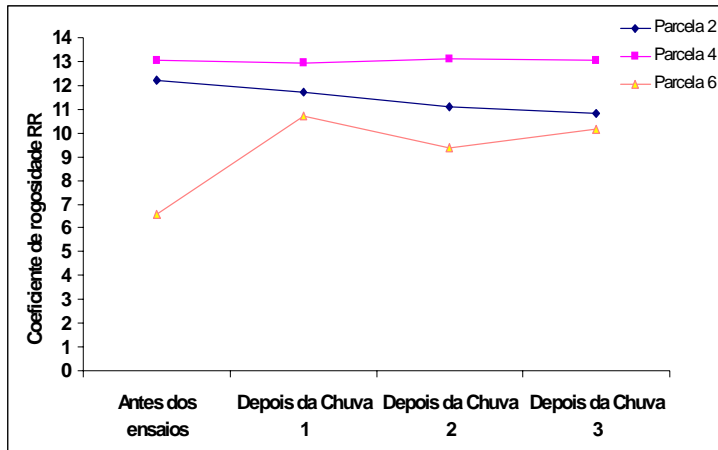
Parcelas	Antes da simulação	Depois do 1ºensaio	Depois do 2ºensaio	Depois do 3ºensaio
1	3,8872	3,0379	3,6439	3,1618
3	5,9862	6,0609	6,2856	5,7998
5	4,4949	4,7256	4,3629	4,4730

**Tabela 10: Índices de rugosidade (Solo Arado)**

Parcelas	Antes da simulação	Depois do 1ºensaio	Depois do 2ºensaio	Depois do 3ºensaio
2	12,2143	11,7306	11,1168	10,8200
4	13,0333	12,9507	13,0946	13,0292
6	6,5579	10,7082	9,3449	10,1623



**Figura 33: Índices de rugosidade nas parcelas com solo raspado**



**Figura 34: Índices de rugosidade nas parcelas com solo arado**

Aplicando-se o teste T de Student foi possível verificar que os valores de rugosidade do solo nas parcelas sem preparo (solo raspado, parcelas 1, 3 e 5), antes dos ensaios com chuva simulada, não apresentam diferenças significativas entre si.

Nessas mesmas parcelas, se comparados os valores de rugosidade após os eventos de simulação de chuva (antes da primeira e depois da primeira, segunda e terceira simulação), através da MANOVA seguida de um teste T de Student, é possível observar que também não existem diferenças significativas entre os coeficientes de rugosidade obtidos (valores de p entre 0,243 e 0,648).

Porém, em solo sem preparo, a superfície do terreno naturalmente encontra-se mais compactada e com baixa rugosidade, a ausência de cobertura proporciona a abertura de microdepressões condicionadas pelo embate direto das gotas de chuva sobre a superfície do solo. Assim, é natural que após as primeiras chuvas a rugosidade do terreno aumente em relação a condição inicial e, diminua gradualmente com o efeito das chuvas seguintes.

Em todas as parcelas consideradas houve uma tendência de diminuição da rugosidade a partir da última chuva. Deve-se considerar que neste estágio do experimento o solo já encontrava-se encharcado e que, a terceira simulação teve intensidade superior as demais, ou seja, passou de 30 mm/h para 70 mm/h. Esse comportamento é semelhante aos obtidos por PAZ GONZÁLES e TABOADA CASTRO (1996) e BERTOL *et al.*, (2006).

Se observados os índices de rugosidade obtidos após a última chuva nas parcelas com solo arado, pode-se verificar que a parcela 1 apresentou maior decréscimo no valor do mesmo. Essa diminuição pronunciada deve-se, possivelmente, as variações naturais do relevo da área. Considerando que a área de estudo vem sendo utilizada há muitos anos na rotação de diversas culturas é possível que, em áreas muito próximas possa haver diferentes declividades. Quanto maior a declividade maior será a velocidade do escoamento superficial da água da chuva e, portanto a sua ação sobre as microdepressões e microelevações do terreno, como constatado também por BERTOL *et al.*, (2006).

Na condição solo arado foi aplicado inicialmente o teste T de Student para verificar se há diferenças significativas entre os valores de rugosidade antes dos ensaios com chuva simulada. Os resultados demonstraram não existir diferenças significativas entre os valores iniciais, bem como entre valores obtidos antes e após cada evento de simulação (MANOVA seguida de teste T, valores de p entre 0,206 e 0,722).

A modificação nos índices de rugosidade após as chuvas nas parcelas com solo arado apresentou comportamento diversificado. A Parcela 2 apresentou o maior decréscimo no valor do índice, em relação a condição inicial (antes das chuvas). Esta parcela encontra-se espacialmente alocada imediatamente ao lado da Parcela 1. Pode-se então afirmar que, além da influência das chuvas incidentes como fator modificador do microrelevo do solo, a declividade tenha contribuído na diminuição da rugosidade do solo pelo aumento da velocidade da enxurrada, iniciada ao final da primeira chuva.

A parcela 6 apresentou comportamento completamente diverso às demais, com aumento considerável no índice de rugosidade após a aplicação das chuvas.

A **Figura 35** mostra o aspecto dessa parcela antes do ensaio e, a **Figura 36** mostra a mesma parcela nos momentos finais da primeira simulação de chuva de 30 mm/h. É possível observar a forte transformação que a mesma sofre durante o evento, originando a formação de inúmeras micro depressões e micro relevos, refletindo no forte aumento do valor do coeficiente de rugosidade

Ao final da última chuva simulada, de alta intensidade (70 mm/h), nota-se, a partir da **Figura 37**, uma diminuição considerável no relevo irregular da parcela evidenciado anteriormente pelas micro depressões e elevações. Porém, não acontece uma diminuição no valor do coeficiente de rugosidade e sim um aumento, fato este explicado pela abertura de grandes depressões (sulcos) espalhadas por toda a parcela.

O trabalho de LERSCH *et al.*, (1987) mostra que a rugosidade do solo é influenciada pela estabilidade dos agregados. Possivelmente as características físicas do solo da parcela expliquem essa configuração, já que quanto maior a estabilidade dos agregados maior a dificuldade de destacamento das partículas de forma homogênea permitindo que se abram sulcos maiores de acordo com o escoamento preferencial da água da chuva.



**Figura 35: Parcela 6, com solo arado, antes dos ensaios**



**Figura 36: Parcela 6 ao final da primeira simulação**



**Figura 37: Parcela 6 após a última simulação**

Deve-se ressaltar ainda que, a modificação da rugosidade superficial do solo nas parcelas com solo arado teve diminuição mais intensa por ocasião da primeira chuva e, na chuva final essa condição já foi menos expressiva, concordando com o que observara COGO (1984). Isso indica que a rugosidade ao acaso do solo é mais importante no início do ciclo das culturas em termos de armazenamento de água e sedimentos na superfície do solo.

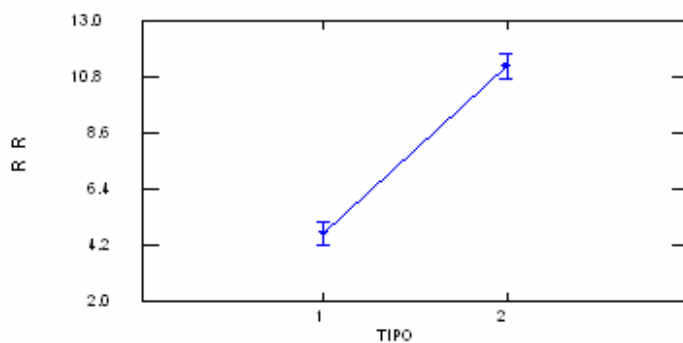
Apesar da relativa baixa incidência de chuva simulada, em relação a outros experimentos de mesma natureza pode-se constatar que os valores de modificação da rugosidade ao final do experimento demonstram que ainda resta uma capacidade significativa de retenção de água e sedimento na superfície do solo das parcelas, em relação à condição inicial. Características físicas do solo, principalmente os baixos valores de DMP, possivelmente contribuem para uma situação de pouca modificação nas condições de rugosidade do solo.

As alterações na rugosidade superficial do solo induzida pelos métodos de preparo variou entre 145% e 314%, considerando a similaridade entre todas as parcelas. Este cálculo foi baseado na comparação entre as parcelas com solo raspado (sem preparo) e solo arado, antes da aplicação das chuvas.

A **Figura 38** mostra os dois tipos de preparo do solo antes dos ensaios de simulação de chuva. Se comparados os valores dos dois tipos de preparo através do teste ANOVA resulta em diferença estatisticamente significativa, com valor de  $p=0$  (**Figura 39**).



**Figura 38: Aspecto das parcelas quanto ao tipo de preparo (solo raspado e arado, respectivamente)**



**Figura 39: Diferença entre os tipos de preparo pelo teste ANOVA**

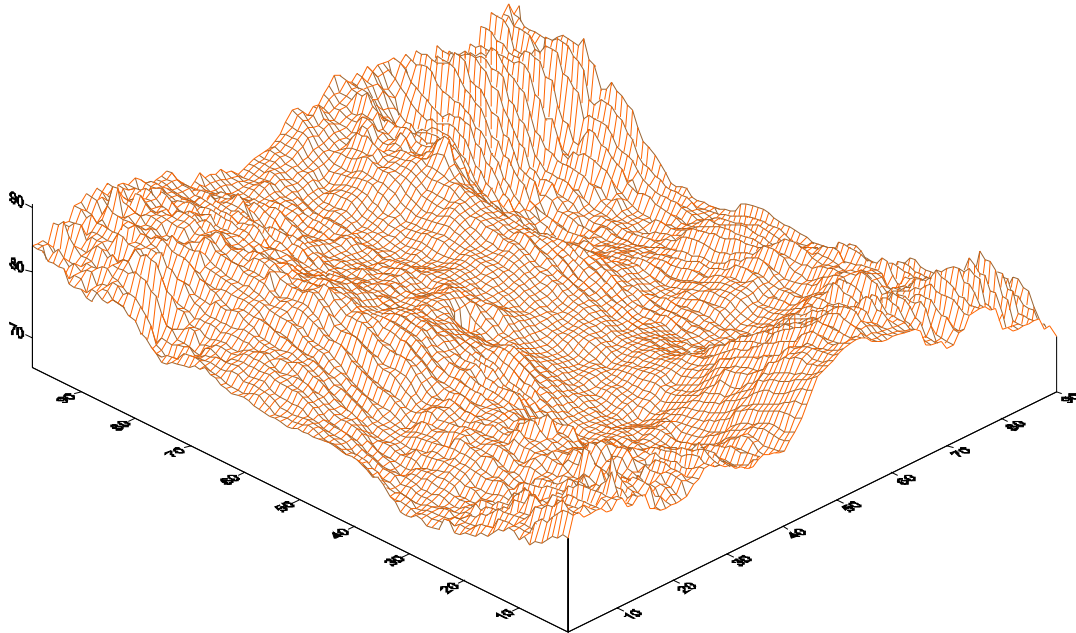
As alterações induzidas pela ação das chuvas ficou entre 0,5% e 19% nas parcelas com solo raspado e 0,03% e 12% em solo arado.

Padrão similar foi obtido por CASTRO *et al.*, (2006), onde as chuvas aplicadas tiveram menor impacto modificador se comparado às alterações induzidas pelos métodos de preparo do solo.

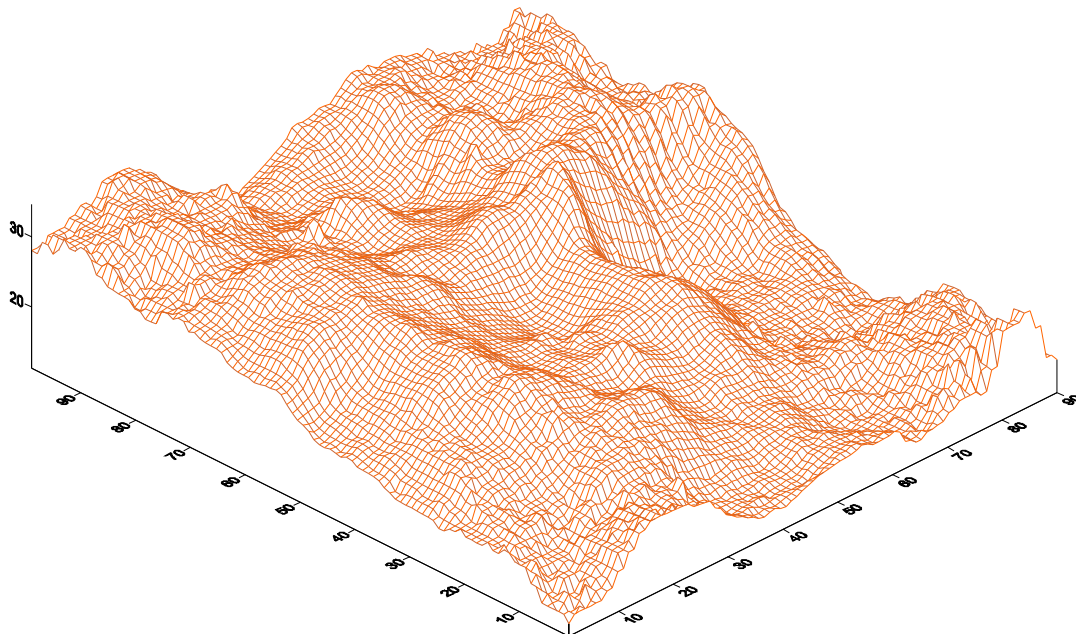
A seguir são apresentados os arranjos espaciais da superfície do solo, permitindo visualizar a evolução da rugosidade após cada evento de chuva simulada.



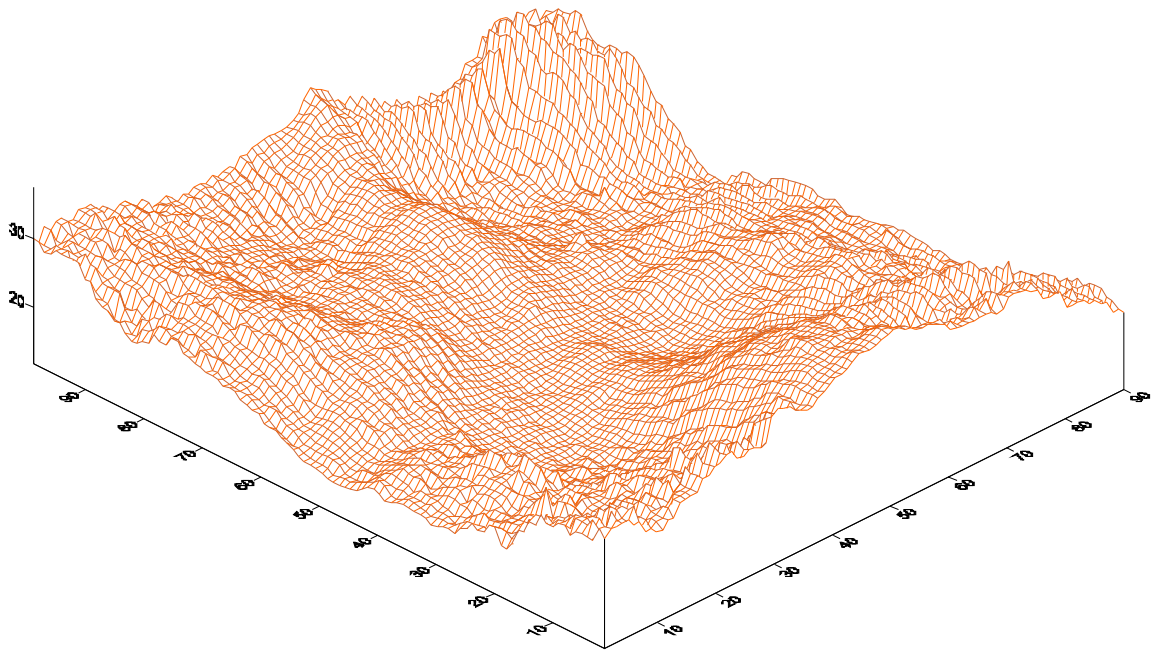
### Parcela 1 (Solo Raspado)



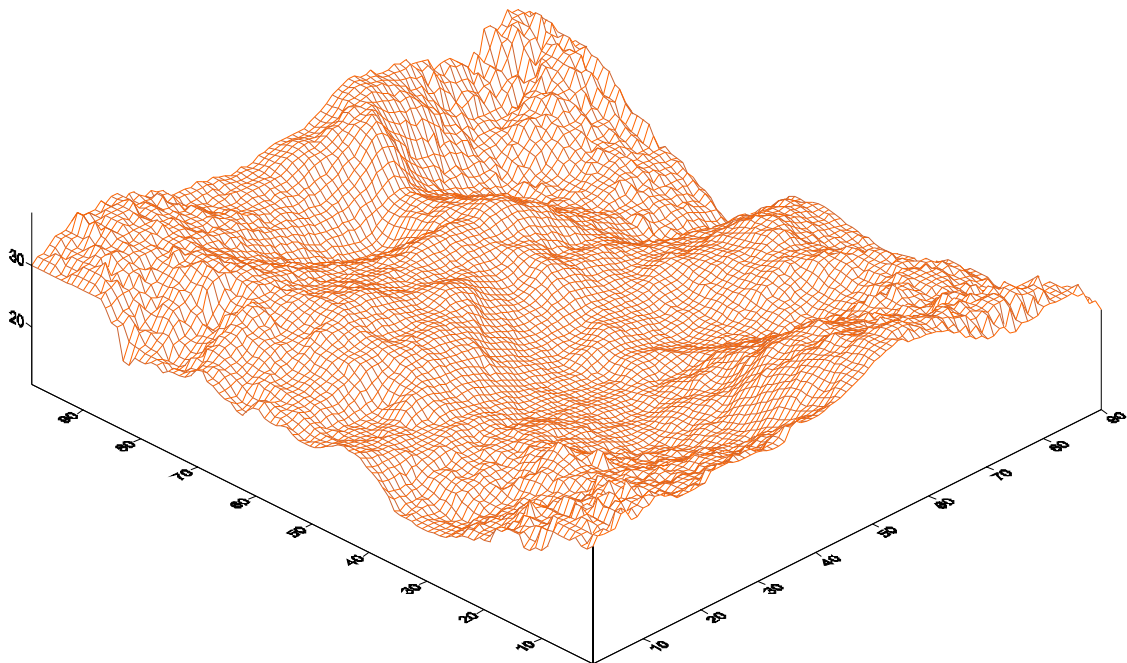
**Figura 40: Rugosidade superficial da parcela 1 antes da primeira simulação (RR= 3,8872)**



**Figura 41: Rugosidade superficial da parcela 1 depois da primeira simulação (RR= 3,0379 Precipitação= 30 mm/h)**



**Figura 42: Rugosidade superficial da parcela 1 depois da segunda simulação (RR= 3,6439 Precipitação= 30 mm/h)**



**Figura 43: Rugosidade superficial da parcela 1 depois da terceira simulação (RR= 3,1668 Precipitação= 70 mm/h)**

## Parcela 2 (Solo Arado)

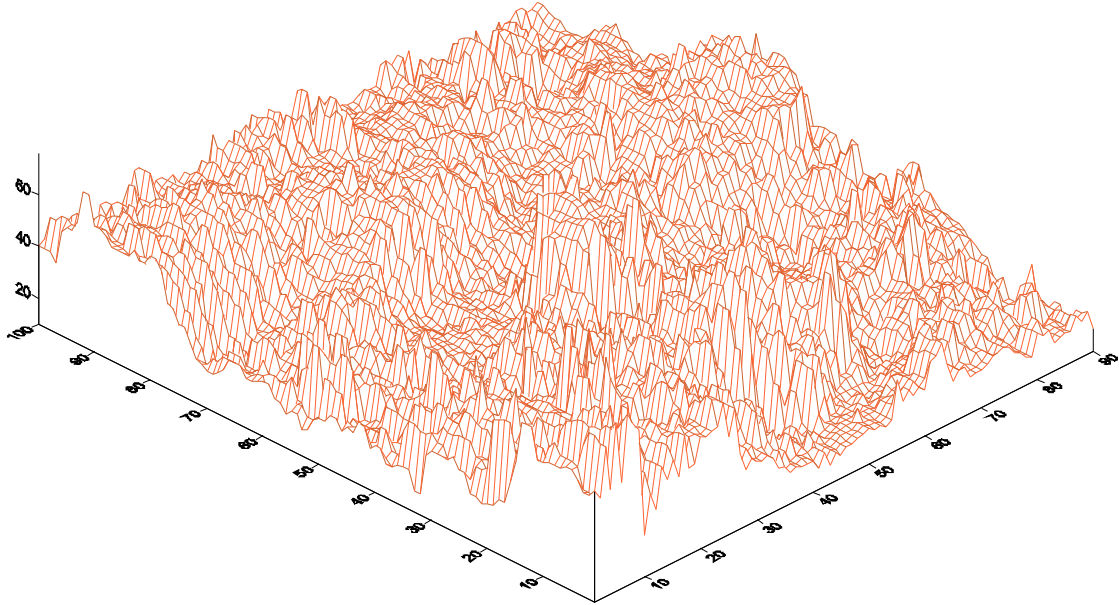


Figura 44 Rugosidade superficial da parcela 2 antes da primeira simulação (RR= 12,2143)

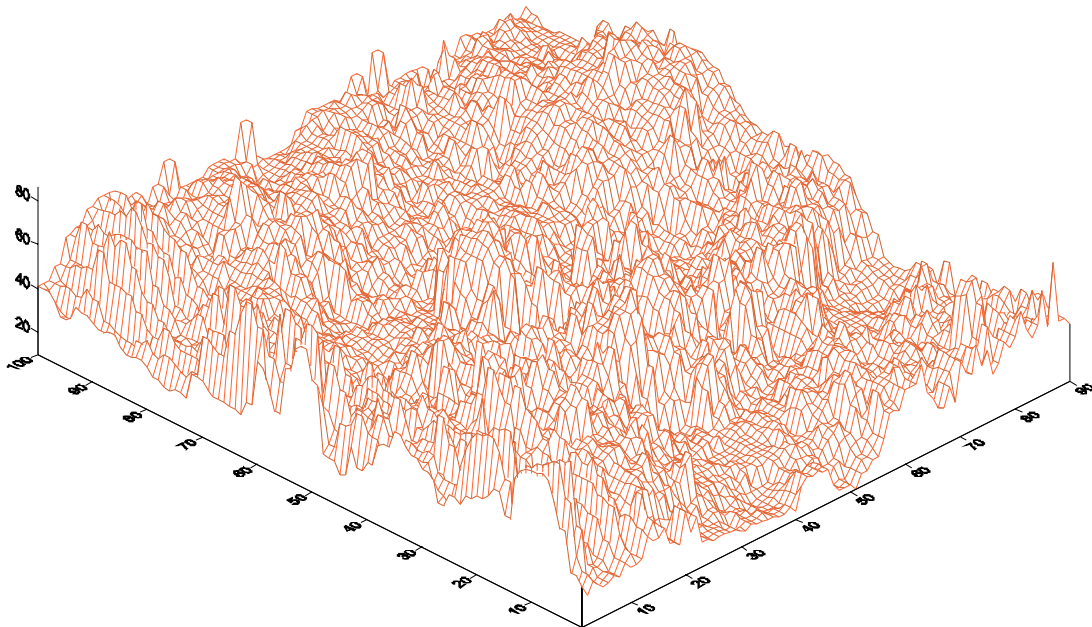
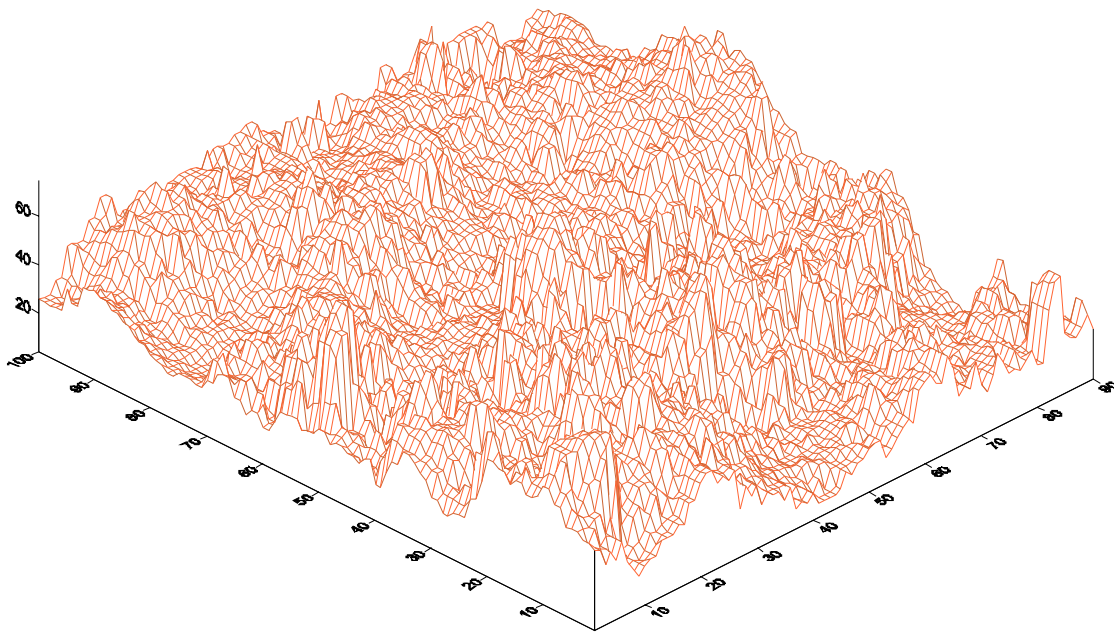
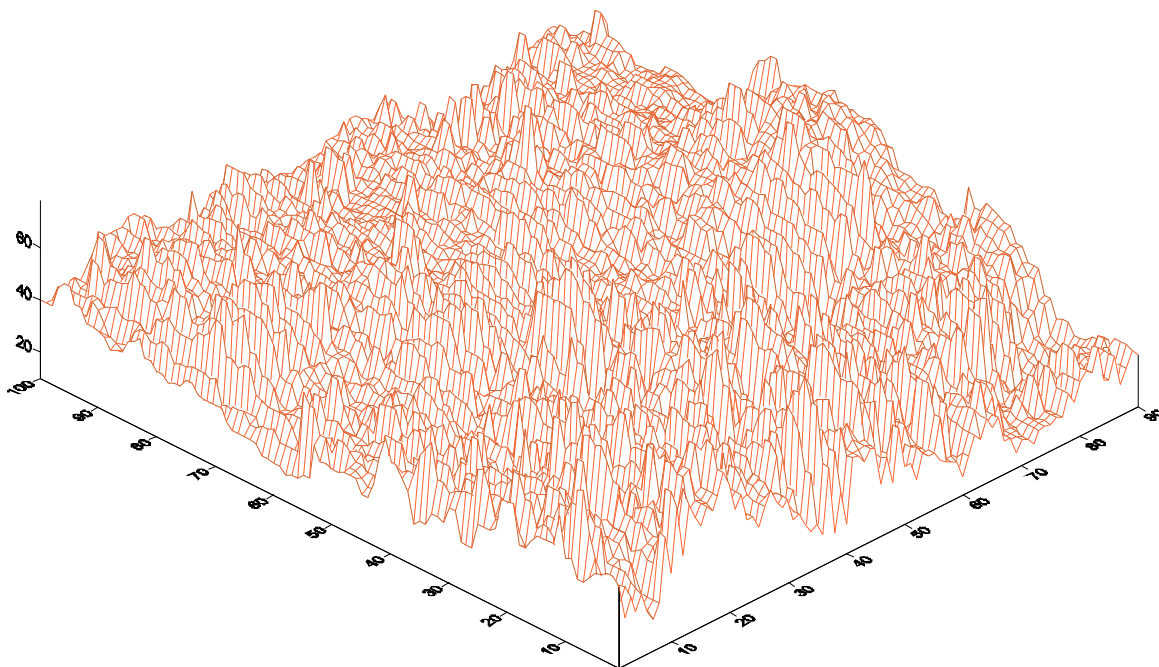


Figura 45: Rugosidade superficial da parcela 2 depois da primeira simulação (RR= 11,7306 Precipitação= 30 mm/h)



**Figura 46: Rugosidade superficial da parcela 2 depois da segunda simulação (RR= 11,1168 Precipitação= 30 mm/h)**



**Figura 47: Rugosidade superficial da parcela 2 depois da terceira simulação (RR= 10,8200 Precipitação= 70 mm/h)**

### Parcela 3 (Solo Raspado)

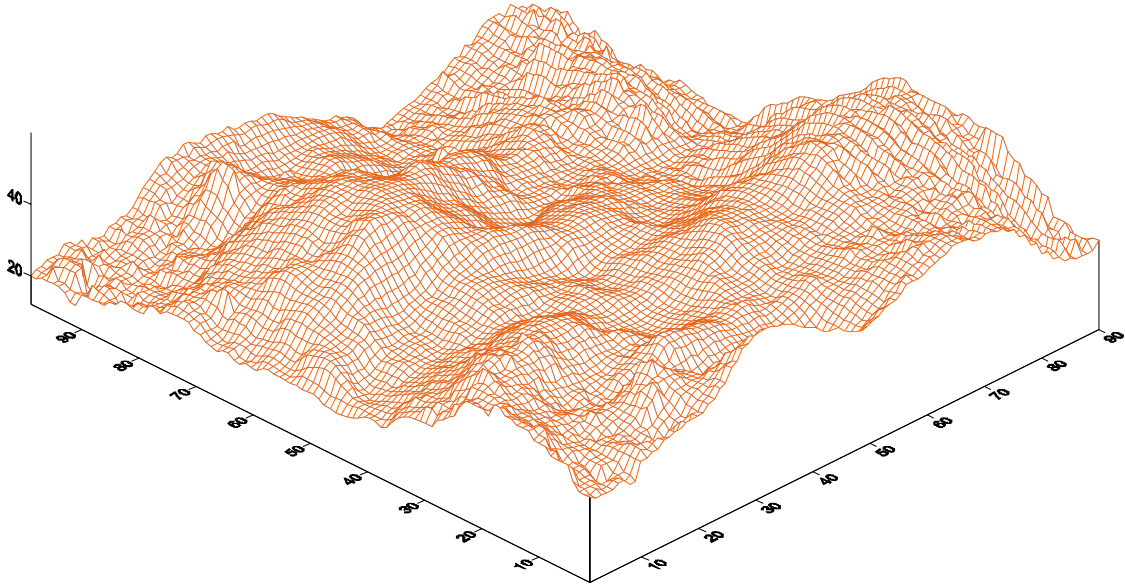


Figura 48: Rugosidade superficial da parcela 3 antes da primeira simulação (RR= 5,9862)

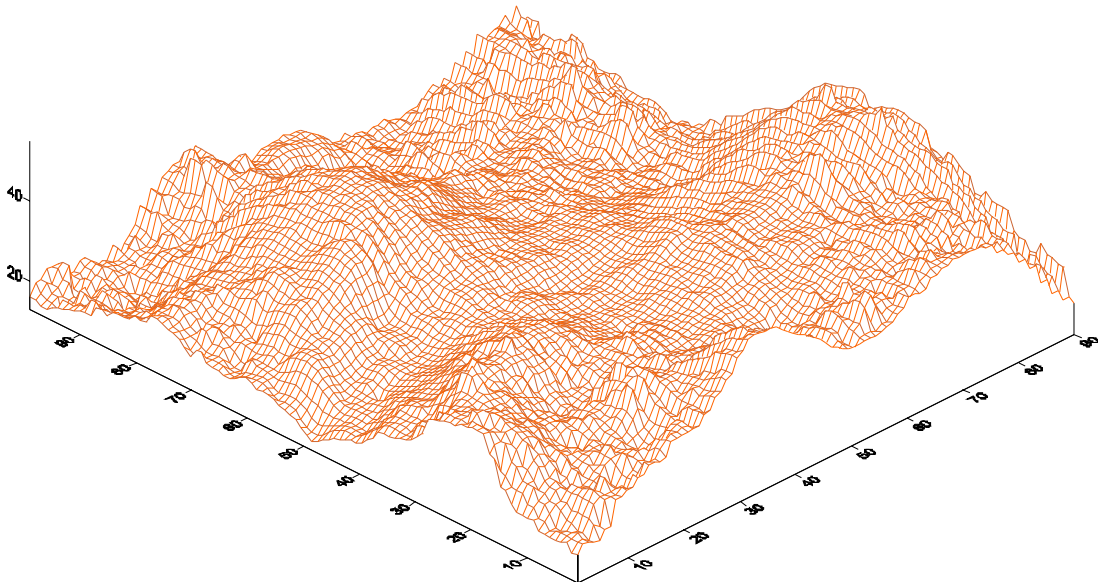
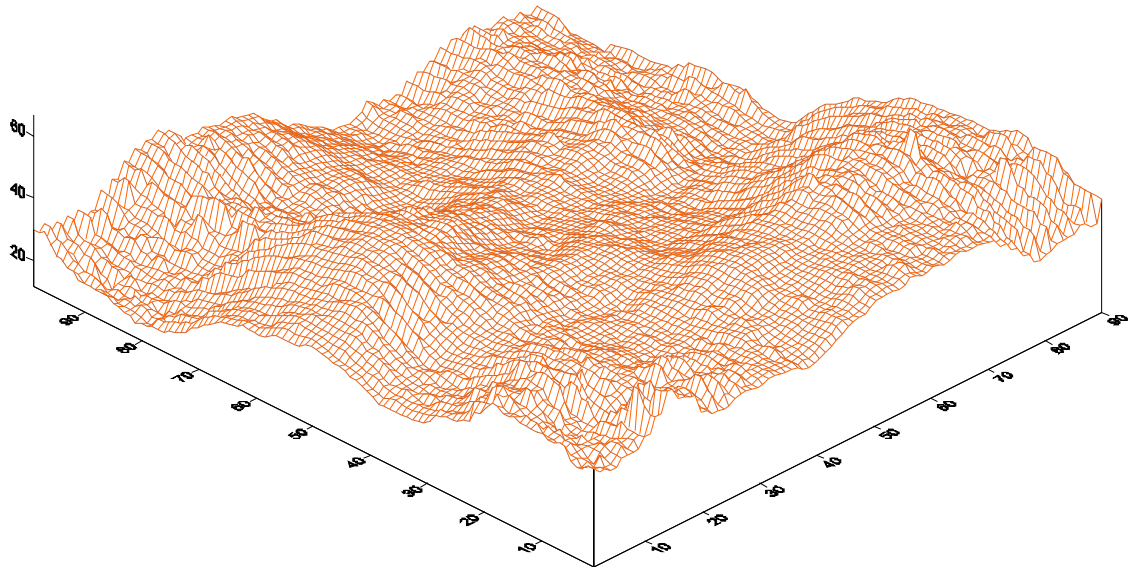
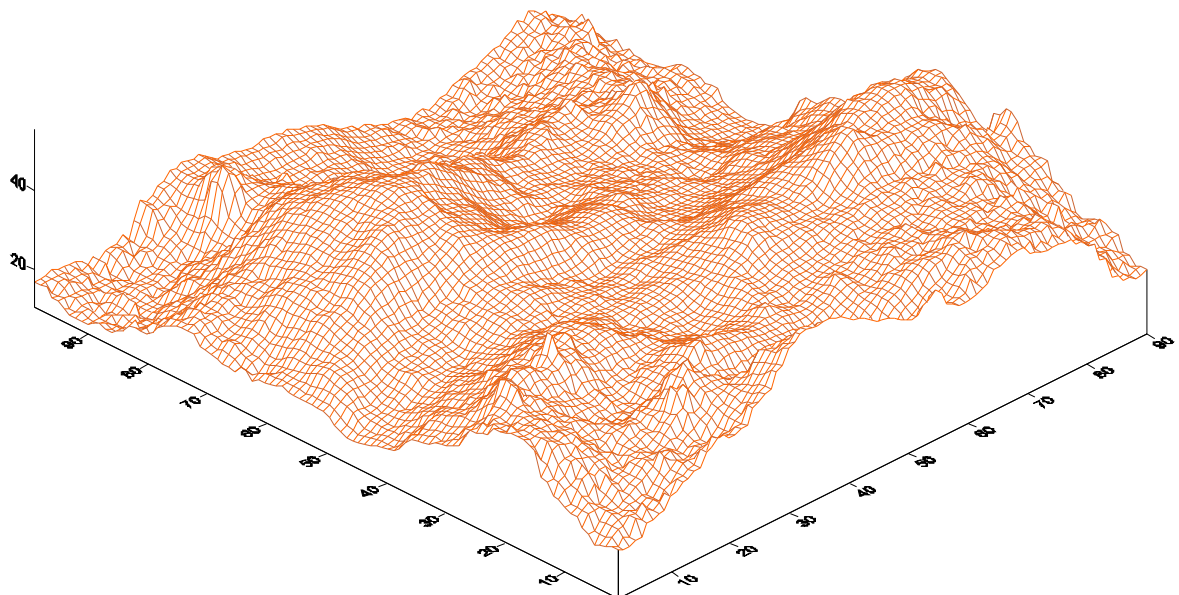


Figura 49: Rugosidade superficial da parcela 3 depois da primeira simulação (RR= 6,0609 Precipitação= 30 mm/h)



**Figura 50: Rugosidade superficial da parcela 3 depois da segunda simulação (RR= 6,2856 Precipitação= 30 mm/h)**



**Figura 51: Rugosidade superficial da parcela 3 depois da terceira simulação (RR= 5,7998 Precipitação= 70 mm/h)**

### Parcela 4 (Solo Arado)

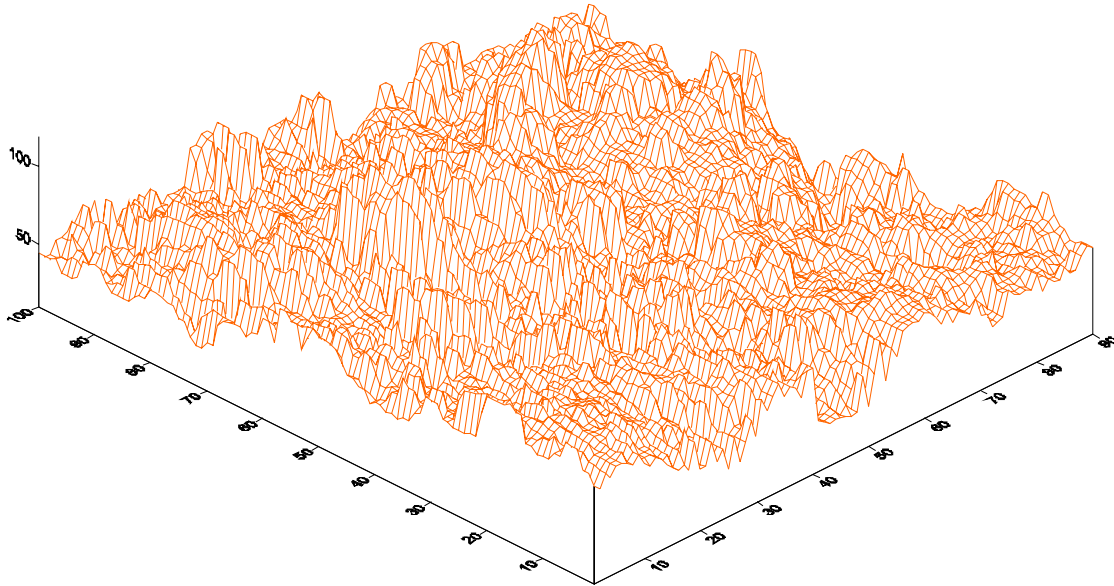


Figura 52: Rugosidade superficial da parcela 4 antes da primeira simulação (RR= 13,0333)

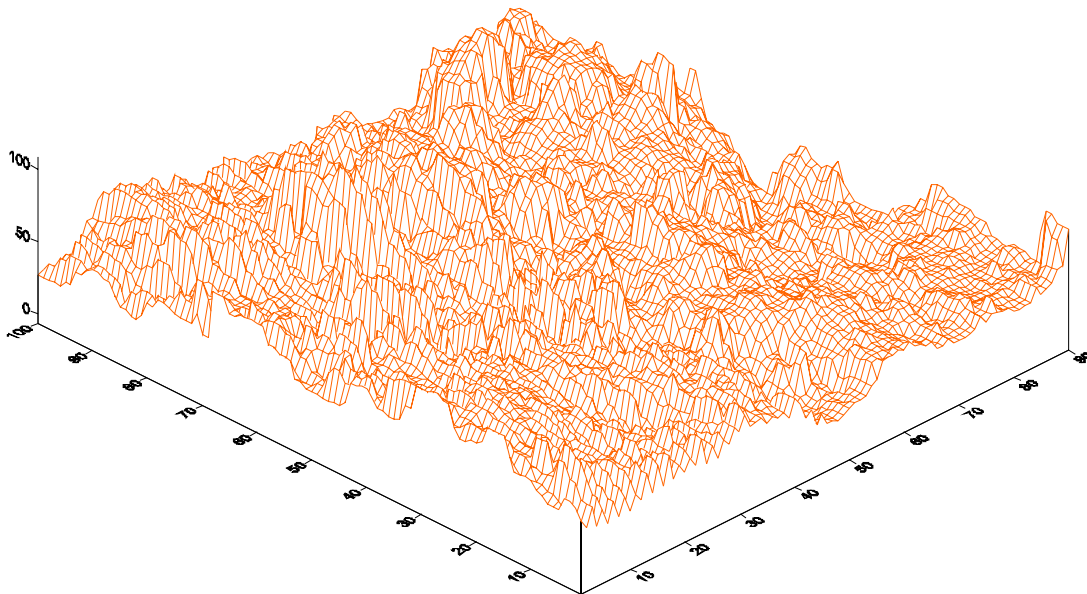
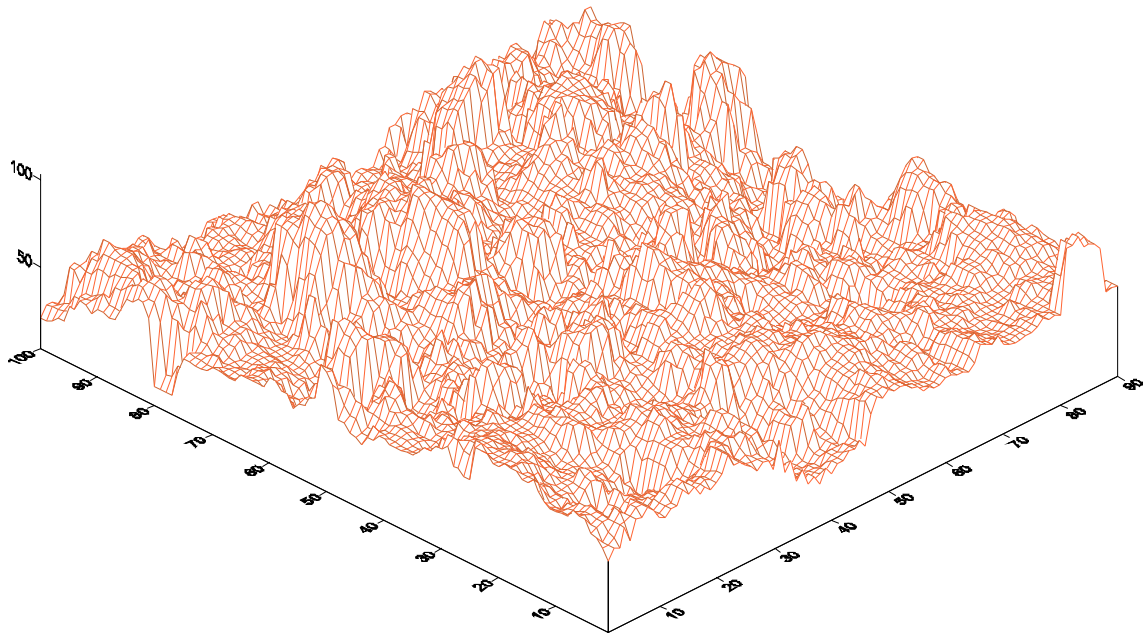
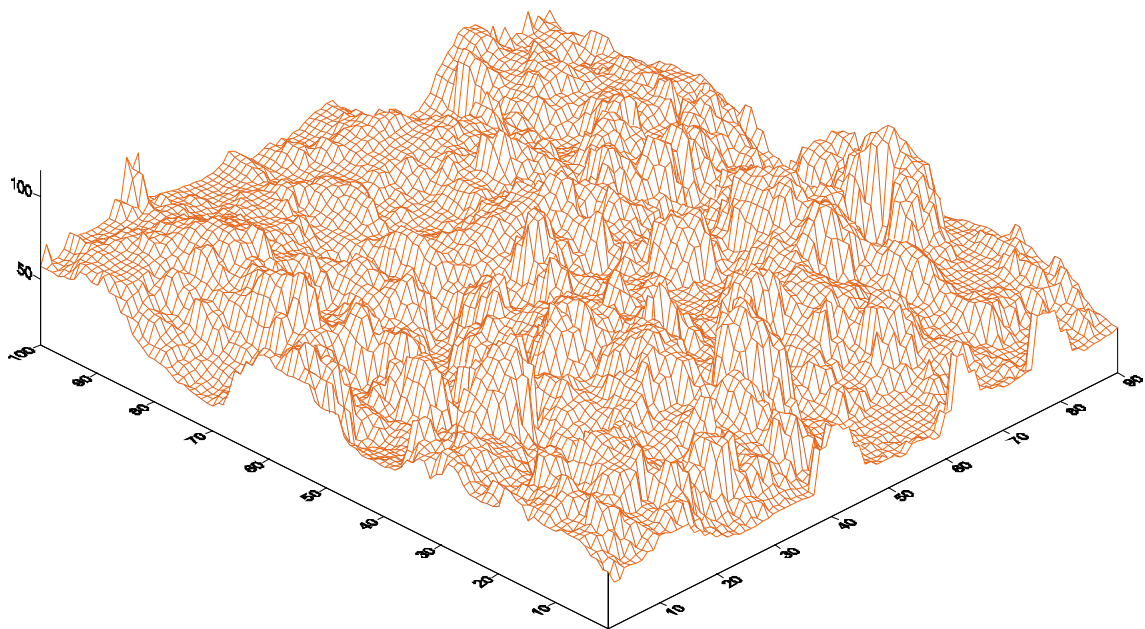


Figura 53: Rugosidade superficial da parcela 4 depois da primeira simulação (RR= 12,9507 Precipitação= 30 mm/h)



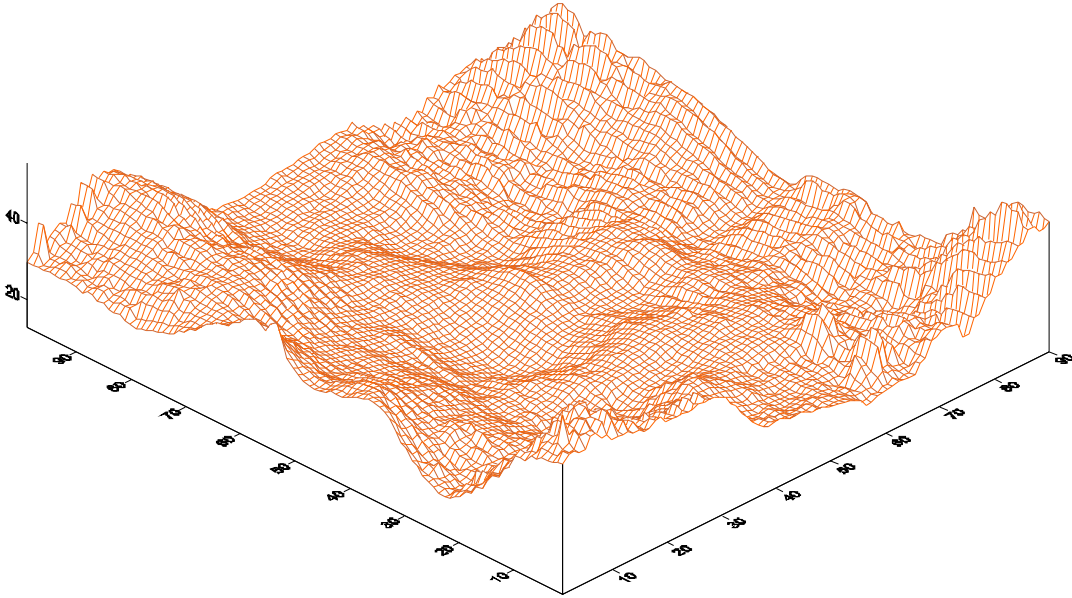
**Figura 54: Rugosidade superficial da parcela 4 depois da segunda simulação (RR= 13,0946 Precipitação= 30 mm/h)**



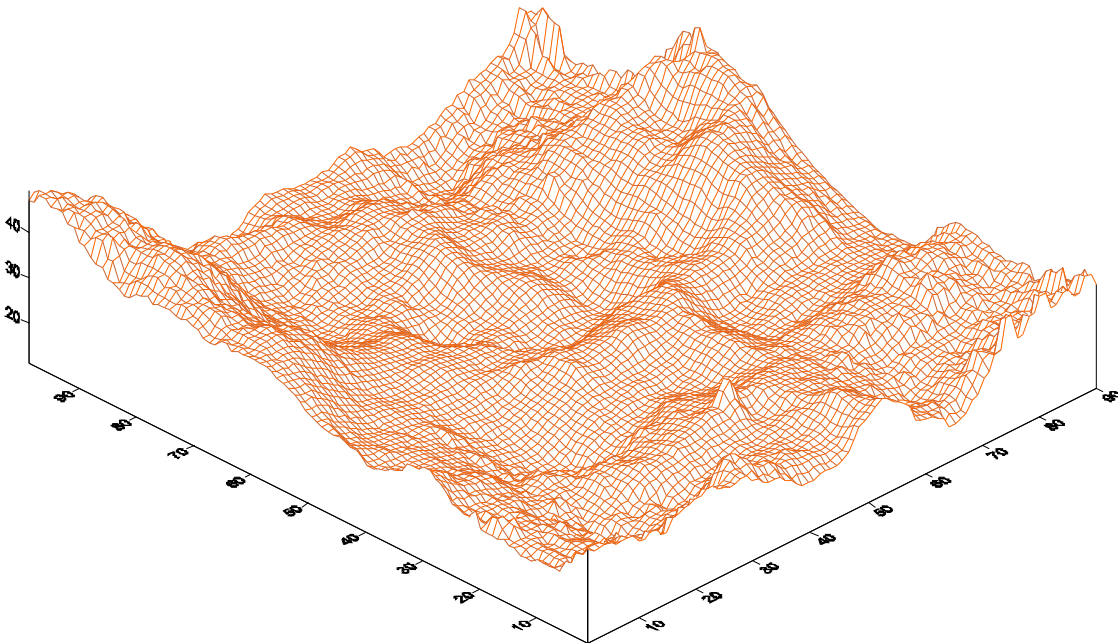
**Figura 55: Rugosidade superficial da parcela 4 depois da terceira simulação (RR= 13,0292 Precipitação= 70 mm/h)**



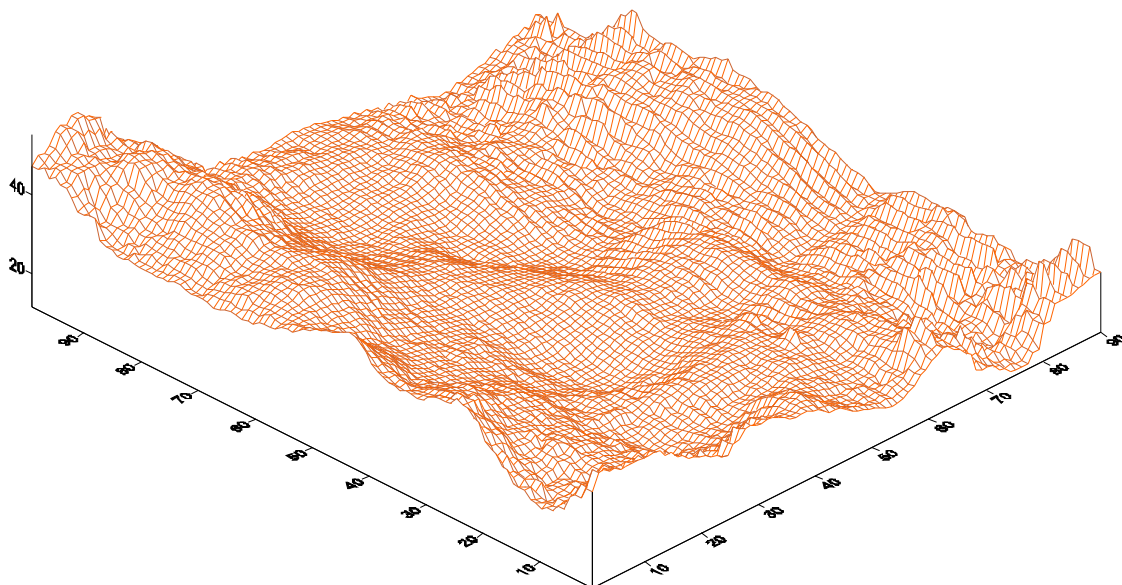
### Parcela 5 (Solo Raspado)



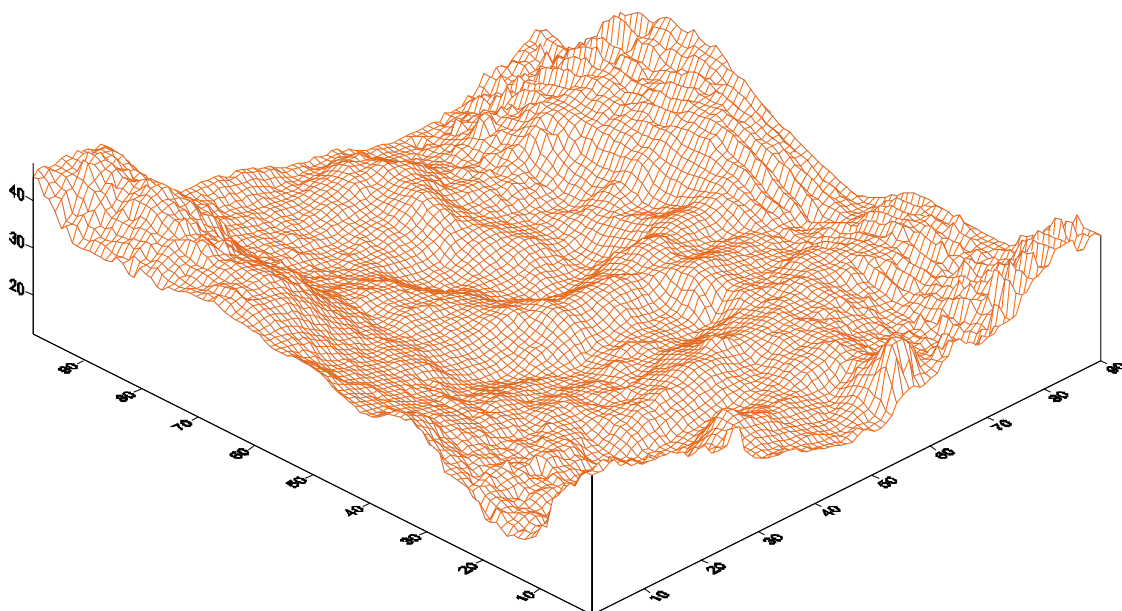
**Figura 56: Rugosidade superficial da parcela 5 antes da primeira simulação (RR= 4,4949)**



**Figura 57: Rugosidade superficial da parcela 5 depois da primeira simulação (RR= 4,7256 Precipitação= 30 mm/h)**



**Figura 58: Rugosidade superficial da parcela 5 depois da segunda simulação (RR= 4,3629 Precipitação= 30 mm/h)**



**Figura 59: Rugosidade superficial da parcela 5 depois da terceira simulação (RR= 4,4730 Precipitação= 70 mm/h)**

### Parcela 6 (Solo Arado)

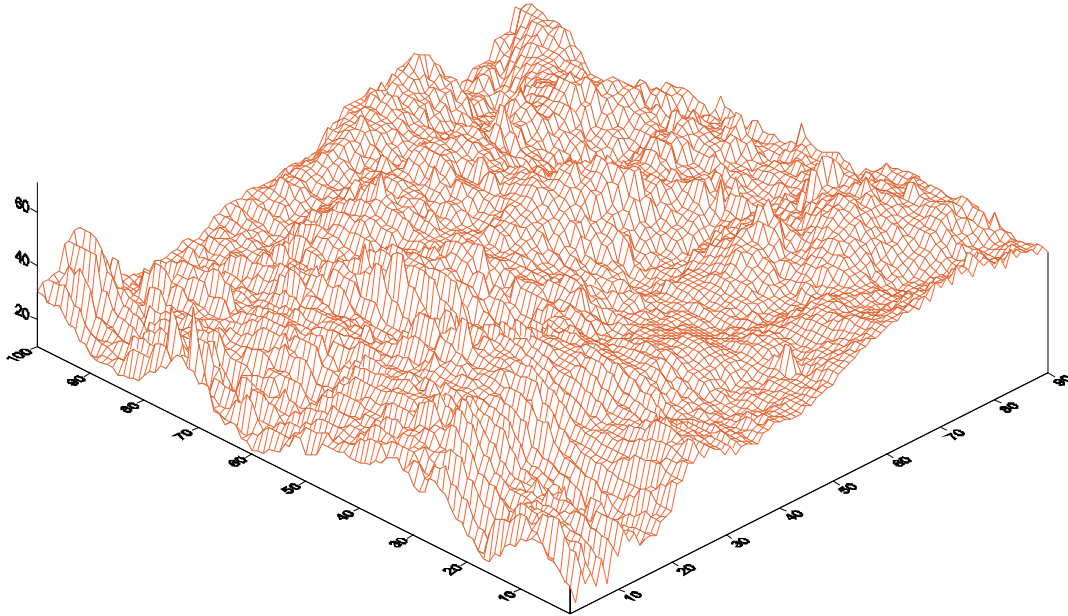


Figura 60: Rugosidade superficial da parcela 6 antes da primeira simulação (RR= 6,5579)

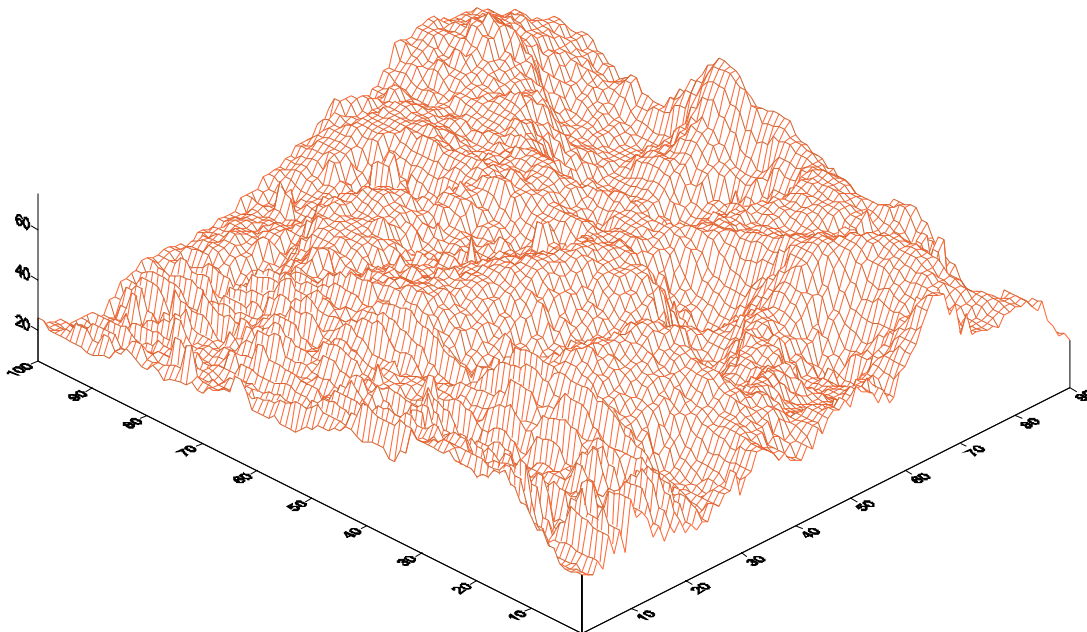
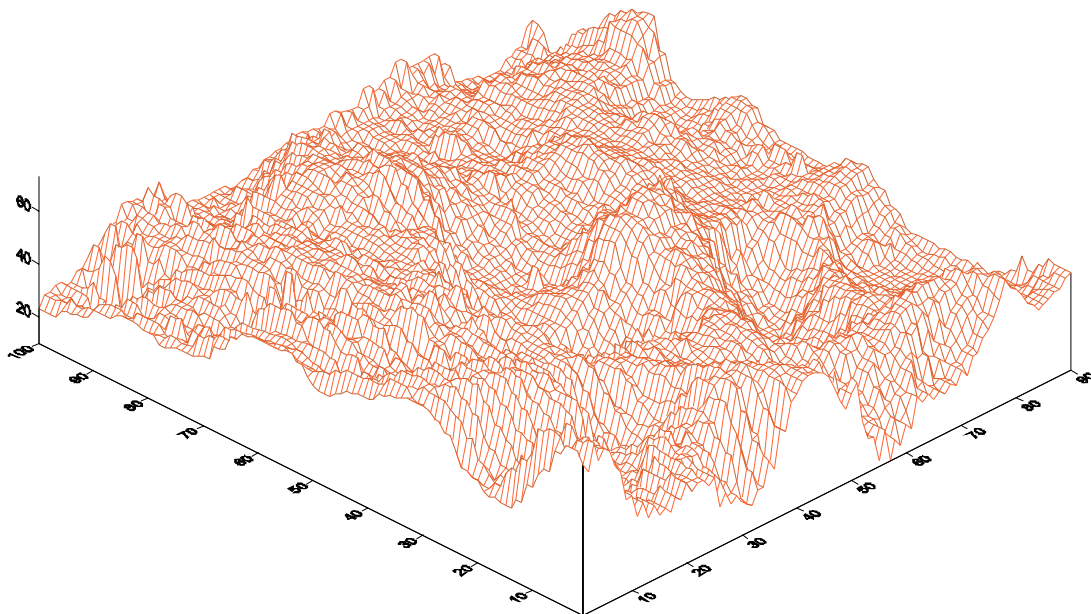
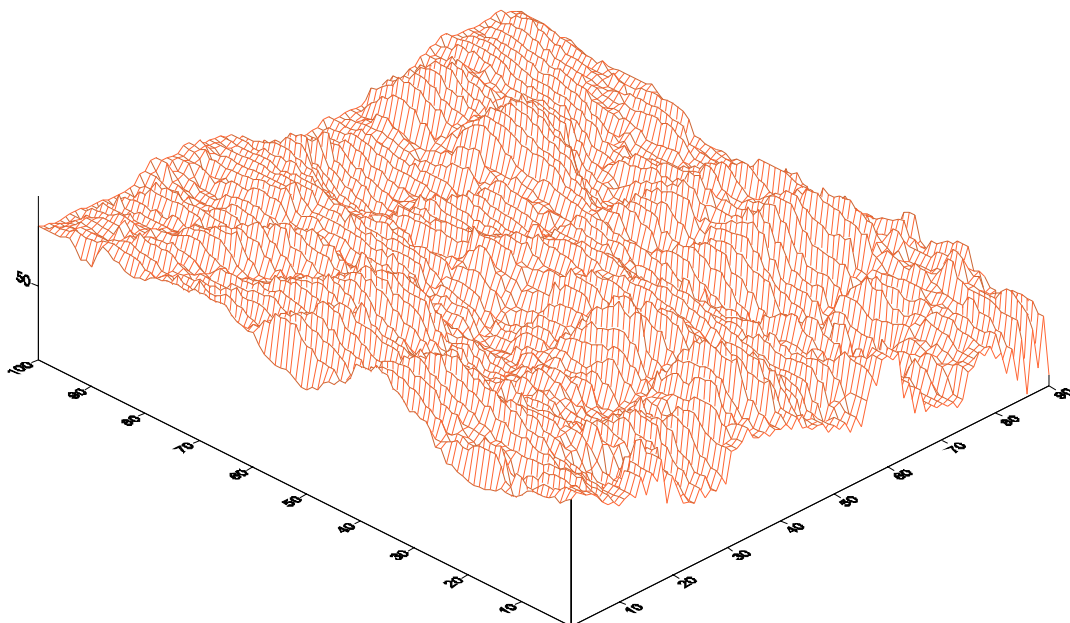


Figura 61: Rugosidade superficial da parcela 6 depois da primeira simulação (RR= 10,7082 Precipitação= 30 mm/h)



**Figura 62: Rugosidade superficial da parcela 6 depois da segunda simulação (RR= 9,3449 Precipitação= 30 mm/h)**



**Figura 63: Rugosidade superficial da parcela 6 depois da terceira simulação (RR= 10,1623 Precipitação= 70 mm/h)**

## **Correlações entre os coeficientes de rugosidade e os processos de erosão hídrica**

Sendo a erosão um fenômeno predominantemente de superfície, as condições físicas dessa superfície desempenham papel primordial no processo, facilitando-a ou dificultando-a, seja ela causada pela água da chuva ou pela enxurrada associada.

No caso de solos descobertos, a rugosidade superficial do solo por si só, assume papel relevante na redução da erosão hídrica, especialmente aquela induzida por métodos de seu preparo.

Através da análise de regressão foi possível identificar a influência da rugosidade na produção de sedimentos ao final de experimento.

Ao considerar todas as parcelas os resultados foram que 29,3%, entre todos os fatores dos quais a produção de sedimentos depende, são explicados pela rugosidade do solo.

Foi então realizado uma ANOVA para constatar a confiabilidade da análise de regressão. Obteve-se uma condição significativa ( $p=0,04$ ), indicando sucesso na análise.

Foram calculados os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) para cada parcela separadamente, utilizando os coeficientes de rugosidade e os totais de sedimentos produzidos ao final do experimento. Os resultados são apresentados na **Tabela 11**.

**Tabela 11: Coeficientes de correlação ( $R^2$ ) das regressões entre rugosidade superficial e produção de sedimentos**

<b>Parcelas</b>	<b>Preparo</b>	<b><math>R^2</math></b>
1	Solo Raspado	97,5%
2	Solo Arado	93,2%
3	Solo Raspado	78,6%
4	Solo Arado	19,8%
5	Solo Raspado	59,8%
6	Solo Arado	98,3%

Os resultados apresentados demonstram claramente a influência da rugosidade do solo nos processos de transporte de sedimento. Como variável a ser analisada em estudos de erosão, a rugosidade mostra-se de extrema relevância.

Em geral a rugosidade superficial, no início das culturas, reduz o transporte de sedimentos pela enxurrada, em função do aprisionamento dos sedimentos da erosão, promovendo sua deposição na área de ocorrência do fenômeno, reduzindo, assim, mais ainda as perdas de solo da lavoura (BURWELL *et al.*, 1966; COGO *et al.*, 1983; LEVIEN *et al.*, 1990).

A partir da observação dos totais de sedimentos produzidos em cada parcela ao final dos ensaios de simulação de chuva (**Tabela 12**) é possível entender de que forma que a rugosidade explica a produção de sedimentos em cada parcela

**Tabela 12: Produção total de sedimentos (g) nas parcelas.**

Parcelas	Preparo	Sedimentos produzidos (g)
1	Solo Raspado	301,3
2	Solo Arado	96,4
3	Solo Raspado	261,0
4	Solo Arado	37,1
5	Solo Raspado	65,5
6	Solo Arado	104,9

De acordo com os resultados já apresentados, a Parcela 1 apresentou a maior diminuição no coeficiente de rugosidade ao final dos ensaios. Adicionalmente, verifica-se que a mesma parcela apresentou a maior produção de sedimentos ao final dos ensaios. Pode-se aferir que a variável responsável em maior magnitude pela alta produção seja a diminuição pronunciada da rugosidade superficial do solo neste caso. A diminuição das microdepressões iniciais, nesse caso, contribuiu para diminuir a capacidade de retenção de sedimentos ao longo da parcela (rampa), refletindo na quantidade de sedimentos que saíram do sistema (erosão).

A diminuição mais moderada no coeficiente de rugosidade ocorreu na parcela 5, sendo a produção de sedimentos entre as mais baixas. Porém, neste caso há que

se considerar que o coeficiente de correlação é de 59%, indicando participação efetiva da variável na produção desta parcela, porém com menor magnitude.

Para identificar a influência da rugosidade na produção de enxurrada ao final do experimento foram realizadas análises de regressão.

A **Tabela 13** apresenta os totais escoados ao término dos ensaios em cada parcela.

**Tabela 13: Volume escoado total nas parcelas.**

<b>Parcelas</b>	<b>Preparo</b>	<b>Volume escoado (L)</b>
1	Solo Raspado	19,5
2	Solo Arado	14,5
3	Solo Raspado	22,5
4	Solo Arado	13,0
5	Solo Raspado	14,4
6	Solo Arado	13,8

Ao considerar todas as parcelas os resultados mostram que apenas 2,6%, entre todos os fatores dos quais o escoamento superficial depende, são explicados pela rugosidade do solo.

Assim, constata-se que a rugosidade do solo e suas funções físicas que governam, em grande parte, a produção de sedimentos são distintas daquelas que regulam o escoamento superficial da água da chuva.

Pode-se ainda afirmar que, a rugosidade superficial tem efeito importante na retenção dos sedimentos da erosão nas microdepressões formadas por ela, mais do que na retenção e na infiltração superficiais de água da chuva.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

- As parcelas experimentais utilizadas apresentaram similaridade entre si nos tratamentos utilizados;
- Quanto aos agentes modificadores da rugosidade, verificou-se que o aumento da rugosidade pelo preparo foi bem maior do que a sua redução pela chuva, independentemente dos tratamentos avaliados;
- As chuvas aplicadas (intensidade e duração) não foram suficientes para modificar, significativamente, a rugosidade do solo;
- A rugosidade do solo sofre maior diminuição nas primeiras chuvas. Após a incidência sucessiva das chuvas ocorre diminuição menos expressiva e tendência à estabilização;
- A parcela 6 apresentou comportamento distinto quanto a modificação da rugosidade ao longo dos ensaios, explicado por suas características físicas. O aumento pronunciado do índice de rugosidade após o término dos ensaios é reflexo da abertura de “crateras” na superfície do solo, observadas nas parcelas;
- Apesar de constatadas poucas variações nos valores do índice de rugosidade, a análise do arranjo espacial das parcelas durante os ensaios com chuva simulada permitiram visualizar o impacto da chuva sobre a superfície do solo em diferentes condições de preparo. Além disso, possibilitaram confirmar a forte alteração introduzida por métodos de preparo do solo;
- A rugosidade superficial do solo mostrou-se como uma variável de extrema importância na análise do processo erosivo, influenciando diretamente os valores de produção de sedimentos durante eventos de precipitação;
- Não foi possível constatar a influência da rugosidade sobre o escoamento superficial da água da chuva neste estudo. Sabe-se que há contribuição, porém acredita-se que o escoamento superficial tenha maior dependência de outras variáveis, em situações semelhantes às utilizadas no experimento em questão;



- Os índices de rugosidade obtidos neste estudo podem ser utilizados na derivação do fator C dos modelos EUPS e RUSLE, entre outros, já que foram obtidos experimentalmente, associados a condições conhecidas e controladas de tipo e preparo do solo e intensidade de precipitação;

**ANÁLISE INSTANTÂNEA DO PROCESSO EROSIVO DURANTE OS EVENTOS  
DE PRECIPITAÇÃO: UTILIZAÇÃO DE TRAÇADOR DE CONTRASTE E  
OBTENÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS DE ALTA RESOLUÇÃO**

**INTRODUÇÃO**

A erosão hídrica é constituída de três fases físicas distintas: desagregação, transporte e deposição. A desagregação é o processo de quebra e individualização das partículas da massa de solo, sendo causada, basicamente, pelo impacto direto das gotas da chuva contra a superfície do solo e pelo escoamento superficial. As partículas desagregadas salpicam com as gotículas de água e retornam à superfície, podendo vir a selar os poros superficiais, reduzindo a infiltração de água e, em alguns casos, aumentando a sua resistência à erosão pelas forças coesivas.

Assim que o volume de chuva excede a capacidade de infiltração, começa o escoamento superficial, que consiste no agente transportador dos sedimentos desagregados. Quando a energia do escoamento superficial, que depende do volume e da velocidade da água, não é mais suficiente para transportar o material sólido em suspensão ocorre a deposição, finalizando o processo (BORDAS & SEMMELMANN, 1993).

Características como intensidade, duração e quantidade de chuva, tamanho, velocidade e forma das gotas, energia cinética, frequência, distribuição sazonal e período de retorno da chuva apresentam grande importância no processo erosivo (WISCHMEYER & SMITH, 1978).

O aumento da velocidade do escoamento superficial reflete no aumento da quantidade de material superficial transportado. A velocidade da água, por sua vez, aumenta com o aumento da declividade e com a redução da rugosidade da superfície do solo (PARKER et al., 1995).

Os sedimentos transportados junto à superfície do solo movem-se por salpico, rolagem e arraste e são constituídos de partículas grandes, cujo movimento é altamente dependente do transporte. Um decréscimo na capacidade de transporte causa a imediata deposição dessas partículas.

Já os sedimentos em suspensão, os quais estão uniformemente distribuídos na lâmina de água escoada superficialmente, não são depositados imediatamente devido ao decréscimo na capacidade de transporte. Esse retardamento é resultado da pequena velocidade de sedimentação das partículas em suspensão (GRAF, 1971).

No intuito de acompanhar todo o processo de destacamento, transporte e deposição de partículas de solo em diferentes métodos de preparo e intensidades de precipitação distintas, foi proposta a utilização de um traçador do processo de erosão, aliado a obtenção de imagens digitais em tempo real.

As imagens obtidas foram analisadas no software SIARCS (Sistema Integrado para a Análise de Raízes e Cobertura do Solo), desenvolvido pela EMBRAPA/CNPDIA (JORGE e CRESTANA, 1996) em parceria com o IAC e a Universidade Estadual de Londrina/PR.

O SIARCS tem sido utilizado em diversos estudos e adaptado a diferentes formas de avaliação do sistema solo-planta entre outros componentes do meio agrícola. LIMA *et al.*, (2006) destacam a sua utilização na avaliação de medidas de áreas foliares (CALDAS *et al.*, 1992), cobertura do solo pelas plantas (JORGE *et al.*, 1993), sementes e frutos, análise de incidência de doenças e pragas foliares (JORGE e CRESTANA, 1996), porosidade do solo, densidade e distribuição de raízes no perfil e medidas do seu comprimento e diâmetro (CRESTANA *et al.*, 1994), e crescimento radicular “in vitro” (LIMA, 2004).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para que o SIARCS gere as informações necessárias é preciso que haja contraste no componente que se pretende analisar. Neste caso, o componente foi o solo, mais precisamente o solo superficial, que recebe diretamente a ação dos impactos das gotas de chuva e é transportado durante a erosão laminar.

Assim, foram selecionadas e testadas inúmeras substâncias (ex: fluoresceína, corantes alimentícios). Esses corantes deveriam suprir algumas necessidades, tais como:

- apresentar tons de coloração distintas da coloração do solo
- apresentar forte adsorção com as partículas de solo
- não apresentar reatividade
- não apresentar toxicidade

Finalmente, optou-se por utilizar o corante Azul de Metileno ( $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ), por sua forte adsorção com argilas e coloração extremamente diferente do que a do solo e ainda, por não apresentar reatividade e toxicidade, podendo ser utilizado em campo sem maiores inconvenientes.

A partir da definição do contraste foram preparados testes em escala laboratorial. Esses testes foram essenciais para o estabelecimento das condições de obtenção das imagens (distância, tempo de disparo, *zoom*) que seriam utilizadas em campo posteriormente e para avaliar os resultados da técnica no SIARCS.

Considerando a inexistência de trabalhos que combinassem a utilização de traçadores de contraste e análise de imagens digitais na investigação das fases do processo erosivo houve a necessidade de testar a técnica em escala laboratorial para avaliar o seu potencial de uso em condições de campo.

## Em laboratório

Foi adaptado um aquário de vidro anti-reflexivo de 1,0 m x 0,2 m x 0,2 m, no qual uma parte foi preenchida com solo do local do experimento e estabelecida uma declividade e uma leve compactação superficial. A camada superficial do solo foi coberta com uma mistura solo/azul de metileno na proporção 14 g/kg solo, conforme determinada em testes anteriores. Com o auxílio de um suporte, suspendeu-se a 40 cm, um chuveiro metálico de 20 centímetros de diâmetro, que foi alimentado com água a uma vazão constante, representando a precipitação (**Figura 64**).



**Figura 64: Experimento reproduzido em laboratório**

A câmera fotográfica (modelo digital, com zoom ótico) foi posicionada a 1 metro do alvo, na lateral do aquário, de forma a captar a região de transição superfície contrastada / solo natural. O suprimento de água foi acionado e as imagens obtidas, durante 3 minutos.

As imagens obtidas foram armazenadas no formato JPEG (**Figura 65**) e preparadas em programas de editoração específicos.

No estudo em questão, foi utilizado o software Image Pró Plus, que permitiu que áreas da figura que apresentam mesma coloração sejam destacadas.

A coloração de interesse corresponde a área marcada com azul de metileno.

Após este procedimento as análises foram convertidas ao formato Bitmap (8 bits- 256 cores), e selecionou-se a área de interesse de forma a diminuir a imagem e facilitar a análise.

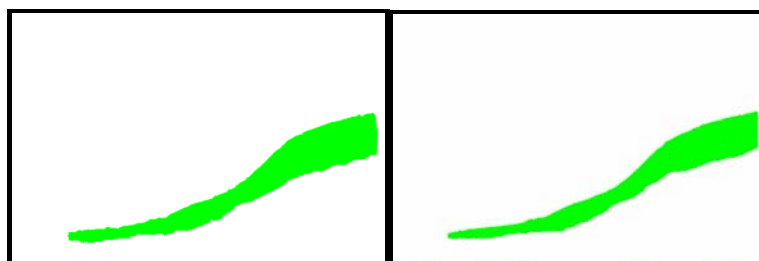
As imagens de interesse foram abertas no SIARCS e receberam a adição do fator escala, que foi representado por uma dimensão na imagem. Neste caso, a escala foi representada pela altura do aquário, ou seja, 20 cm.

Prosseguiu-se a binarização da imagem (**Figura 66**), onde a área contrastada foi isolada do restante da imagem. A contagem foi dada por área em cm<sup>2</sup>.

O experimento demonstrou bom potencial de utilização da técnica em campo, bem como definiu as condições ideais à obtenção das imagens.



**Figura 65: Exemplo de imagem obtida no experimento em laboratório**



**Figura 66: Exemplo da imagem binarizada no SIARCS**

## Em campo

Foram extraídos blocos de solo de 40 cm x 30cm x 10cm em cada parcela. Cada bloco recebeu a adição de 14 g/kg de azul de metileno.

Antes do início dos ensaios, o solo já marcado foi realocado no mesmo local de onde foi retirado. No caso das parcelas com solo raspado, houve compactação mecânica do solo realocado.

A **Figura 67** apresenta o solo marcado já realocado. Seguiu-se a mesma localização em todas as parcelas. Manteve-se a bandeja sobre o plot até o início do ensaio para evitar a exposição prolongada ao sol e a ação do vento.



**Figura 67: Parcela experimental com plot de solo marcado com azul de metileno**

As condições de filmagem foram rigidamente controladas, sombreando-se o experimento de forma a evitar reflexos e interferências na parcela durante os eventos de precipitação.

A câmera fotográfica de alta resolução (10 MP) foi posicionada a 1 m de distância do perfil marcado, na região da parede de acrílico e preparada para focalizar a região de transição solo marcado/solo natural em toda a extensão do plot.

A câmera foi acionada a cada 20 segundos, a partir do início dos ensaios.

As imagens foram tratadas no software Image Pró Plus e os cálculos realizados no SIARCS, como descrito anteriormente.

A **Figura 68** apresenta uma imagem obtida no início do experimento. A **Figura 69** apresenta a mesma imagem realçada pelo Image Pró Plus. A **Figura 70** apresenta imagem convertida a Bitmap (8 bits) e selecionada no ponto de interesse. A **Figura 71** apresenta a imagem binarizada pelo SIARCS para contagem de área.

Optou-se por selecionar as imagens antes do início dos ensaios e após cada minuto de precipitação em todas as parcelas, suficiente para a análise pretendida.

Apesar de todos os cuidados na obtenção das imagens em campo, houve perda de imagens por interferência da luz solar. O reflexo desta sobre a parede de acrílico é entendida pelo software como uma coloração distinta, havendo portanto dificuldade em identificar a área realmente marcada pelo corante nessas situações. Ressalta-se que essas interferências, muitas vezes, não são perceptíveis durante a realização do experimento.

Outro fator determinante na perda de imagens foi o início da infiltração de sedimentos contrastados em profundidade, inviabilizando a análise das imagens.

Assim, as imagens utilizadas neste estudo correspondem a:

- Primeira Simulação de Chuva (30 mm/h): Parcelas 2, 4 e 6
- Segunda Simulação de Chuva (30 mm/h): Parcelas 1, 2 4 e 6
- Terceira Simulação de Chuvas (70 mm/h): resultou no descarte de todas as imagens.





**Figura 68: Imagem obtida antes da simulação de chuva**



**Figura 69: Imagem realçada no software Image Pró Plus**



**Figura 70: Área selecionada da imagem**



**Figura 71: Imagem binarizada pelo SIARCS para contagem de área**

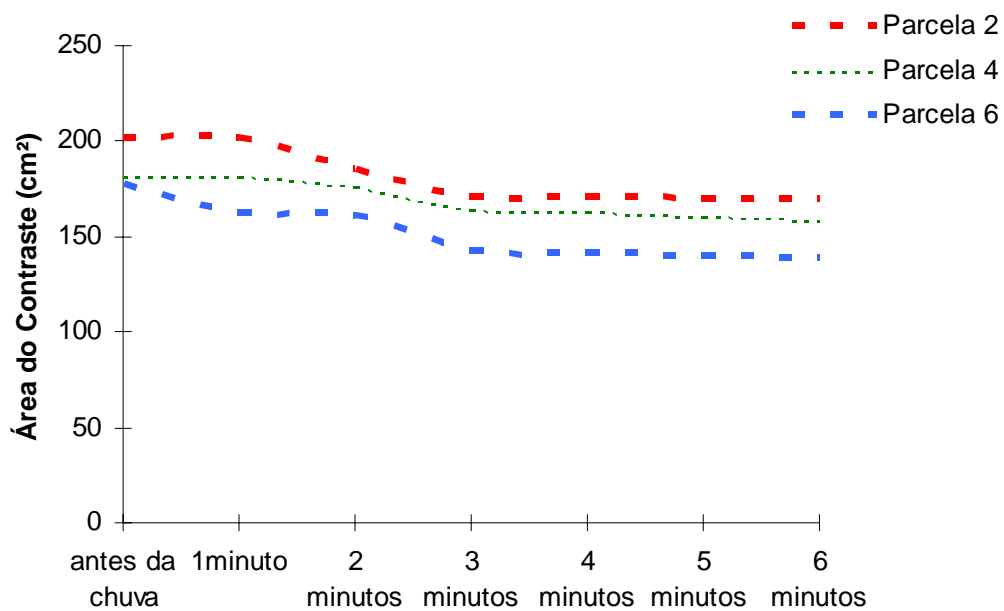
## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **Análise do processo erosivo nas parcelas com solo arado**

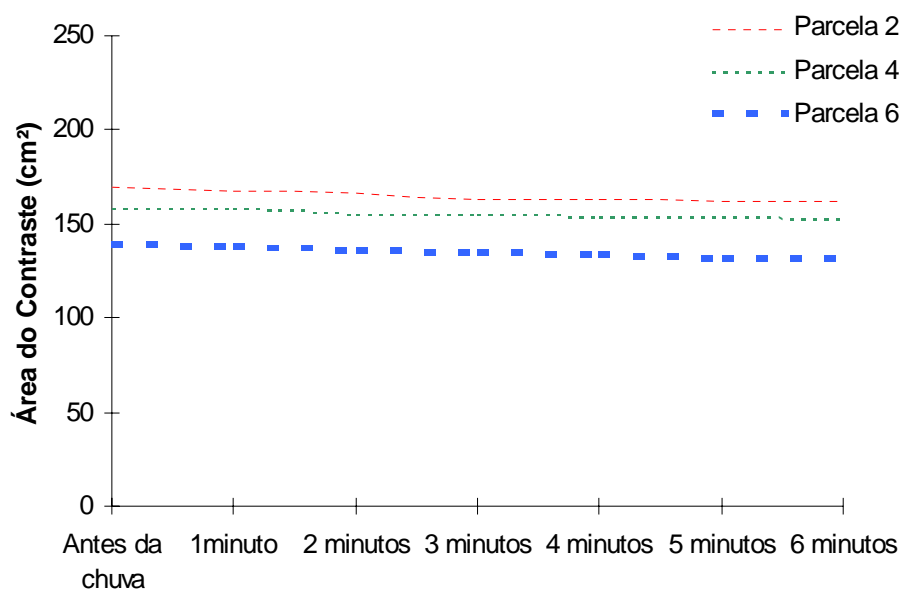
As **Figuras 72 e 73** apresentam a evolução do perfil de solo contrastado ao longo da duração da chuva, na primeira e segunda simulação, respectivamente. A intensidade de chuva foi de 30 mm/h nos dois eventos, representando uma precipitação de 6 mm no total de cada dia.

Os resultados mostram claramente o período de infiltração de água no solo, representado pelos 3 minutos iniciais de precipitação. Após este período, inicia-se o processo de desagregação do solo, indicado pela redução mais acentuada da área contrastada. A redução da área indica a saída (desagregação e/ou transporte) de partículas de solo da região analisada, ou seja, erosão.

Após o início do processo erosivo, condicionado pelo início da enxurrada, ocorre uma estabilização nos processos de desagregação e transporte dos sedimentos. Porém, os valores decrescem gradualmente e, considerando uma escala maior as perdas poderão ser consideráveis.



**Figura 72: Evolução do perfil de solo contrastado ao longo da duração da chuva, na primeira simulação em solo arado**



**Figura 73: Evolução do perfil de solo contrastado ao longo da duração da chuva, na segunda simulação em solo arado**

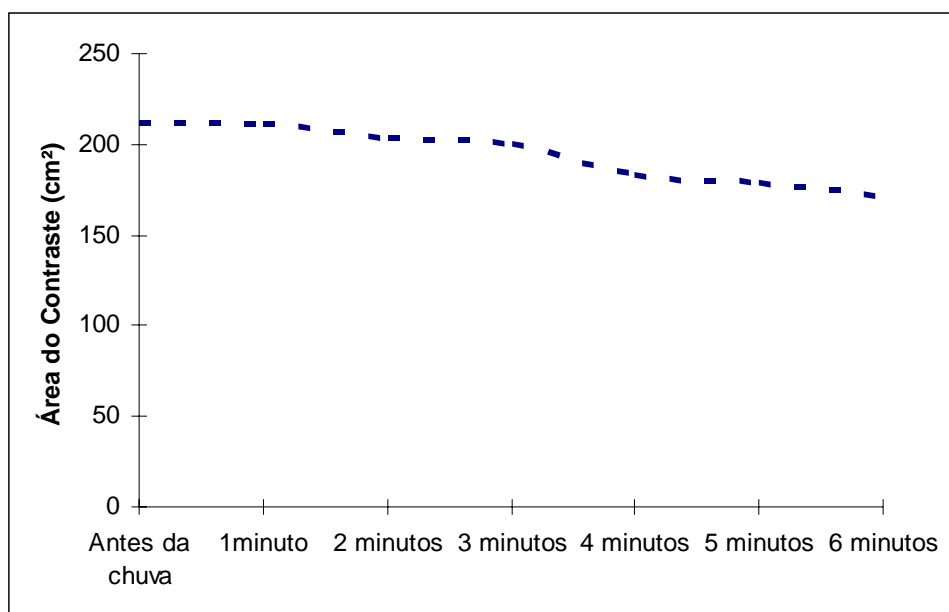
Acredita-se que no início da enxurrada os valores de perda de área não tenham sido tão expressivos pela ocorrência do transporte dos sedimentos mais finos, não resultando em diferenças acentuadas nas imagens.

Não foi possível avaliar o processo de deposição de partículas neste experimento, por tratar-se de área de análise reduzida e inexistência de traçadores na área a montante do plot contrastado.

### **Análise do processo erosivo nas parcelas com solo raspado**

Considerando que as imagens da primeira simulação em solo raspado foram descartadas, serão apresentados os resultados obtidos apenas em uma das parcelas com este tipo de preparo, ou seja, a parcela 1 no segundo dia de simulação. Ressalta-se que neste estágio o plot já havia recebido 6 mm de precipitação no dia anterior.

A **Figura 74** apresenta a evolução da área marcada com o traçador. Observa-se que no caso do solo raspado, o início do transporte é evidenciado logo após o primeiro minuto de chuva e as perdas de solo são mais expressivas.

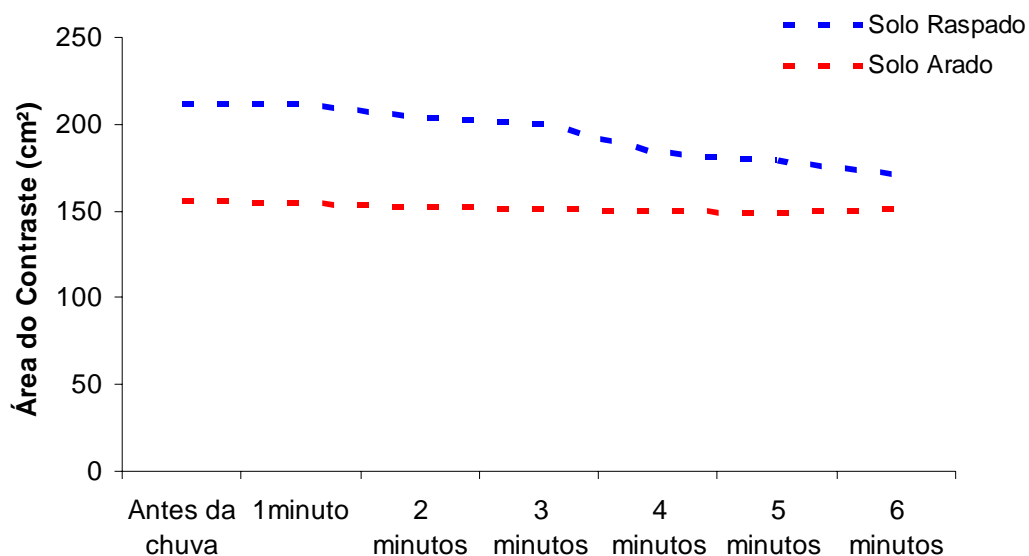


**Figura 74: Evolução do perfil de solo contrastado ao longo da duração da chuva, na primeira simulação em solo raspado**

## Influência do tipo de preparo nos padrões de transporte de sedimentos

A **Figura 75** apresenta os valores médios obtidos para as parcelas de mesmo preparo. Fica evidente o efeito do preparo do solo na minimização dos efeitos do processo erosivo. O tempo de início da enxurrada e conseqüentemente transporte de sedimentos é menor em solo sem preparo e as taxas de perdas aumentam mais expressivamente.

Os dados corroboram com os resultados apresentados no capítulo 2 que mostram que os métodos de preparo influenciam significativamente as perdas de solo. No entanto, o volume de água escoado superficialmente é mais dependente da intensidade da precipitação.



**Figura 75: Valores médios obtidos no perfil de solo contrastado, na segunda simulação em solo raspado e arado**

O potencial de aplicação da técnica foi avaliado na estimativa de perda de solo por erosão. Foi considerada a área perdida por erosão em cada plot e calculada a massa de solo correspondente.

A técnica utilizada não apresentou potencial de utilização em estimativas de perda de solo por erosão, pois superestimou os resultados. Acredita-se que a desagregação do solo por ocasião do preparo do plot e a pequena área utilizada sejam responsáveis por esta superestimativa. Acredita-se que a técnica teria seu potencial maximizado através da marcação do mesmo *in situ*, condicionando condições mais próximas ao do solo natural.

### **Potencial da utilização de traçadores de erosão e análise de imagens digitais pelo SIARCS: perspectivas e dificuldades**

Neste trabalho, o uso de traçadores de erosão se fez no sentido de mostrar de forma fragmentada as fases do processo erosivo em diferentes preparos do solo e influência da precipitação. A grande deformidade do perfil do solo analisado, por ocasião da aplicação do traçador impossibilitou sua utilização em estimativas de perda de solo por erosão.

Em escala laboratorial, a técnica apresentada representa bom potencial de aplicação, já que muitos experimentos desta natureza são conduzidos com perfis intactos de solo e pequenos simuladores de chuva.

É importante se adaptar um traçador que não desagregue a estrutura do solo e deverão ser controladas as variáveis de compactação do solo, umidade e declividade do solo.

Outro passo importante é a obtenção de imagens digitais do perfil de solo de interesse. Alguns cuidados devem ser tomados e vão desde a construção do experimento, o preparo do perfil, a filmagem e a digitalização.

As maiores dificuldades encontradas na obtenção das imagens dos solos é a incidência de luz em campo, fator que pode ser controlado em laboratório.

Outro fator importante consiste no isolamento da área de interesse, já que a fase final de retoques da imagem no SIARCS é feita manualmente. No caso de perfis de solo, a gama de cores da imagem é imensa, acarretando na seleção não apenas da área contrastada, mas de outras área fora desta seleção. Além do mais, em

determinadas situações partes da área contrastada não são selecionadas pelos programas de editoração. Desta forma, os ajustes devem ser realizados pelo usuário.

Além do tempo considerável utilizado neste processo, isso acarreta um grau de variação entre os diferentes usuários, dificultando a reprodutibilidade do experimento e diminuindo a confiabilidade dos resultados.

No entanto, alguns ajustes e inserção de novas ferramentas para facilitar o manuseio das imagens poderão suprir as dificuldades encontradas, ampliando as possibilidades de aplicação do software, aprimorando o processo de aquisição de dados e o seu processamento com maior precisão e rapidez.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

- A utilização de imagens digitais do solo apresentou boa contribuição no entendimento das fases iniciais do processo erosivo em condição de campo, em diferentes preparos de solo sob chuva simulada.
- A técnica utilizada não apresentou bom potencial de utilização na estimativa de perda de solo por erosão.
- As imagens mostram claramente as diferenças nos processos de infiltração, início de enxurrada e potencial desagregador de partículas entre os tipos de preparo do solo.
- Os resultados apresentados indicam uma nova e interessante linha de aplicação do SIARCS na área de Ciência do Solo
- O uso do traçador ideal e sua forma de aplicação, a obtenção das imagens e a introdução de novas ferramentas no SIARCS, aumentam as possibilidades de utilização da técnica de forma eficaz e precisa.

**AVALIAÇÃO DAS VIAS DE PERDA DE FERTILIZANTE NITROGENADO  
(SULFATO DE AMÔNIO) PELO PROCESSO EROSIVO E SUAS  
POTENCIALIDADES COMO POLUENTE DE ÁGUAS SUPERFICIAIS EM ÁREAS  
AGRÍCOLAS: O USO DO ISÓTOPO ESTÁVEL DO NITROGÊNIO COMO  
TRAÇADOR DOS PROCESSOS DE TRANSPORTE**

**INTRODUÇÃO**

A erosão dos solos é uma das maiores causas da degradação ambiental, pois ameaça seriamente a agricultura e o ambiente natural nos trópicos. Além de levar à remoção da camada superficial do solo e dos nutrientes também tem efeitos químicos e físicos no ambiente. Os efeitos físicos envolvem a perda de solos de culturas agrícolas e a deposição deste solo erodido no fundo de rios e outros corpos d'água, enquanto os efeitos químicos envolvem a perda de nutrientes que seriam utilizados pelas plantas e, outros constituintes químicos utilizados na agricultura, por meio do escoamento superficial e do material erodido (STROOSNIJDER, 1995). Os sedimentos são, provavelmente, os mais significativos de todos os poluentes em termos de sua concentração na água, seus impactos no uso da água e seus efeitos no transporte de substâncias químicas.

Em muitas regiões agrícolas o balanço de nutrientes dos cultivos é negativo e, os nutrientes perdidos por erosão dos solos constituem a principal via, que determina esta situação (VAN DEN BOSCH *et al.*, 1998).

O nitrogênio é o elemento mais exigido e mais exportado em culturas agrícolas, isso ajuda a explicar o fato de ser o nitrogênio o nutriente que primeiro se mostra



deficiente e também o de maior uso na adubação em terras de todo o mundo. Muitas destas formas nitrogenadas que atingem os cursos d'água tem origem antrópica, através da aplicação de fertilizantes e excrementos de animais nos mais diversos cultivos (MALAVOLTA, 1976; ESTEVES, 1988; MELÃO, 1997). As diversas formas de nitrogênio, em determinadas concentrações, apresentam implicações tanto na saúde humana quanto na qualidade geral do ecossistema aquático.

O fenômeno da erosão contribui para a perda de nitrogênio do solo, no entanto as estimativas não são muito precisas.

Fatores que influenciam no comportamento do nitrogênio aplicado ao solo sob forma de fertilizante são: tipo de solo, cobertura vegetal, declividade, tipo de solo, atributos físicos do solo, características da precipitação, forma de aplicação, tipo de fonte nitrogenada, período de aplicação, entre outros.

Durante o ano de 2000, no Brasil, cerca de 52% do nitrogênio em forma de fertilizante consumido foi na forma de uréia, 19% como sulfato de amônio e 12% como nitrato de amônio (MONESMITH, 2001). Sabe-se que a aplicação de uréia em superfície é desastrosa, pois é a fonte que apresenta maior potencial de perda de nitrogênio por volatilização.

Porém, o sulfato de amônio é uma opção como fonte de nitrogênio, que não sofre volatilização de nitrogênio amoniacal ( $N-NH_3$ ) quando o pH é inferior a 7, mesmo sendo aplicado sobre restos de cultura (VOLK, 1959). O sulfato de amônio é uma opção para inúmeras culturas e pode ser aplicado vantajosamente em cobertura e diferentes fases da cultura, como na pré-semeadura. Porém o sulfato de amônio tem sua eficiência reduzida basicamente por desnitrificação e lixiviação de nitratos. Resultados obtidos sob os mais diversos sistemas agrícolas mostram que raramente uma cultura aproveita mais de 60% do nitrogênio aplicado como fertilizante. O restante pode permanecer no solo, disponível para as culturas subseqüentes ou perder-se por diversos mecanismos tais como a volatilização, desnitrificação, lixiviação para fora da zona radicular e carreamento pela erosão.

O uso de isótopo estável, na forma de fertilizante marcado com  $^{15}N$ , é uma ferramenta apropriada para estudos dessa natureza, podendo avaliar com precisão o destino do fertilizante no sistema solo-água-sedimento.

A técnica isotópica que emprega o  $^{15}\text{N}$  como traçador é utilizada com sucesso na análise do deslocamento de nitrogênio em culturas agrícolas e consiste, basicamente, em fornecer ao objeto de estudo um composto químico no qual a razão isotópica ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ) do composto considerado é diferente da natural e, em seguida, avaliar a distribuição do isótopo no sistema (BENDASSOLLI *et al.*, 2002).

Para tanto, altera-se a concentração do isótopo menos abundante, o  $^{15}\text{N}$ , em relação a sua concentração natural (0,365%), para mais, tendo então como produto um material enriquecido em  $^{15}\text{N}$ . O material enriquecido pode atuar como traçador, comumente utilizado por possibilitar a obtenção de informações com sensibilidade e exatidão. A adição de um traçador a um sistema resultará na mudança da concentração natural de  $^{15}\text{N}$ , proporcional à quantidade incorporada ao sistema, possibilitando a sua quantificação (MURAOKA, 1991).

O  $^{15}\text{N}$  é considerado importante como traçador em estudos bioquímicos e agronômicos, sendo utilizado acerca de 30 anos no Brasil. Alguns trabalhos foram desenvolvidos no Brasil, objetivando a produção de compostos enriquecidos em  $^{15}\text{N}$ , com destaque para a obtenção de sulfato de amônio com elevado enriquecimento no isótopo  $^{15}\text{N}$ . Neste contexto destaca-se o Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA/USP, pioneiro e único fornecedor de compostos enriquecidos em  $^{15}\text{N}$  América do Sul, dominando a metodologia de produção de compostos nitrogenados com alto enriquecimento em  $^{15}\text{N}$ .

MURAOKA (1991) destaca duas vantagens inerentes ao uso das técnicas isotópicas:

- A extrema sensibilidade, com possibilidade de, tecnicamente, poder detectar o elemento na grandeza da ordem de 10 –15 g.

- A possibilidade de separar, na planta ou no solo, o elemento proveniente do fertilizante, daquele do solo ou de uma outra fonte, permitindo a análise dos efeitos dos tratamentos na ausência da resposta.

Neste contexto, cabe citar o trabalho de outros pesquisadores brasileiros na utilização de isótopos estáveis, assim como TRIVELIN *et al.*, (1995, 1996), MARTINELLI *et al.*, (1996), MARTINELLI *et al.*, (1998), OLIVEIRA *et al.*, (2000), GAVA *et al.*, (2003)

O interesse deste estudo é avaliar as perdas de nitrogênio, aplicado ao solo sob forma de fertilizante, pelo processo erosivo, sob o aspecto quantitativo e, suas inter-relações com as variáveis ambientais atuantes no processo, em âmbito experimental.

Todos os estudos que empregam a utilização do isótopo estável do nitrogênio, atualmente, referem-se à avaliações das perdas de nitrogênio aplicado ao solo pela absorção das culturas, lixiviação, volatilização, entre outros, no sentido de avaliar o aproveitamento de nitrogênio pelas mais variadas culturas. Não existem avaliações quanto ao processo de perda de nitrogênio de culturas através dos processos erosivos, com enfoque na potencial degradação dos recursos hídricos do meio agrícola. Considerando que os recursos hídricos dessas regiões são intensamente utilizados e necessários, a manutenção da qualidade dos mesmos torna-se de extrema relevância.

Neste sentido, é fundamental compreender os mecanismos de transporte do nitrogênio a partir dos processos erosivos atuantes no sistema, considerando que os corpos hídricos representam o destino final da água escoada superficialmente e dos sedimentos erodidos na superfície do solo.

Assim, poderão ser geradas informações importantes a respeito do transporte deste elemento no tempo e no espaço bem como analisar os componentes que potencializam esse transporte.

Nesta premissa, optou-se pela utilização de adubação nitrogenada na forma sulfato de amônio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 - ^{15}\text{N}$ , na concentração isotópica de 5,09% em átomos de  $^{15}\text{N}$  (**Figura 76**).



**Figura 76: Aspecto do Sulfato de Amônio ( $^{15}\text{N}$ ) produzido no CENA/USP**

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O fertilizante sulfato de amônio foi aplicado em quantidades iguais em 6 parcelas experimentais de 33 m<sup>2</sup>, com 2 tipos de preparo do solo em Latossolo Vermelho Amarelo.

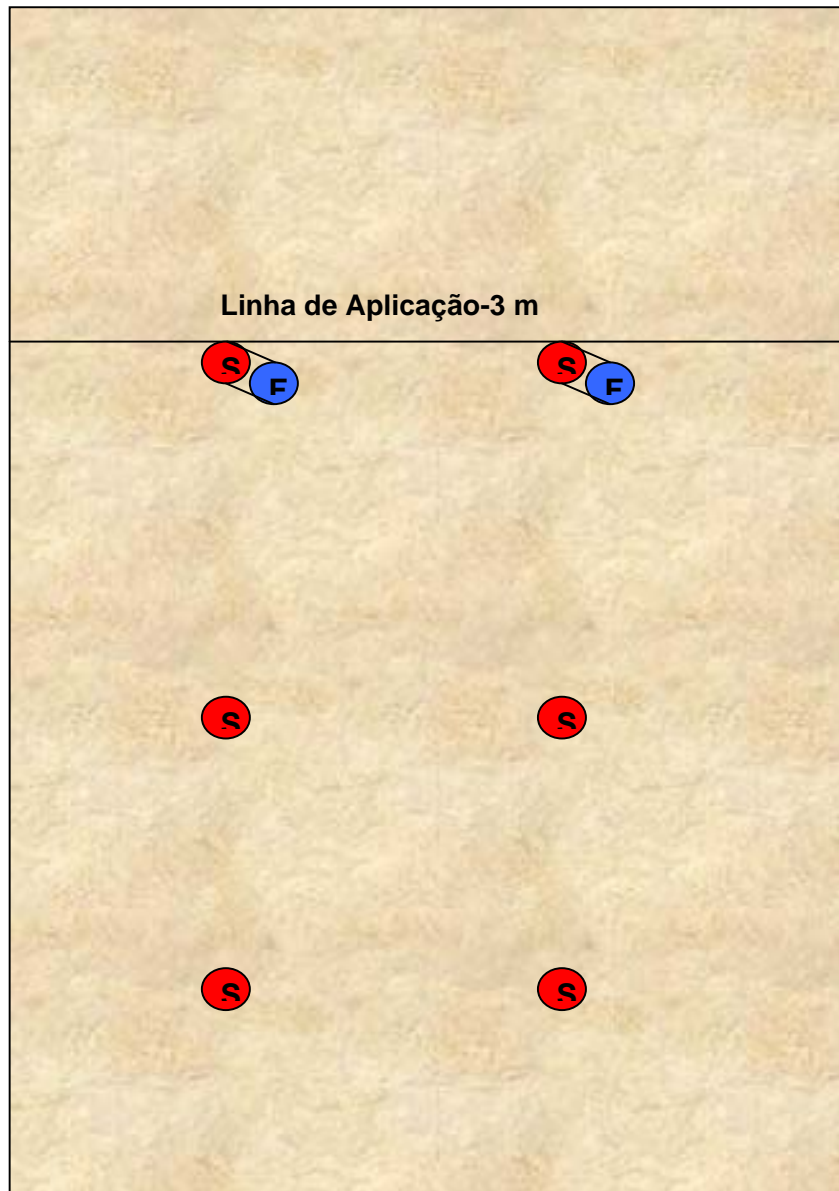
A quantidade aplicada e a forma de aplicação seguiu o pressuposto da aplicação convencional do sulfato de amônio em cultivo de cana-de-açúcar, na quantidade de 50kg/ha, aplicado linearmente em superfície, em espaçamento 0,90 m. Considerando o experimento proposto, a linha a receber adubação correspondeu a 3 metros lineares, em cada parcela, como mostra a **Figura 77**.



**Figura 77: Detalhe da linha de aplicação do sulfato de amônio na parcela experimental**

Desta forma, 74 g de sulfato de amônio enriquecido isotopicamente deveriam ser aplicados em cada parcela. Para aumentar a garantia de rastreabilidade do composto foram aplicados 76 g a cerca de 3 cm de profundidade e cobertos com solo.

Foram simuladas 3 precipitações, com 2 intensidades (30mm/h e 70 mm/h) e, após cada evento foram coletadas amostras de água e sedimento nos reservatórios, para posterior determinação isotópica. Após o último evento de precipitação, além das amostras de água e sedimento, foram também coletadas amostras de solo a partir da linha de aplicação do sulfato de amônio enriquecido. A partir da linha de aplicação a extensão da parcela foi de 9 m. As coletas foram realizadas com o auxílio de cilindros metálicos. A localização dos pontos de coleta de amostras de solo na parcela é apresentada na **Figura 78**. O mesmo esquema foi utilizado em todas as parcelas.



Legenda: S-Superfície (5 cm)

F-fundo (10 cm)

**Figura 78: Esquema da localização dos pontos de coleta das amostras de solo na parcela experimental**

A Linha de aplicação do composto, nesse caso, foi considerado como linha “zero”, no qual foram coletadas duas amostras em cada local, uma superficial (0-5 cm) e outra de fundo (5 -10 cm))

A linha 1 foi localizada a 3 m da linha “zero”, onde foram coletadas apenas amostras de superfície (0-5cm). A linha 2 foi localizada a 3 metros da linha 1 onde também foram coletadas apenas amostras de superfície (0-5cm).

Assim, foram coletadas 8 amostras de solo em cada parcela experimental.

As amostras foram preparadas previamente para a análise isotópica, conforme métodos usualmente empregados no Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA/USP:

- **Água e sedimento:** foram separadas alíquotas específicas para cada caso.

No caso das amostras de água, 1 L passou por filtração a vácuo para a eliminação de material em suspensão. De cada amostra filtrada foi extraída uma alíquota para digestão Kjeldahl.

Para a análise do sedimento, foram raspados os filtros utilizados no processo de filtração da solução água+sedimento, em que a fração sedimento ficou depositada. As amostras foram colocadas em estufa a 60 °C por 24horas, suficiente para a secagem total. As amostras foram então pulverizadas.

- **Solo:** Cada amostra de solo foi colocada em estufa a 60°C até a total secagem e então pulverizadas.

Após estes procedimentos, a abundância de  $^{15}\text{N}$  foi determinada por espectrometria de massa, no CENA/USP.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As perdas de nitrogênio do solo proveniente do fertilizante podem ser expressas em concentração levada pelas águas de enxurradas ou adsorvidas aos sedimentos erodidos. Uma parte do nitrogênio aplicado via fertilizante fica retida na matriz do solo, podendo ser utilizada pelas culturas em crescimento. O nitrogênio retido no solo não implicará em danos aos recursos hídricos próximos as regiões de plantio.

Foram quantificadas as frações do nitrogênio proveniente do fertilizante seguindo duas vias de transporte:

- a retenção pela matriz do solo;
- as perdas via enxurrada.

Considerando que a enxurrada é composta da água de escoamento superficial e dos sedimentos transportados pela mesma, duas sub vias são caracterizadas:

- as perdas de nitrogênio dissolvido em água ou aderidos aos colóides do solo, transportados com a água;
- as perdas de nitrogênio aderido às partículas de solo transportadas pela água.

Considerando que o interesse do presente estudo é avaliar o potencial do processo erosivo sobre a degradação da qualidade das águas superficiais em áreas agrícolas pelo fornecimento de nitrogênio proveniente de fertilizantes por poluição difusa, uma terceira via de perda de nutrientes não foi explorada neste estudo. Trata-se do lixiviamento, que possui potencial de poluição de águas subterrâneas.

Considerando que o nitrogênio sofre transformações químicas mediadas por microrganismos presentes no solo, assume-se que ocorram transformações do mesmo em formas diferentes e, portanto, com comportamentos distintos de interação com os fatores intervenientes no processo erosivo bem como nos processos ecológicos envolvidos na transformação dos compostos nitrogenados no meio aquático.

### **Retenção de formas nitrogenadas na matriz do solo**

Considerando a concentração natural de  $^{15}\text{N}$  no solo, de 0,368% em átomos, foi inicialmente calculado o percentual de  $^{15}\text{N}$  em excesso no fertilizante utilizado, ou seja, o sulfato de amônio. Dado o enriquecimento do composto, 5,09% em átomos de  $^{15}\text{N}$ ,



subtraiu-se deste valor da concentração natural do elemento no solo. O resultado indica o percentual de  $^{15}\text{N}$  em excesso no fertilizante utilizado.

Calculou-se posteriormente o excesso de  $^{15}\text{N}$  em cada amostra de solo coletada nas parcelas, por meio da subtração da concentração natural de  $^{15}\text{N}$  no solo do valor de  $^{15}\text{N}$  obtido em cada amostra.

Posteriormente, calculou-se o percentual de nitrogênio proveniente do fertilizante, nas amostras (%NSPF), da seguinte forma:

$$\%NSPF = \frac{{}^{15}\text{N em excesso amostra}}{{}^{15}\text{N em excesso fertilizante}}$$

Optou-se por trabalhar os resultados em faixas de distribuição, desta forma foi utilizado o valor médio do %NSPF obtidos na linha “zero”, superficialmente e, posteriormente o mesmo procedimento foi adotado nas linhas 1 e 2.

Foi então calculada a massa de solo representada pela linha “zero”, considerando a largura da faixa de 300 cm, a profundidade de coleta de 5 cm e o comprimento, dado pelo diâmetro do cilindro volumétrico utilizado na coleta, de 5 cm. Obtido o volume de solo na faixa, multiplicou-se pelo valor de densidade do solo na parcela considerada, resultando na massa de solo na faixa, dada em gramas (g).

A partir da média de Nitrogênio Total no solo, nas amostras coletadas em cada faixa foi possível calcular a quantidade de Nitrogênio Total na faixa inteira.

Assim, a quantidade de nitrogênio no solo proveniente do fertilizante (QNSPF), é facilmente determinada, pois o %NSPF já foi determinado. Assim, calcula-se diretamente quanto, da concentração total de nitrogênio em gramas, corresponde ao valor de %NSPF.

O mesmo procedimento foi utilizado para a determinação do %NSPF na profundidade 5-1 cm, fornecendo indicativo do potencial de lixiviação do composto em profundidade.

A **Tabela 14** apresenta os valores de Nitrogênio Total (NT), Percentual de Nitrogênio no Solo Proveniente do Fertilizante (%NSPF) e Quantidade de Nitrogênio

no Solo Proveniente do Fertilizante (QNSPF), por faixa de amostragem em cada parcela experimental.

**Tabela 14: Valores Nitrogênio Total (NT), Percentual de Nitrogênio no Solo Proveniente do Fertilizante (%NSPF) e Quantidade de Nitrogênio no Solo Proveniente do Fertilizante (QNSPF), por faixa de amostragem em cada parcela experimental.**

<b>Parcelas</b>	<b>Faixas</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>NT (g)</b>	<b>%NSPF</b>	<b>QNSPF (g)</b>
<b>1</b>	Zero	Linha Zero	15,443	16,630	2,568
	1	3	14,191	2,213	0,314
	2	6	14,191	1,291	0,183
<b>2</b>	Zero	Linha Zero	16,740	15,161	2,538
	1	3	14,357	1,107	0,159
	2	6	13,718	0,619	0,085
<b>3</b>	Zero	Linha Zero	14,625	12,384	1,621
	1	3	13,106	0,122	0,016
	2	6	13,669	0,253	0,035
<b>4</b>	Zero	Linha Zero	15,984	14,179	2,266
	1	3	12,555	0,330	0,041
	2	6	13,776	0,141	0,019
<b>5</b>	Zero	Linha Zero	12,769	1,943	0,248
	1	3	13,050	0,109	0,014
	2	6	16,144	0,432	0,070
<b>6</b>	Zero	Linha Zero	9,844	0,260	0,026
	1	3	12,769	0,365	0,047
	2	6	13,106	0,085	0,011

A **Tabela 15** apresenta as massas de solo das faixas em cada parcela.

**Tabela 15: Massas de solo das faixas nas parcelas experimentais**

Parcela	Massa (g)
1	11.925
2	11.625
3	11.250
4	11.625
5	11.250
6	11.250

As **Figuras 79 a 84** apresentam a distribuição de nitrogênio no solo proveniente do fertilizante (%NSPF) aplicado sob forma de sulfato de amônio.

Neste caso a linha de aplicação do composto correspondeu ao eixo x. Deve-se considerar que as amostras foram coletadas nos comprimentos 0, 3 e 6 metros da linha de aplicação.

Os resultados apresentados mostram a retenção de nitrogênio proveniente do fertilizante na matriz do solo, ou seja, a quantidade de nitrogênio que se deslocou ao longo do perfil. Ressalta-se que estas quantidades de nitrogênio deslocado não representam riscos potenciais aos ecossistemas sensíveis ao mesmo, ou seja, os corpos hídricos de entorno. Quando o solo tem a propriedade de fixar essas concentrações em sua matriz, pode-se afirmar que estas não estarão disponíveis ao transporte pela enxurrada.

Ao aplicar a análise de variância MANOVA para verificar se houve diferenças significativas entre os valores de %NSPF nas parcelas pode-se constatar que elas comportaram-se de forma semelhante ( $p= 0,448$ ). Poderia dizer que, aparentemente, o tipo de preparo do solo não influenciou na quantidade de nitrogênio retida na matriz do solo.

Quanto à distribuição de concentrações dentro das parcelas, o resultado do teste MANOVA demonstrou diferenças significativas entre as faixas analisadas ( $p=0,002^*$ ), ou seja, considerando os resultados conjuntos de cada faixa em todas as

parcelas, pode-se verificar que a faixa zero é diferente da faixa 1 e diferente da faixa 2. No entanto as faixas 1 e 2 são semelhantes.

Isso demonstra, de forma geral, que a partir da linha inicial de aplicação do fertilizante ocorre transporte significativo no sentido da declividade do solo, nos primeiros 3 metros da parcela. A partir dos 3 metros essa distribuição se dá de forma mais homogênea. Porém, percebe-se que o deslocamento no sentido da declividade é lento e pouco expressivo.

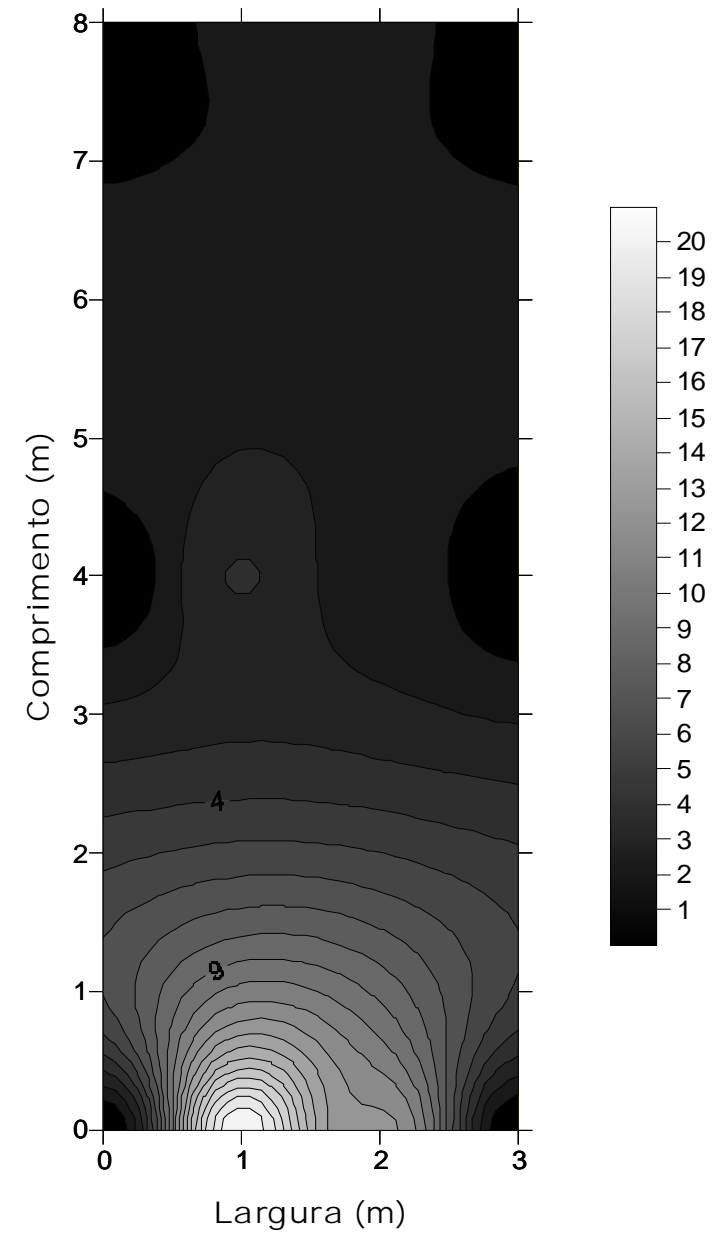
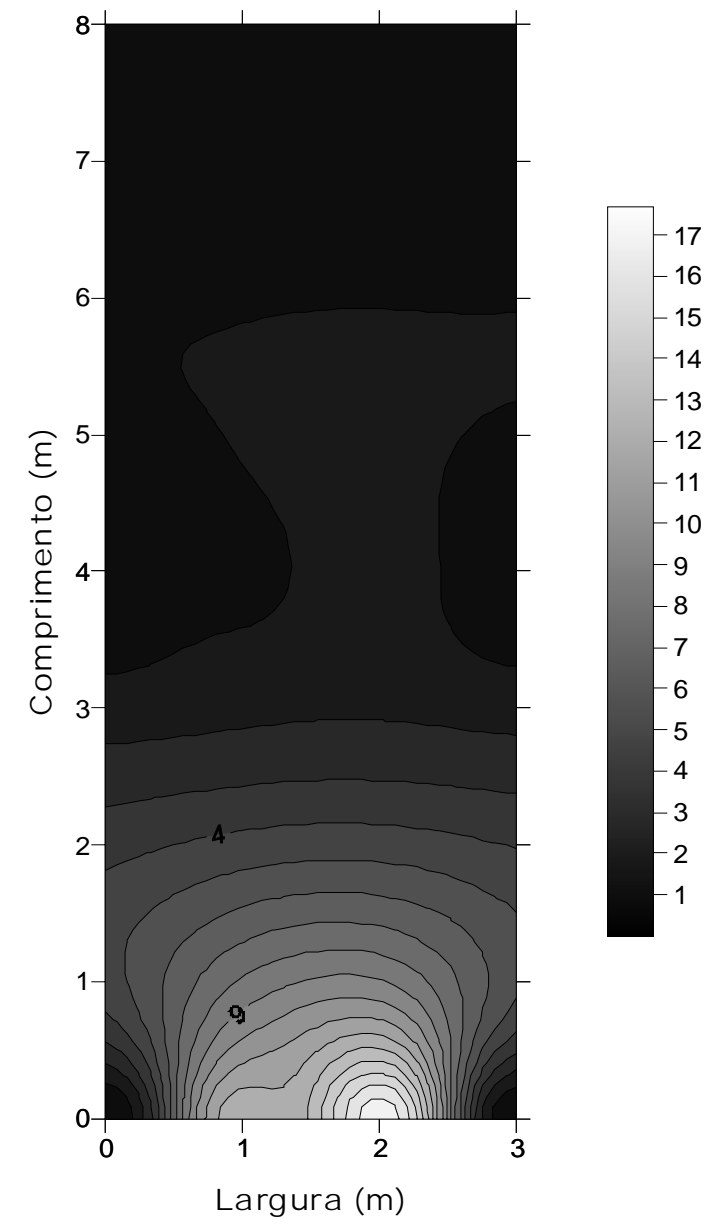
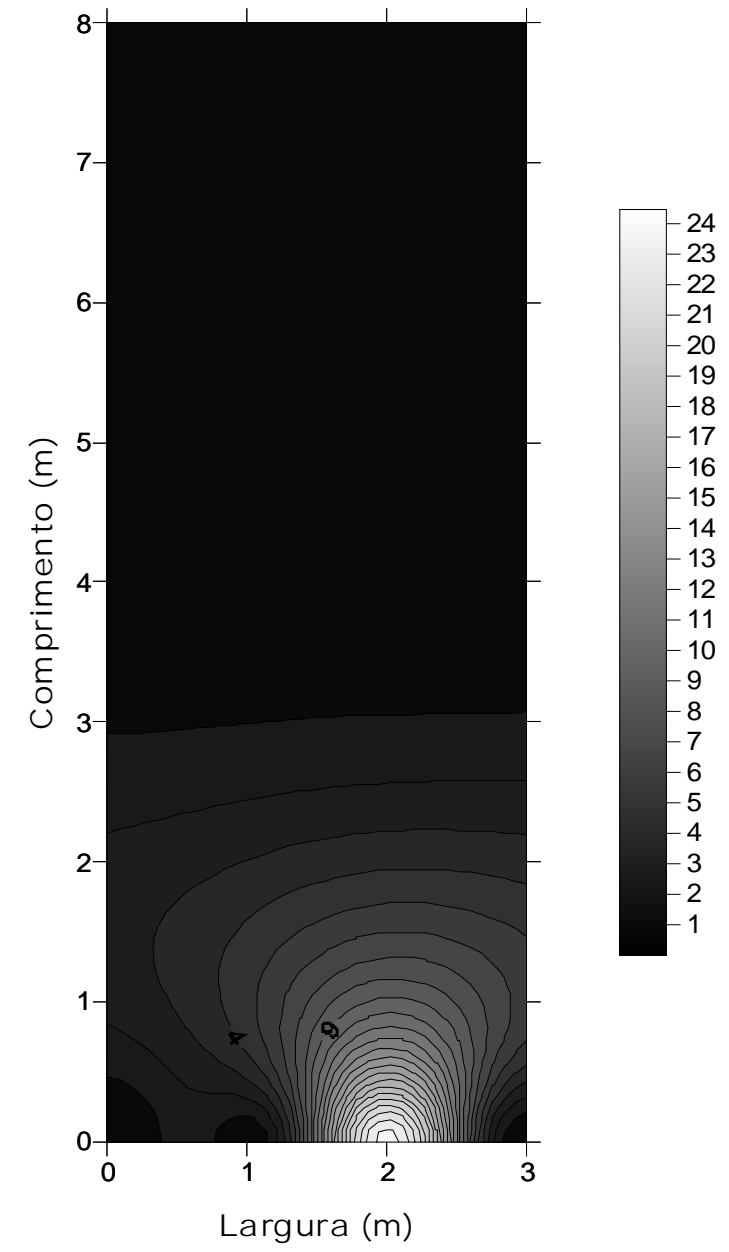


Figura 79: Distribuição do %NSPF na Parcela 1

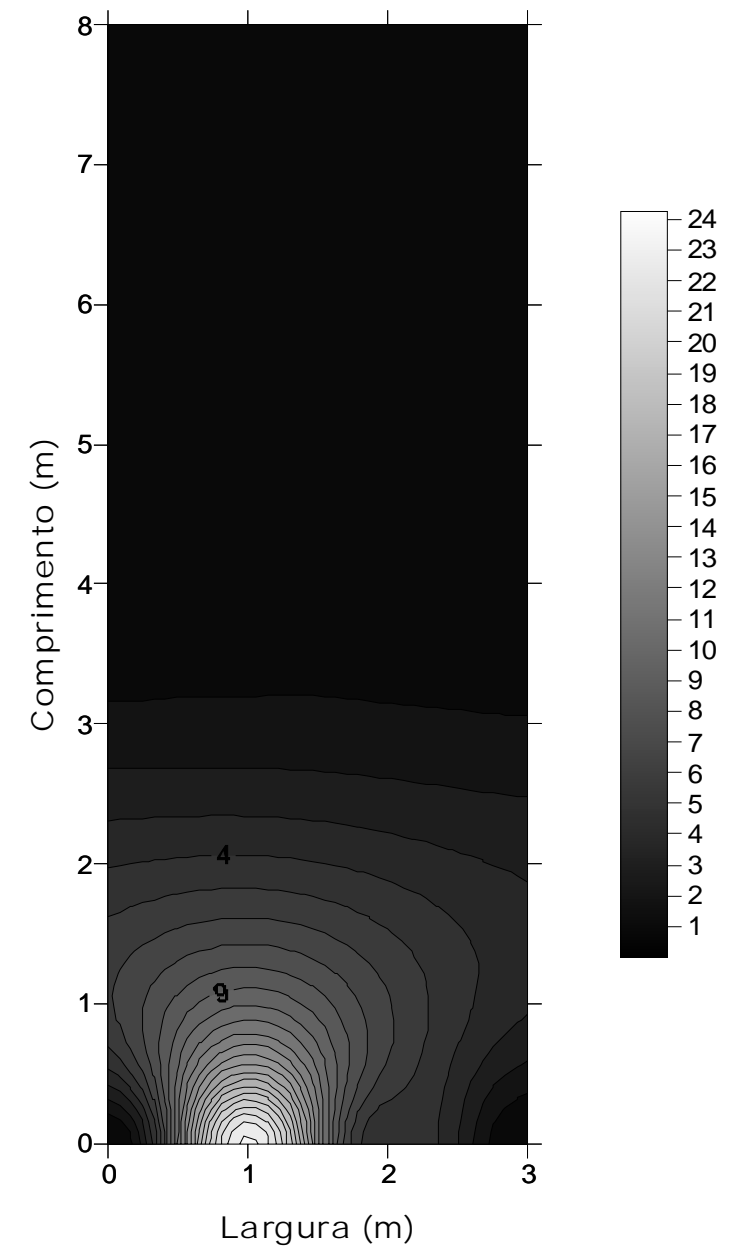
Figura 80: Distribuição do %NS





**Figura 81: Distribuição do %NSPF na Parcela 3**

**Figura 82: Distribuição do %NSPF**





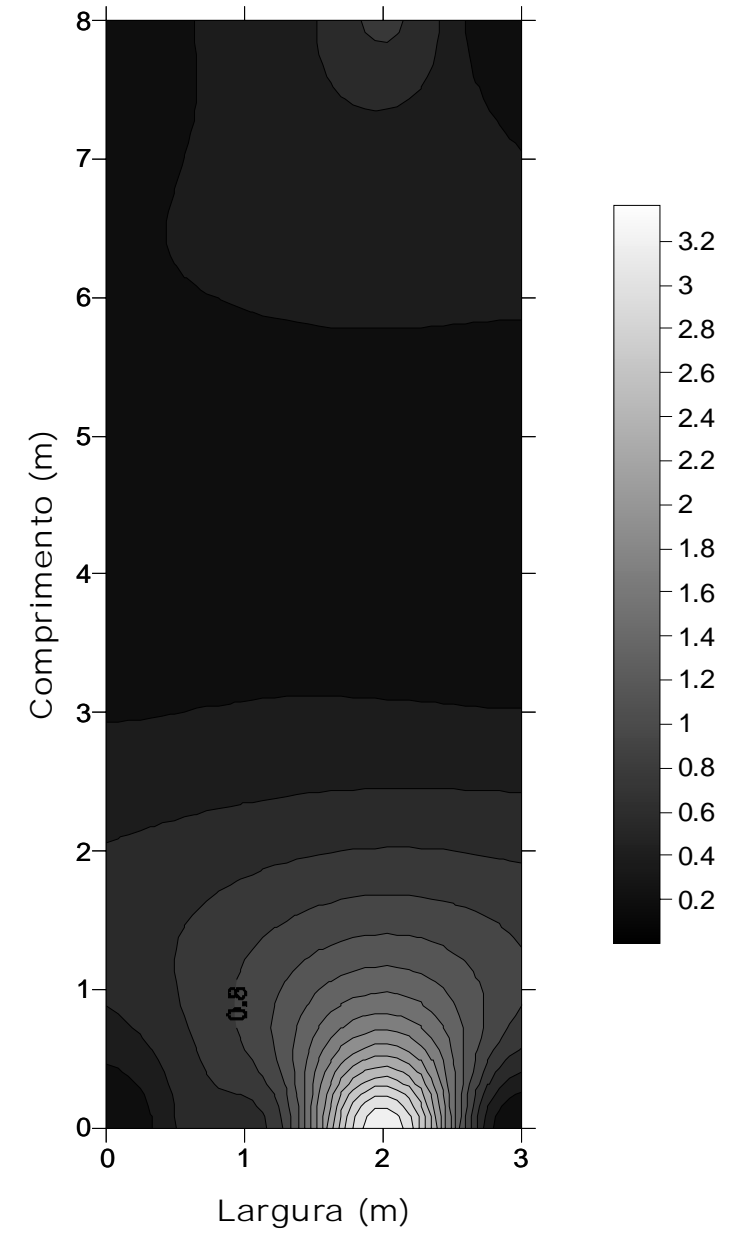
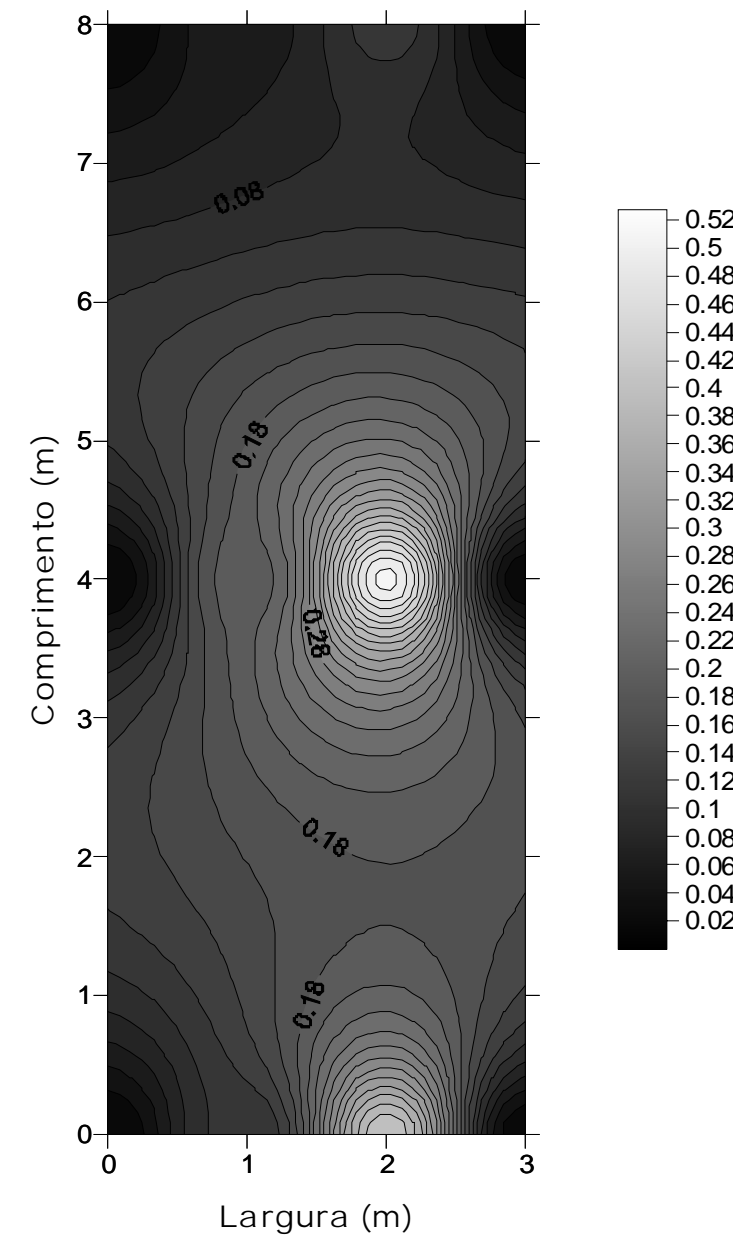


Figura 83: Distribuição do %NSPF na Parcela 5

Figura 84: Distribuição do %NSPF



Se analisadas as faixas amostradas individualmente, ou seja, um grupo com as faixas zero de todas as parcelas, outro com as faixas 1 de todas as parcelas e um último com as faixas 2 de todas as parcelas, com relação ao %NSPF pode-se observar a formação de grupos de similaridade entre as parcelas.

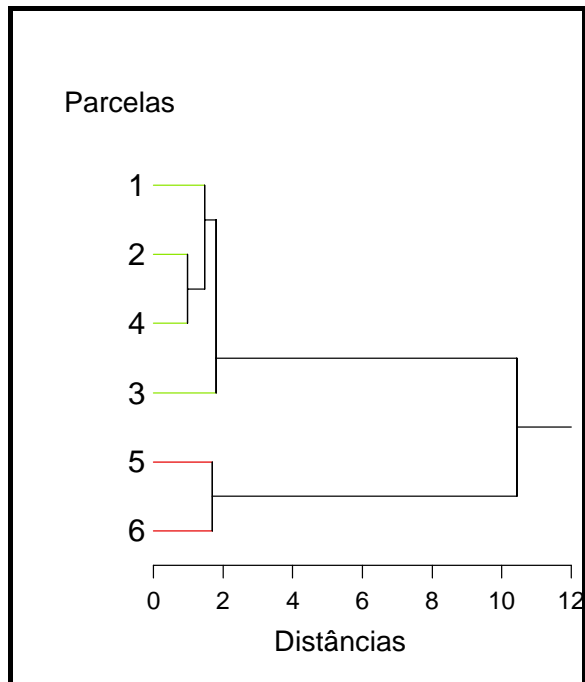
As **Figuras 85, 86 e 87** apresentam o agrupamento das parcelas quanto ao %NSPF nas faixas zero, 1 e 2, respectivamente.

Quanto ao agrupamento das faixas zero das parcelas, ao corte de 2 na distância euclidiana média, dá-se a formação de 2 grupos: um formado pelas parcelas 5 e 6 e outro pelas parcelas 1, 2, 3 e 4.

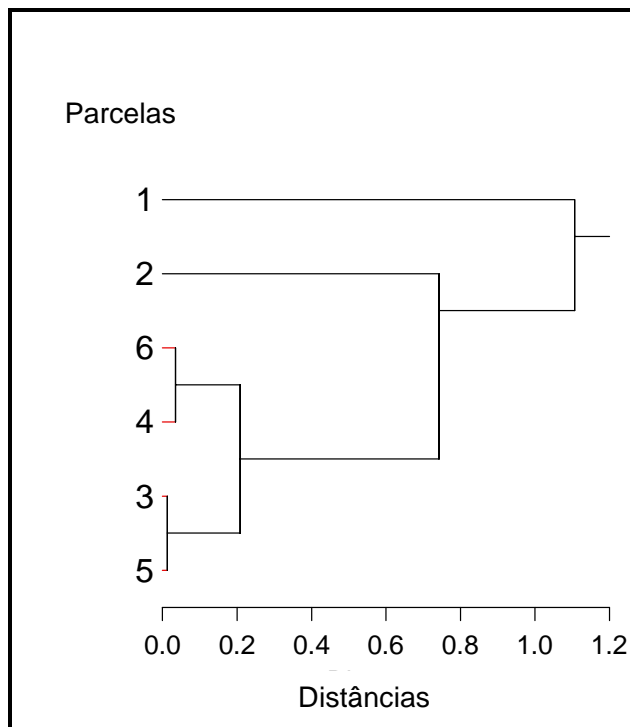
Nos grupos formados para a faixa 1, ao corte de 0,2, dá-se a formação de 4 agrupamentos: o primeiro formado pela parcela 1, o segundo pela parcela 2, o terceiro pelas parcelas 4 e 6 e o quarto pelas parcelas 3 e 5.

Nos grupos formados para a faixa 2, ao corte de 0,1, percebe-se a formação de um agrupamento de semelhança, entre as parcelas 4 e 6. Os demais grupos permanecem isolados uns dos outros.

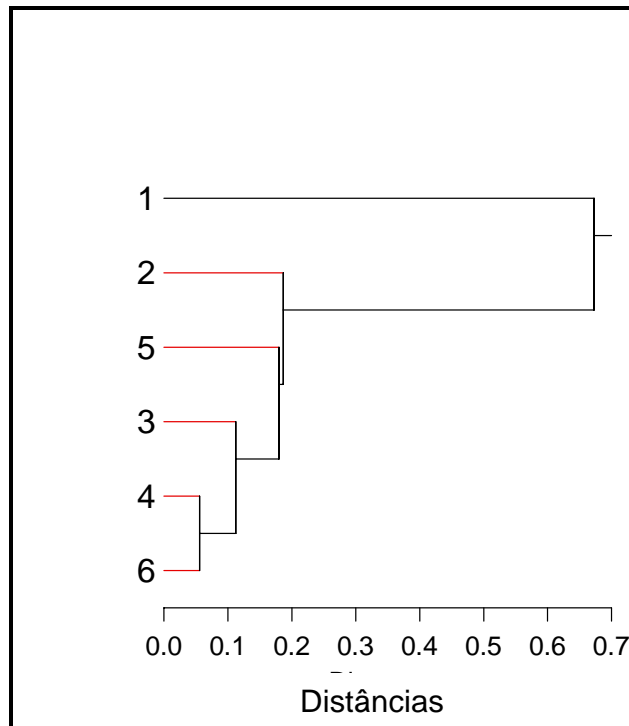
Com exceção das parcelas 1 e 2, percebe-se uma tendência ao agrupamento entre tipos de preparo do solo. Certamente outras variáveis integram essa análise, mas a variância encontrada parece ser explicada em parte, pelo tipo de preparo utilizado.



**Figura 85: Agrupamento das faixas “zero” de todas as parcelas experimentais**



**Figura 86: Agrupamento das faixas “1” de todas as parcelas experimentais**



**Figura 87: Agrupamento das faixas “2” de todas as parcelas experimentais**

Esta análise permite verificar algumas peculiaridades quanto ao deslocamento espacial das concentrações dentro das parcelas.

Na faixa zero, houve alta retenção de nitrogênio na matriz do solo, com exceção das parcelas 5 e 6.

Nas demais faixas pode-se verificar que houve formação de grupos de similaridade entre as parcelas com o mesmo método de preparo, no caso os grupos formados pelas parcelas 4 e 6, nas faixas 1 e 2 (solo arado) e, parcelas 3 e 5 na faixa 1 (solo raspado).

Assim, pode-se verificar que, tratando-se da média geral de nitrogênio retido na matriz do solo de cada parcela a variável tipo de preparo não influenciou os resultados, porém, se analisado o deslocamento espacial das concentrações percebe-se que o tipo de preparo condicionou condições diferentes dentro das parcelas. As parcelas com solo arado demonstraram uma sutil, porém maior heterogeneidade na distribuição das concentrações de nitrogênio espacialmente.

Técnicas que favoreçam a infiltração de água no solo, como é o caso do solo arado, condicionam melhores condições de retenção de nitrogênio pela matriz do solo.

### **Perdas de Nitrogênio Via Superfície**

- ***Perdas de nitrogênio pela água da enxurrada***

Os resultados de percentual de nitrogênio na água proveniente do fertilizante não serão utilizados neste estudo, já que, suspeita-se que os resultados tenham sido superestimados.

A baixa pressão de gás (N<sub>2</sub>) produzida no aparelho a partir de formas orgânicas e minerais existentes na água (nitrato + nitrito + amônio) revelou baixa concentração do elemento.

Assim, considerou-se que a água de escoamento superficial não apresentou potencial de transporte do elemento em si, funcionando como fator secundário na análise da transferência de nitrogênio de áreas agrícolas para rios e lagos.

- ***Perdas de nitrogênio pelos sedimentos transportado na enxurrada***

O cálculo para a determinação do percentual de Nitrogênio no Sedimento Proveniente do Fertilizante (%NSedPF) foi realizado da mesma forma que nas amostras de solo. Porém, foram utilizados os valores totais de sedimento erodido, depositados nas caixas coletoras ao final de cada evento de chuva simulada e, a abundância natural do elemento foi assumida como sendo 0,366%.

A **Tabela 16** apresenta os valores de Nitrogênio Total (NT), Percentual de Nitrogênio no Sedimento Proveniente do Fertilizante (%NSedPF) e Quantidade de Nitrogênio no Sedimento Proveniente do Fertilizante (QNSedPF), obtidos a partir da análise dos sedimentos erodidos pela água e depositados nas caixas coletoras, após cada evento de precipitação simulada.

**Tabela 16: Valores de Nitrogênio Total (NT), Percentual de Nitrogênio no Sedimento Proveniente do Fertilizante (%NSedPF) e Quantidade de Nitrogênio no Sedimento Proveniente do Fertilizante (QNSedPF),**

<b>Parcelas</b>	<b>Simulações</b>	<b>NT</b>	<b>%NSPF</b>	<b>QNSPF (g)</b>
1	1º dia	0,024	1,800	0,00043
	2º dia	0,036	2,950	0,00106
	3º dia	0,211	0,161	0,00034
2	1º dia	0,016	3,881	0,00062
	2º dia	0,027	3,429	0,00091
	3º dia	0,022	0,240	0,00005
3	1º dia	0,017	1,791	0,00030
	2º dia	0,029	0,759	0,00022
	3º dia	0,133	0,230	0,00030
4	1º dia	0,002	4,267	0,00010
	2º dia	0,004	2,677	0,00010
	3º dia	0,027	0,077	0,00002
5	1º dia	0,005	3,375	0,00018
	2º dia	0,001	1,870	0,00002
	3º dia	0,058	0,262	0,00015
6	1º dia	0,007	12,831	0,00089
	2º dia	0,023	0,307	0,00007
	3º dia	0,110	0,407	0,00045

A **Tabela 17** apresenta as massas de sedimentos coletados após cada evento de simulação de chuva nas parcelas.

**Tabela 17: Massa de sedimento erodido em cada parcela experimental**

<b>Parcelas</b>	<b>Simulações</b>	<b>Massa de sedimentos (g)</b>
1	1º dia	10,275
	2º dia	11,700
	3º dia	79,800
2	1º dia	6,900
	2º dia	7,360
	3º dia	5,940
3	1º dia	7,200
	2º dia	9,600
	3º dia	38,00
4	1º dia	0,780
	2º dia	1,350
	3º dia	13,770
5	1º dia	1,500
	2º dia	2,400
	3º dia	15,600
6	1º dia	1,280
	2º dia	6,900
	3º dia	28,050

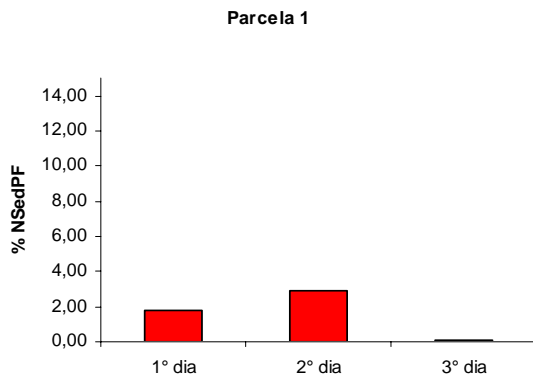
Através da MANOVA foi possível constatar que há diferenças significativas entre os valores de %NSedPF entre as simulações de chuva. Verifica-se que os valores transportados junto aos sedimentos sofrem decréscimo gradual ao longo das simulações de chuva. Considerando que a última chuva aplicada foi de intensidade superior as demais, pode-se afirmar que esta variável não influenciou no transporte do fertilizante.



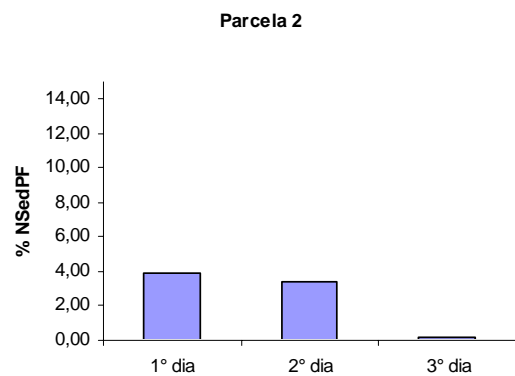
As **Figuras 88 a 93** apresentam de forma gráfica o diferencial nos valores de %NSedPF após cada evento de simulação de chuva em todas as parcelas.

Se analisados os valores de produção de sedimento, pode-se conferir que as primeiras chuvas transportaram menores quantidades de partículas de solo, sendo que este processo sofreu influência da intensidade da precipitação aplicada. Desta forma, mesmo com baixa produção de sedimentos nas primeiras chuvas, pode-se verificar significativo transporte de nitrogênio proveniente do fertilizante.

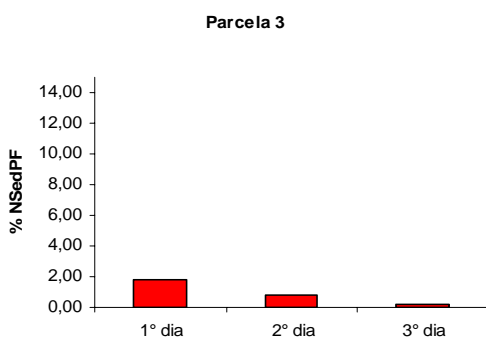
Se analisadas apenas as concentrações obtidas após a primeira simulação, pode-se constatar um diferencial entre as parcelas de solo raspado e arado, com maiores concentrações neste último tipo de preparo.



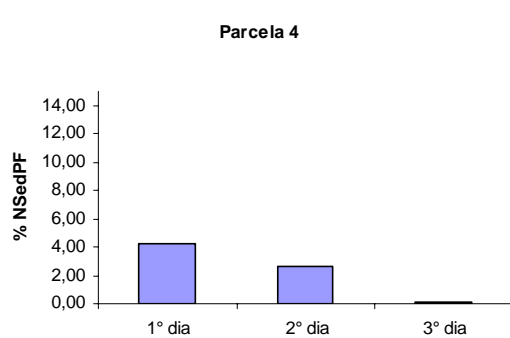
**Figura 88: %NSedPF na Parcela 1**



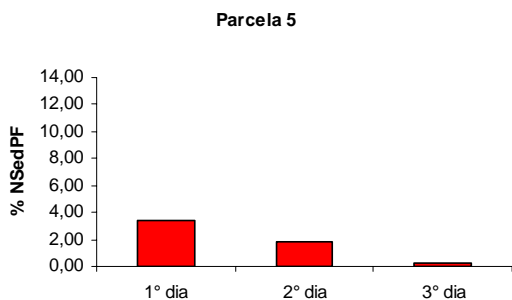
**Figura 89: %NSedPF na Parcela 2**



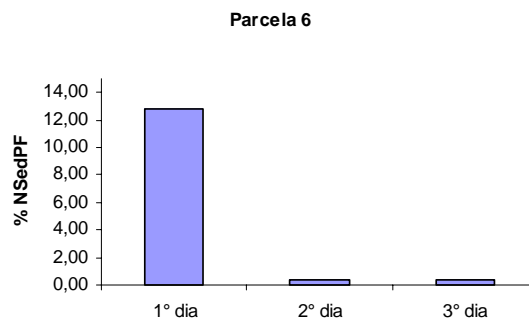
**Figura 90: %NSedPF na Parcela 3**



**Figura 91: %NSedPF na Parcela 4**



**Figura 92: %NSedPF na Parcela 5**



**Figura 93: %NSedPF na Parcela 6**

### **Identificação das Principais Vias de Transporte e a Influência dos Fatores Intervenientes no Processo Erosivo**

Considerando o interesse deste estudo em verificar as principais vias de perda de nitrogênio do fertilizante condicionadas pelos processos erosivos atuantes e sua influência nas águas superficiais de áreas agrícolas, foi possível identificar que as maiores perdas se dão através dos sedimentos erodidos nas parcelas.

A água da enxurrada não representou via significativa de perda neste estudo. BERTOL *et al.*, (2005) identificaram 4,8% de nitrogênio proveniente do fertilizante na água em um Latossolo Vermelho Eutroférico, em sistema de semeadura direta, porém os dados representaram estimativas, já que utilizou um fertilizante comum. FAVORETTO (2002) encontrou valores menores do que 3 % de perda de fertilizante pela água da enxurrada.

A enxurrada atua como transportadora de formas nitrogenadas de duas formas: na forma solúvel (nitrato-  $\text{NO}_3^-$  e amônio  $\text{NH}_4^+$ ) e na forma particulada (nitrito  $\text{NO}_2^-$  e nitrato  $\text{NO}_3^-$ ).

Porém, o solo utilizado no estudo em questão foi o Latossolo Vermelho Amarelo. Trata-se de solo altamente intemperizado e com argilas de baixa atividade por apresentar Complexo de Trocas Catiônicas (CTC) abaixo de 27 cmol/kg de solo. No caso do solo em estudo a CTC encontra-se entre 8,5 e 9 cmol/kg de solo no

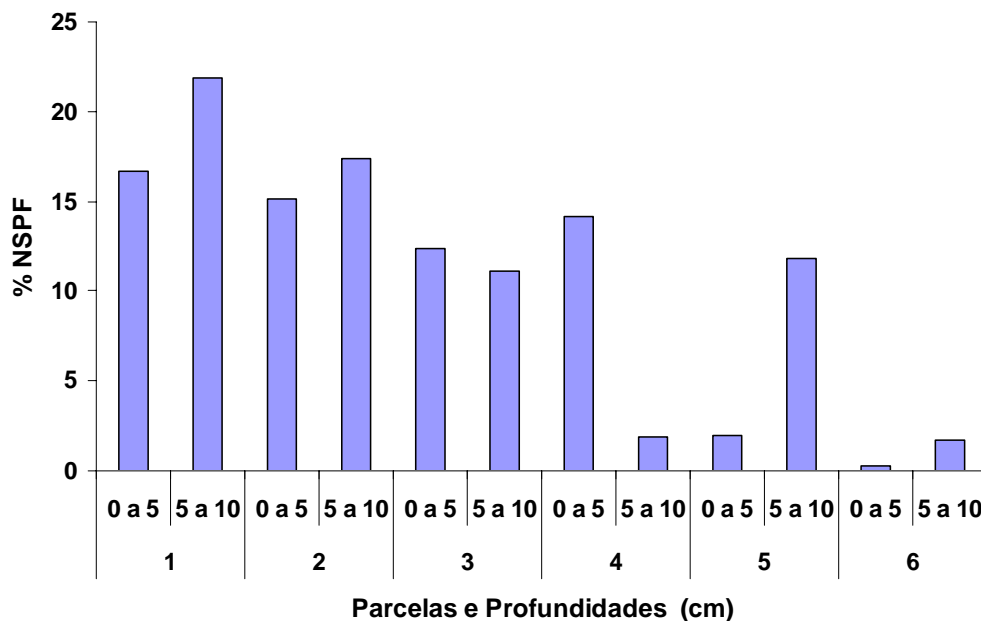
horizonte A. A forma solúvel que poderia ser encontrada na água da enxurrada é o amônio. Porém, em solos com tais características, a matriz do solo constitui um componente ideal à fixação de amônio, pois o material coloidal deste solo, por se tratar de solo intemperizado de regiões tropicais, é em grande maioria formado por argilas óxido hidratadas de ferro e alumínio. Além destes colóides minerais, existem os colóides orgânicos, representados pelo húmus. O amônio é um cátion ( $\text{NH}_4^+$ ), que pode ser incorporado ao sistema através da aplicação de fertilizantes. Neste caso, os colóides do solo podem funcionar como uma micela central de carga negativa ao redor da qual haverá a atração de um enxame de cátions.

Visto essas considerações pode-se aferir que o amônio que poderia ser dissolvido em água e transportado para fora do sistema tenha apresentado maior interação com a matriz do solo, ficando nesta retido. Mesmo que o solo utilizado possua baixa CTC e pH ácido (4,7%), o que resulta em baixa capacidade de adsorção de cátions (argilas de baixa atividade), as concentrações de amônio fornecidas via fertilizante possivelmente não excederam a capacidade de retenção catiônica deste solo.

O nitrato, sendo uma das formas solúveis de nitrogênio tem maior mobilidade no solo. De acordo com SHARPLEY *et al.*, (1993), o nitrato possui fraca retenção pelas partículas ativas do solo. Considerando as características do solo utilizado, percebe-se que a retenção pela matriz do solo não é favorável neste caso

Os valores encontrados, apesar de ter-se trabalhado apenas com 10 cm de solo em uma única faixa, indicam altas perdas (**Figura 94**). Porém, não representam potencial de contaminação de águas superficiais através dos processos erosivos analisados neste estudo. O nitrito também pode ser lixiviado, porém em solos ácidos a conversão de nitrito a nitrato é favorável, pois a oxidação do nitrito a nitrato é rápida, motivo pelo qual, normalmente o nitrito ocorre nos solos em quantidades traço (HASSETT E BANWART,1992).

Solos ácidos fornecem condições ideais para a alta atividade de microorganismos específicos (*Pseudomonas*, *Clostridium*), que contribuem na rápida conversão de nitrito a nitrato, como é o caso do solo analisado neste estudo.



**Figura 94: %NSPF nas diferentes profundidades na faixa “zero”.**

A observação dos altos percentuais de nitrogênio proveniente do fertilizante que ficaram aderidos a matriz do solo respalda essas considerações.

A principal via de perda de nitrogênio do fertilizante foi representada, neste estudo, pelos sedimentos produzidos pela erosão. Os maiores valores de %NSedPF foram obtidos nas parcelas com solo arado, com valores médios entre 2,34 e 4,51.

Porém, a forma como o processo erosivo atua sobre este transporte deve ser entendida, já que os resultados indicaram não se tratar de uma relação puramente quantitativa, ou seja, quanto maior a taxa de erosão maior a perda de nitrogênio.

Ficou evidente que as primeiras chuvas apresentaram as maiores perdas de nitrogênio, porém não foram as que condicionaram as maiores perdas de água e sedimento. Esses resultados corroboram com os obtidos por CASSO *et al.*, (2002) e BERTOL *et al.*, (2005). Sabe-se que as partículas ativas do solo são representadas pela fração argila, que possui alta capacidade de adsorção de elementos em sua superfície. No entanto, as frações mais finas do solo são, em geral, transportadas facilmente pelo escoamento superficial (enxurrada). Assim, a intensidade da chuva

não influencia diretamente na proporção de nitrogênio transportado, já que as partículas mais finas são levadas na sua grande maioria pelas primeiras chuvas que produzam alguma enxurrada. Todavia, as taxas de erosão são condicionadas pela intensidade das chuvas, porém quanto maior a intensidade maior a capacidade de desagregação e transporte de frações de maior granulometria, como os siltes e as areias, que são partículas de peso maior, refletindo nos valores finais das taxas de erosão.

Visto as possibilidades de retenção da maior parte do amônio pela matriz do solo, considera-se que a maior parte das formas de nitrogênio particulado que poderiam ser encontrados nos sedimentos erodidos sejam nitrito e nitrato, este último certamente em maiores concentrações.

Assim, a carga de sedimentos transportada, principalmente nas primeiras chuvas, pode conter concentrações elevadas o suficiente para influenciar na qualidade da água dos rios situados a jusante do local de descarga da enxurrada.

Em relação ao tipo de preparo do solo, este não influenciou na capacidade de retenção de nitrogênio proveniente do fertilizante pela matriz do solo, no entanto a distribuição das concentrações dentro das parcelas foi mais homogênea nas parcelas contendo solo arado. Acredita-se que este tipo de preparo, em comparação ao solo sem preparo nenhum (raspado), favoreça a movimentação do soluto juntamente com a água, melhorando as condições de distribuição de nutrientes para a cultura. Quanto à perda de nutrientes pelos sedimentos erodidos nos dois tipos de preparo, verifica-se que as maiores perdas ocorrem nas parcelas contendo solo arado em início de precipitação.

Apesar de não apresentar as maiores taxas de erosão e escoamento superficial, acredita-se que este tipo de preparo condicione maior disponibilidade de frações finas facilmente transportáveis pela enxurrada inicial, já que a taxa de erosão é traduzida pela junção de todas as frações do solo erodidas na parcelas e, a água do escoamento não representa via significativa de transporte. Contudo, o valor acumulado ao final das 3 chuvas simuladas confere ao solo raspado maior capacidade de transporte.

O solo arado pode atuar neste caso como uma fonte contínua de fornecimento de cargas nitrogenadas ao processo erosivo, pois devido a maior compactação da superfície as partículas finas vão sofrendo lavagem gradual.

Observando os resultados da rugosidade superficial, apresentados no Capítulo 3, pode-se aferir que rugosidades mais elevadas, como é o caso das parcelas de solo arado, não funcionam como barreira ao transporte de nitrogênio proveniente do fertilizante. A rugosidade, possivelmente atue na minimização das perdas de solo funcionando como barreira física aos sedimentos de granulometrias maiores. As frações mais finas permanecem em suspensão na enxurrada e alcançam distâncias maiores, inclusive rios e lagos. Apesar da rugosidade do solo atuar como barreira física também para a enxurrada, aumentando sua capacidade de infiltração e diminuindo sua velocidade, os sedimentos finos que levam adsorvidos em si nitrogênio proveniente do fertilizante, mesmo que transportados mais lentamente, acabarão por sair do sistema, pois trata-se de nitrato particulado que não possui afinidade para serem retidos pela matriz do solo. Assim, a rugosidade superficial do solo neste estudo, não apresenta influência significativa na redução das perdas de nutrientes por erosão.

As perdas por volatilização da amônia não foram tratadas neste estudo por não apresentar relação com o processo de poluição de águas superficiais pelos processos erosivos bem como em razão do tipo de fertilizante utilizado.

Porém, admite-se perdas por volatilização do nitrato via desnitrificação, viabilizada pelas condições de menor aeração do solo em profundidade e, portanto convertido a nitrogênio molecular ( $N_2$ ).

### **Implicações das Perdas de Nitrogênio Via Sedimentos na Agricultura e no Meio Ambiente**

Identificada a principal via de perda de nutrientes neste estudo, no âmbito de potencial poluidor de águas superficiais em áreas agrícolas, estes dados serão discutidos com base em suas implicações agrícolas e ecológicas.

Em ambientes aquáticos ocorrem, naturalmente diversas formas nitrogenadas (nitrato- $\text{NO}_3^-$ , nitrito- $\text{NO}_2^-$ , amônia  $\text{NH}_3$ , íon amônio  $\text{NH}_4^+$ , óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$ , nitrogênio molecular  $\text{N}_2$ , nitrogênio orgânico dissolvido e nitrogênio orgânico particulado) (ESTEVES, 1988).

Em áreas agrícolas estes ambientes recebem contribuição do escoamento superficial que pode adicionar ao sistema quantidades significativas de diversas formas nitrogenadas, proveniente de fertilizantes orgânicos, inorgânicos e resíduos culturais.

Estas formas nitrogenadas apresentam comportamentos distintos em meio aquático, e podem alterar o equilíbrio do ciclo do elemento no sistema e levar a degradação da qualidade da água para diversos fins.

No estudo em questão, o nitrato é a forma nitrogenada associada às partículas erodidas de solo mais finas, que poderão atingir os corpos d'água.

Com base na carga acumulada de nitrato adsorvido junto aos sedimentos nas 6 parcelas experimentais, representada pela soma das cargas após as 3 chuvas simuladas (19 mm) foi possível utilizar um modelo de previsão dos impactos destas cargas em solos com preparo (arado) e sem preparo (raspado), em uma situação de aplicação de sulfato de amônio na dosagem de 50 kg/ha em um Latossolo Vermelho Amarelo textura moderada em superfície, antes do desenvolvimento da cultura (pré-semeadura ou semeadura). Considerando uma área de 1 ha com as condições supracitadas é possível prever os potenciais impactos da carga de nitrato carregado pelo solo como fonte não-pontual de poluição ao rio nestas condições. Para simular tal efeito, foi selecionado um trecho de rio que apresentasse em sua margem uma área extensa com o tipo de solo em questão (LVA) e que apresentasse série histórica disponível. Assim, não foi possível simular este efeito no ribeirão Canchim, pois não dispõe de registro histórico hidrológico.

A área escolhida foi um trecho da bacia do rio Atibaia a montante do reservatório de Salto Grande, compreendida entre os municípios de Paulínia e Americana, pois além de apresentar o mesmo tipo de solo ainda dispões de série histórica dos dados hidrológicos.

Os dados hidrológicos considerados são dados médios referentes ao trimestre janeiro-fevereiro-março de toda a série histórica, por se tratar do período mais chuvoso da bacia e possuir semelhança de vazões médias mensais. Estes dados são disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) e são listados na **Tabela 18**.

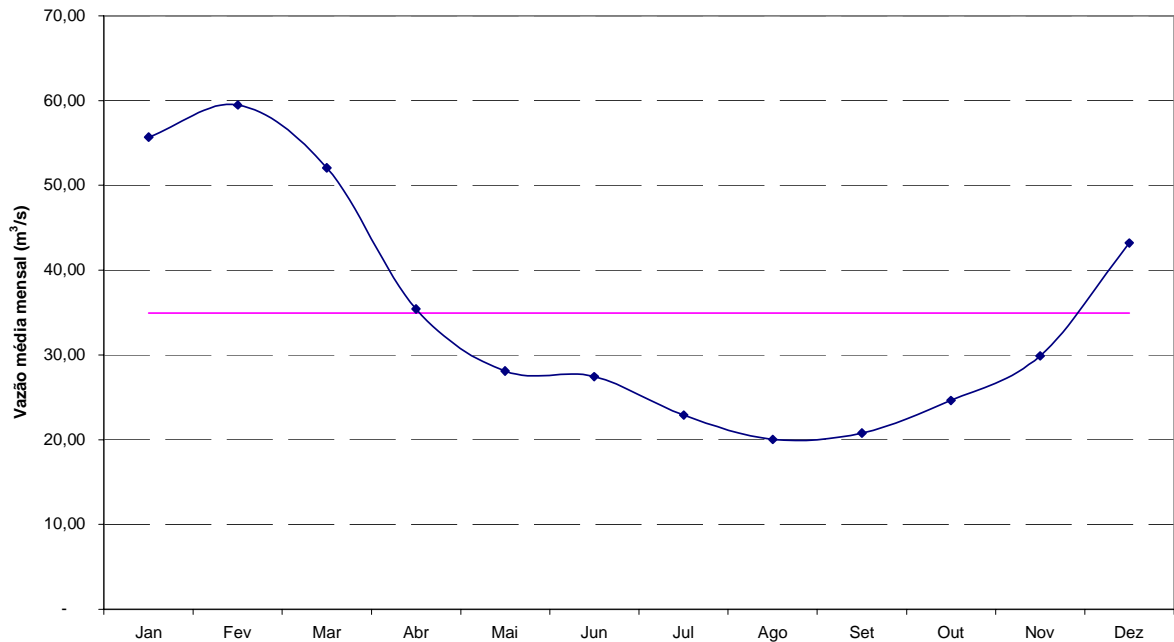
**Tabela 18 : Dados hidrológicos do rio Atibaia**

<b>Índice</b>	<b>Valor</b>
Velocidade média do rio (U)	0,571 m/s
Concentração de nitrato inicial do rio ( $C_0$ )	0,6 g/m <sup>3</sup>
Constante de reação (k)	0,1 d <sup>-1</sup> (BOWIE et al., 1985)

A velocidade média refere-se à estação fluviométrica acima de Paulínia (Código ANA 62690000), cujo período de dados vai de novembro de 1947 a maio de 2000. Na **Figura 95** é ilustrado o gráfico de vazão média mensal de longo termo para os dados relativos a essa estação.



Posto 62690000 - Acima de Paulínea



**Figura 95: Vazão média mensal (m<sup>3</sup>/s) do posto acima de Paulínea (62690000)**

Assumindo mistura completa nas direções vertical e horizontal do rio, suposição referente à maioria dos modelos de qualidade da água (ROMEIRO, 2003), o balanço de massa que descreve a variação da concentração ( $c$ , em g/m<sup>3</sup>) de uma determinada substância no espaço ( $x$ , em m), no estado estacionário, é dado de acordo com a equação (CHAPRA, 1987):

$$0 = -U \frac{dc}{dx} - kc + S_d \quad \text{Eq.6}$$

Na qual:

U: velocidade, em m/s

K: constante de velocidade de reação, em d<sup>-1</sup>

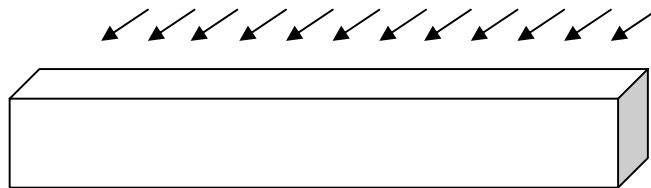
S<sub>d</sub>: velocidade da fonte não pontual, em g/m<sup>3</sup>-d

Para  $c = c_0$  em  $x = 0$ , tem-se:

$$c = c_0 e^{-\frac{k}{U}x} + \frac{S_d}{k} (1 - e^{-\frac{k}{U}x}) \quad \text{Eq. 7}$$

Os dados obtidos a partir das concentrações de nitrato carregado junto com os sedimentos erodidos das parcelas foram aplicados na equação 7.

A velocidade da fonte não-pontual ( $S_d$ ) está em unidades de  $\text{g/m}^3 \cdot \text{d}$ , ou seja, é uma carga volumétrica. A maneira que a carga entra no sistema influencia a parametrização de  $S_d$ . Quando ela vem de escoamento superficial, ela entra ao longo do comprimento do canal, e a melhor maneira de representá-la é por unidade de comprimento (**Figura 96**).



**Figura 96: Carga distribuída entrando no sistema ao longo do comprimento**

A velocidade, em unidades volumétricas, é convertida de acordo com a equação:

$$S_d = S_d'' \frac{L}{V} \quad \text{Eq.8}$$

Em que:

L: comprimento do canal (m)

V: Volume do escoamento (m<sup>3</sup>)

Considerando uma área de 1 ha (10000 m<sup>2</sup>), o comprimento do canal que recebe a carga difusa é de 100 m. Extrapolando os dados do estudo para essa área, obtêm-se os valores apresentados na **Tabela 19**.

**Tabela 19: Extrapolação dos dados obtidos em campo e determinação dos fatores Sd e Sd''**

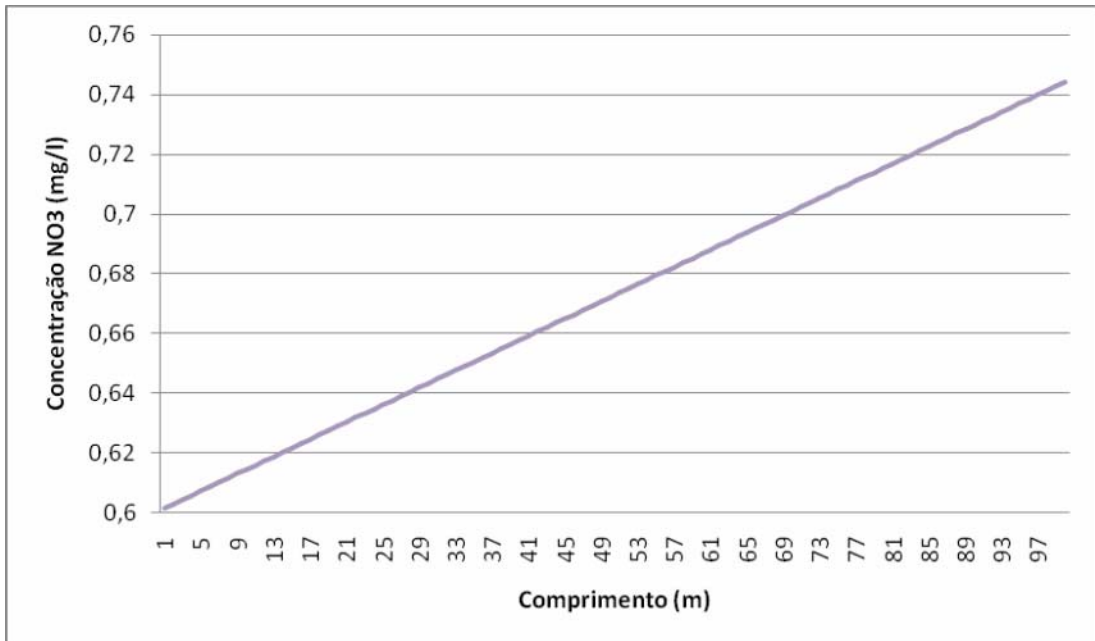
Parcelas	Preparo	Volume (l)	Volume (m <sup>3</sup> )	NO <sub>3</sub> (g)	Sd(g/m <sup>3</sup> .d)	Sd''(g/m.d)
1	Solo raspado	5909,09	5,90909	0,545	132,81233	7,848
2	Solo arado	4393,94	4,39394	0,485	158,94618	6,984
3	Solo raspado	6818,18	6,81818	0,242	51,110414	3,4848
4	Solo arado	3939,39	3,93939	0,06	21,93233	0,864
5	Solo raspado	4363,64	4,36364	0,09	29,699975	1,296
6	Solo arado	4181,82	4,18182	0,024	8,2643442	0,3456

O cálculo da diluição do nitrato foi feito a partir da média dos valores obtidos para o solo raspado e arado (**Tabela 20**)

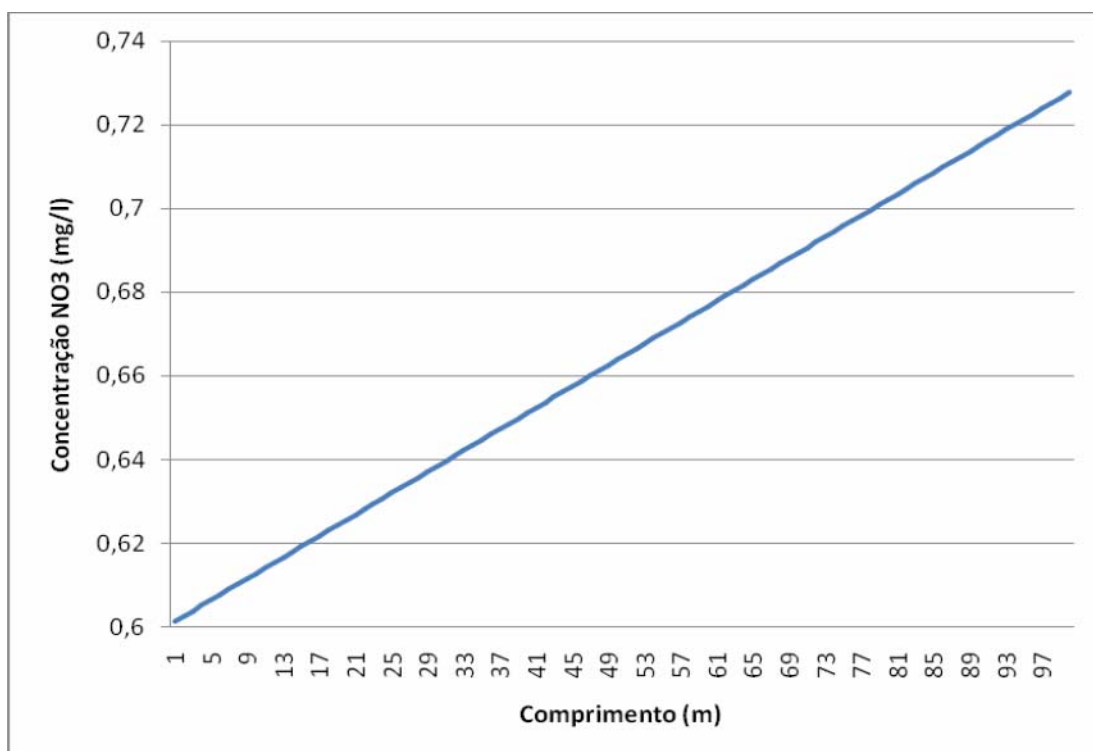
**Tabela 20: Cálculo da diluição do nitrato a partir das médias obtidas nos 2 tipos de preparo do solo**

Parcelas	V (m <sup>3</sup> )	Sd''(g/m <sup>3</sup> .d)	Sd''(g/m.d)
1-3-5	5,69697	4,2096	71,20757233
2-4-6	4,171717	2,7312	63,04761961

Substituindo os valores da Tabela 20 na equação 7, obtém-se a variação da concentração de nitrato ao longo dos 100 m do rio. Os resultados são mostrados nas Figuras 97 e 98.



**Figura 97: Concentração ao longo do rio para o solo raspado**



**Figura 98: Concentração ao longo do rio para o solo arado**

Considerando as vias do nitrato em meio aquático algumas considerações devem ser feitas. O nitrato é uma das principais fontes nitrogenadas para os produtores primários, ou seja, o fitoplâncton. Esses organismos servem de alimento e fonte de nitrogênio a outros animais aquáticos, como os peixes.

No ciclo do nitrogênio o nitrato é produto da oxidação biológica do amônio, pelo processo de nitrificação, realizado por microorganismos específicos (bactérias). O processo de nitrificação é acelerado em condições aeróbias, possibilitando com que o nitrito, que é a forma menos oxidada do nitrato seja convertido a este rapidamente. Caso este processo não ocorra em taxas desejáveis o nitrito formado pode se tornar altamente tóxico ao ambiente.

A presença de altas concentrações de nitrato em águas superficiais pode apresentar implicações de ordem ecológica e de saúde pública, caso o corpo receptor das descargas seja de uso múltiplo (agricultura, abastecimento, lazer, etc).

Ecologicamente, o nitrato em altas concentrações condiciona um aumento exagerado da biomassa aquática, pois representa fonte de alimentação. Essa biomassa, além de consumir altas taxas de oxigênio dissolvida na água representa fonte de matéria orgânica a ser decomposta, sobrecarregando ainda mais o ciclo do elemento no ambiente. Além do mais, a morte de peixes por falta de oxigenação na água representa outra grande fonte de matéria orgânica sendo incorporada ao sistema. Com o contínuo fornecimento de nitrato e conseqüentemente aumento da biomassa, as condições aeróbias do ambiente são gradualmente substituídas por condições próximas a anoxia, ocorrendo então um processo inverso. O nitrato passa a sofrer o processo de desnitrificação, passando de nitrato a nitrito e deste a amônia/amônio, sendo uma parte perdida para a atmosfera por volatilização na forma molecular e outra utilizada como fonte de alimentação. No entanto, caso as concentrações de amônia tornem-se elevadas por este processo, se estabelece uma condição de alta toxicidade na água (Esteves, 1998).

Este processo causa inúmeros danos ao ambiente aquático pois, causa a mortandade da biota, inviabiliza a água para diversos usos (como abastecimento humano, recreação e irrigação de hortaliças), além de depreciar terrenos marginais.

Como problema de saúde pública, está a concentração de nitrato acima dos limites recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS), para água potável, com a concentração máxima aceitável de 10 mg L<sup>-1</sup> e estabelecida ainda pela Resolução CONAMA 357/05. Este padrão também é adotado pela Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos do Ministério da Saúde, portaria Nº 518/2004 (Brasil, 1990).

Sabe-se que o nitrato quando absorvido pelo corpo humano transforma-se em nitrito e, este pode combinar-se com a hemoglobina formando a metahemoglobina, que inibe o transporte de oxigênio no sangue, levando a metanemia e até mesmo óbito (Burakham *et al.*, 2004).

No estudo em questão, uma precipitação acumulada de 19 mm em uma área de 1 ha condiciona concentrações variando entre 0,6 e 0,74 mg/L de nitrato na água. No entanto, considerando a extensão da área cultivada no Estado de São Paulo pode-

se afirmar que a área de contribuição aos corpos hídricos será, sem dúvida, superior a 1 ha.

Para estimar a área necessária para que a concentração de nitrato chegue ao valor crítico, ou seja, 10 mg/L, é utilizada a equação:

$$S_d = k \left( \frac{c - c_0 e^{-\frac{k}{U}x}}{1 - e^{-\frac{k}{U}x}} \right)$$

Eq. 9

Tem-se que:

C = 10 mg/l = 10 g/m<sup>3</sup> (concentração de nitrato limite conama)

C<sub>0</sub> = 0,6 mg/l = 0,6 g/m<sup>3</sup> (concentração de nitrato inicial do rio)

k = 0,1 d<sup>-1</sup> (cte de desnitrificação)

x = 100 m (comprimento do rio)

U = 49334,4 m/d (velocidade do rio)

Aplica-se o resultado de cada parcelas na equação:

$$S_d = \frac{m}{V} 60$$

Eq. 10

Onde:

m: massa de nitrato

V: volume escoado

A **Tabela 21** apresenta os resultados de m/V para cada parcela analisada.

**Tabela 21: Valores de m/V para cada parcela experimental**

<b>Parcelas</b>	<b>Preparo</b>	<b>Vol (m<sup>3</sup>) original</b>	<b>No<sub>3</sub><sup>-</sup> (g) original</b>	<b>m/v</b>
1	raspado	0,0195	0,00061	0,031282
2	arado	0,0145	0,00052	0,035862
3	raspado	0,0225	0,00027	0,012
4	arado	0,013	0,00007	0,005385
5	raspado	0,0144	0,00011	0,007639
6	arado	0,0138	0,00047	0,034058
		<b>Média solo raspado</b>	1.3.5	0,016974
		<b>Média solo arado</b>	2.4.6	0,025102

Assim, faz-se necessário obter o  $m/v = 77,2994 \text{ g/m}^3$  (que é a concentração de nitrato que chega ao rio necessária para elevar os valores ao limite crítico). Desta forma, obtêm-se a dimensão necessária da área agrícola, com as mesmas condições utilizadas no experimento (LVA+solo raspado+dose e forma de aplicação do sulfato de amônio e LVA + solo arado+dose e forma de aplicação do sulfato de amônio), para que o limite crítico seja atingido.

Os resultados são apresentados na **Tabela 22**.

**Tabela 22: Área agrícola mínima necessária para que a concentrações de nitrato atinja níveis críticos**

<b>Tipo de Preparo</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (ha)</b>
Solo Raspado	150281,62	15,03
Solo Arado	101620,6	10,16



Verifica-se que a forma de preparo do solo apresentou diferença expressiva no potencial de degradação das águas superficiais.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

- as frações de nitrogênio no solo proveniente do fertilizante que ficaram retidas na matriz do solo foram altas, porém não representam via de poluição de águas superficiais.
- os tipos de preparo do solo não influenciaram as frações retidas na matriz do solo, porém influenciaram a distribuição espacial das mesmas.
- solos arados apresentaram melhor distribuição das frações nitrogenadas, o que melhora as condições de absorção pelas culturas.
- a água da enxurrada se mostrou via insignificante de perda de nitrogênio do sistema. As características do solo em estudo evidenciaram que o amônio permaneceu totalmente retido na matriz do solo.
- o amônio representa fonte de nutrição para as plantas, podendo ser convertido a nitrato, outra fonte importante de nutrição.
- as possibilidades de volatilização e lixiviação do amônio foram mínimas neste estudo.
- os resultados indicaram alto potencial de lixiviação do nitrogênio na forma de nitrato.
- os sedimentos erodidos representaram a principal via de perda de nitrogênio, na forma de nitrato, como fonte não-pontual de poluição de águas superficiais em áreas agrícolas.
- as taxas de erosão e a intensidade de precipitação não influenciaram as perdas de nitrogênio (nitrato) adsorvido aos sedimentos.

- as primeiras chuvas apresentaram maior potencial de transporte de nitrogênio para os ecossistemas aquáticos, pela lavagem das partículas mais finas do solo nesta fase.
- a rugosidade do solo não influenciou nas concentrações de nitrogênio (nitrato) nos sedimentos erodidos.
- as concentrações de nitrato adsorvido aos sedimentos e que podem efetivamente chegar aos ecossistemas sensíveis - rios e lagos - podem ser consideradas altas, em função das implicações ecológicas e de saúde pública que representam. Além disso, altas perdas de nitrogênio de sistema agrícolas implicam em perdas econômicas significativas.
- de forma geral, não foi possível identificar a influência das características físicas do solo em cada parcela, com base nos resultados apresentados nos capítulos anteriores. A similaridade entre as mesmas não favorece uma análise deste tipo. Porém, as características intrínsecas do tipo de solo utilizado, as alterações provocadas pelo preparo do solo e a exposição a precipitações de características distintas permitiram este tipo de avaliação.
- o uso do sulfato de amônio enriquecido isotopicamente mostrou-se adequado para a investigação da perda de nitrogênio condicionada aos processos erosivos.
- a identificação do componente do processo erosivo e quantificação das perdas de nitrogênio por este gerado mostrou-se com bom potencial de utilização em modelos de previsão do destino de fertilizantes (sulfato de amônio) no sistema solo-água-planta bem como em modelos de qualidade de água.

## 6-CONCLUSÕES

---

O presente estudo permitiu caracterizar, experimentalmente, os processos de perda de solo, suas relações com o tipo e preparo do solo e a influência da intensidade da chuva. Foi possível estabelecer a interação entre os processos erosivos atuantes e os padrões de perda de nitrogênio proveniente do fertilizante sulfato de amônio por meio da identificação da principal via de perda do nitrogênio adicionado ao sistema.

A intensidade da chuva e os tipos de preparo do solo influenciaram diretamente nas taxas de erosão, onde as maiores intensidades em solo raspado, ou seja, de baixa rugosidade superficial, proporcionaram as maiores perdas de solo, como apresentado nos capítulos 2 e 3. O carreamento de nitrogênio, no entanto, não se mostrou proporcional a estas perdas.

Como mostrado no capítulo 5, a perda de nitrogênio proveniente do fertilizante deu-se mais intensamente nas primeiras chuvas, de menor intensidade. Além do mais, as maiores concentrações de formas nitrogenadas ficaram aderidas aos sedimentos erodidos nas parcelas experimentais.

O traçador de erosão utilizado e, sua análise no software SIARCS, evidenciou o início do transporte de sedimentos 3 minutos após o início da primeira chuva em solo arado e apenas 1 minuto em solo raspado, como mostrado no capítulo 4. Pode-se, assim deduzir que o carreamento de nitrogênio seja mais expressivo nesta fase do processo. Ressalta-se também que, nesta fase, na qual verifica-se baixo volume e velocidade do escoamento superficial, os sedimentos de granulometria mais fina possuem maior capacidade de serem transportados a distâncias maiores e deixarem o sistema. Assim, constatou-se que o componente sedimento e, mais especificamente sua fração argilosa, representa a principal via de aporte de nitrogênio aos corpos d'água em áreas agrícolas, com condições semelhantes às utilizadas no presente estudo.

Pode-se, portanto inferir que a intensidade dos processos erosivos atuantes não influencia diretamente nas perdas de nitrogênio, ou seja, altas taxas de erosão não significam necessariamente altas perdas de nitrogênio.

A maioria dos trabalhos envolvendo a perda de nitrogênio concentra-se nas perdas por lixiviação e volatilização, enfocando principalmente a preocupação agrônômica da eficiência do seu uso pelas culturas e os aspectos econômicos envolvidos neste contexto. A identificação da principal via de transporte de nitrogênio, no âmbito da erosão dos solos, amplia a perspectiva de análise para uma visão mais ampla e integrada do ambiente agrícola, enfatizando a preocupação ambiental relativa aos impactos decorrentes da perda de nitrogênio na qualidade dos componentes água e solo.

Em modelos hidrossedimentológicos que consideram a contribuição de fertilizantes nitrogenados na qualidade da água de bacias agrícolas, utiliza-se o total aplicado na área e simula-se sua perda nas formas dissolvida na água de escoamento e aderida às partículas de solo. Os modelos não consideram, porém, a granulometria do solo perdido por erosão que leva aderido à superfície de suas partículas o nitrogênio. Assim, os dados obtidos neste estudo, experimentalmente, em condições de campo e, outros possivelmente deste derivados, aliados ao uso de traçadores de erosão e nitrogênio evidenciam grande potencial de aplicação, tanto para a calibração de modelos como para o aperfeiçoamento de práticas agrícolas conservacionistas.

Além do mais, a obtenção direta de dados a partir do experimento em campo permitiu a dedução das taxas de erosão associadas a uma precipitação conhecida e à condições de tipo, preparo e cobertura do solo, bem como os coeficientes de rugosidade a estes relacionados. Desta forma, diversos coeficientes que compõem os modelos de predição de erosão, tais como a EUPS e a RUSLE, poderão destes derivar. A qualidade dos dados que alimentam estes modelos é determinante no sentido de conferir aos mesmos maior precisão e confiabilidade.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AINA, P.O. Soil changes resulting from long-term management practices in Western Nigeria. *Soil Sci. Soc.Am. J.*, 43:173-177, 1979.

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 Sci. Soc. Am. Proc.*, 31:550-556, 1967.

BACCHI, O.; Reichardt K.; Sparovek G. Sediment Spatial Distribution Evaluated by Three Methods and its Relation to Some Soil Properties. *Soil and Tillage Research*. 69: 117-125, 2003

BEASLEY, R. P. Erosion and sediment pollution control. 1º edition. The Iowa State University Press 320 pp, 1972

GALETI, P. A.. Conservação do Solo: *reflorestamento- Clima* IMPRESS- Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. Campinas SP. 279 pp, 1972

BENDASSOLLI, J.A; TRIVELIN,P.C.O; IGNOTO,R.F . Produção de amônia anidra e aquamônia enriquecida em <sup>15</sup> N a partir de ( <sup>15</sup> NH<sub>4</sub> )<sub>2</sub> SO<sub>4</sub>. *Scientia Agricola*, v.59, n.3, p.595-603, jul./set., 2002.

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

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

BERTOL, I.; AMARAL, A.J.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; PAZ GONZÁLEZ, A.; BARBOSA, F.T. 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*, v.30, p.543-553, 2006.

BERTOL, O. J.; RIZZI, N. E.; FAVORETTO, N.;LAVORANTI, O. J. Perdas de Nitrogênio via superfície e subsuperfície em sistema plantio direto. *Floresta* v.35 set/dez 429-442, 2005.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 4 ed. São Paulo: Ícone, 355 p., 1990.

BORDAS, M.P.; SEMMELMANN, F.R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: UFGS; São Paulo: USP/ABRH,. p.915-43, 1993.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advanced Soil Science*, v. 9, p. 177-213. 1989.

BRASIL. Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) Nº 357, 2005. Diário Oficial da União.18/03/2005.

BRASIL. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Coordenação Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. Portaria MS 518, 2004

BRESSON, L.M.; BOYFFIN, J. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, Amsterdam, v.7, p.301-325, 1990.

BURAKHAM, R; OSHIMA, M; GRUDPAN, K; MOTOMIZU, S. Simple Flow-Injection

System for the Simultaneous Determination of Nitrite and Nitrate in Water Sample. *Talanta*, Thailand, n. 64, p. 1259, 2004

BURWELL, R.E.; ALLMARAS, R.R. & SLONEKER, L.L. Structural alteration of soil surfaces by tillage and rainfall. *J. Soil Water Conserv.*, 21:61-63, 1966.

BURWELL, R.E. & LARSON, W.E. Infiltration as influenced by tillage-induced random roughness and pore space. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33:449-452, 1969.

CALDAS, L.; BRAVO, C.; PICCOLO, H.; FARIA, C. R. S. M. Measurement of leaf área with a hand scanner linked to a microcomputer. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, Brasília DF, v. 4, n. 1, p 17-20, 1992.

CALDERANO FILHO, B. Os solos da Fazenda Canchim. Centro de Pesquisas de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP: Levantamento semidetalhado, propriedades e potenciais. EMBRAPA, n7,Dez., 1998.

IPT. Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Peixe-Paranapanema. Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo, 1986.

CAMARGO, A.O. *Compactação do solo e desenvolvimento de plantas*. Campinas, Fundação Cargill,. 44p, 1983.

CARVALHO, N. O. *Hidrosedimentologia Prática*. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais e Eletrobrás, Brasília, 1994.

CASSOL, E.A.; LEVIEN, R.; ANGHINONI, I.; BADELUCCI, M.P. Perdas de nutrientes por erosão em diferentes métodos de melhoramento de pastagem nativa no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.26, n.3, p.705-12, 2002.

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*, v.30, p.339-352, 2006.

CHAPRA, S. C. Surface water-quality modeling. New York: McGraw-Hill, 844p, 1987.

CHRISTIANSEN, J.P. *Irrigation by sprinkling*. Berkeley: University of California Agricultural Experiment Station. Bulletin, 670, 124p.,1942..

COAN, O. *Sistemas de preparo de solo: efeitos sobre a camada mobilizada e no comportamento das culturas do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) e do milho (Zea mays L.), conduzidas em rotação*. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 138 p. 1995.

COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C. & FOSTER, G.R. Effect of residue cover, tillage-induced roughness, and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1005-1008, 1983.

COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C. & FOSTER, G.R. Soil loss reductions from conservation tillage practices. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 48:368-373, 1984.

CORRECHEL, V.; BACCHI, O.O.S.; MARIA, I.C. de.; REICHARDT, K.; DECHEN, C.F. *Avaliação de índices de erodibilidade de um argissolo vermelho-amarelo através da técnica de Césio-137*. In: XXIX CBCS-SBCS. Ribeirão Preto (CD ROOM), 2003.

CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M. F.; JORGE, L. A. C.; RALISCH, R.; TOZZI, C. L.; TORRE, A.; VAZ, C. M. P.. Avaliação da distribuição de raízes no solo por processamento de imagens digitais: *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Campinas v.18, p. 365-371, 1994.



CURRENCE, H.D. & LOVELY, W.G. The analysis of soil surface roughness. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 13:710-714, 1970

DANIEL, T. C.; SHARPLEY, A. N.; LEMUNYON, J. L. Agricultural phosphorus and eutrofication: a symposium overview. *Journal of Environmental Quality*, Madison, Wis., n. 27, p. 251-257, 1998.

D'Agostini, L. R. *Erosão: o problema mais que o processo*. Florianópolis: Ed. UFSC. 1999.

DE ROO, A.P.J., WESSELING, C.G., OFFERMANS, R.J.E.; RITSEMA, C.J. LISEM: a user guide. Netherlands: Utrecht University. 49p.,1995.

DE MARIA, I.C. ; STORINO, M. ; CASTRO, Orlando Melo de. *Equipamento com sensor a laser para medida da rugosidade da superfície do solo*. In: XXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2003, Ribeirão Preto. Solo: Alicerce dos Sistemas de Produção. Botucatu : UNESP. v. 1. p. 1-4, 2003.

DROOGERS, P., STEIN, A., BOUMA, J., DE BOER, G. Parameters for describing soil macroporosity derived from staining patterns. *Geoderma* 83, 293– 308, 1998.

EILERS, V. H. Relatório Parcial de Atividades do Projeto Vinculado ao Programa Prodoc-Capes USP-PPG-SEA-EMBRAPA, 2003.

EL-SWAIFY, S.A.; DANGLER, F.W. Rainfal Erosion in the Tropics: A State-of-the Art. In: EL-SWAIFY, S.A. et al. (orgs), *Soil Erosion and Conservation in the Tropics*. Madison. American Society of Agronomy. Special Publication Number 43. Cap. 1. p. 1-25, 1982.

ESTEVEES, F.A. (1988). *Fundamentos da limnologia*. 2ed Rio de Janeiro: Interciência 602p.

FERRAZ DE MELLO, F. M.; BRASIL SOBRINHO, M. C. B.; ARZOLLAS, S.; SILVEIRA, R. I.; COBRA NETTO, A.; KIEHL, J.C. Fertilidade do solo. São Paulo: Nobel, 400 p., 1989.

GAMERO, C. A. et al. *Estabilidade de agregados sob diferentes tipos de preparo do solo*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. 16 1986 São Paulo. Anais: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola 46-54, 1986.

GAVA, G.J.C; TRIVELIN, P.C.O ; VITTI, A.C; OLIVEIRA, M.W. Recuperação do nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) da uréia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) *R. Bras. Ci. Solo*, 27:621-230, 2003.

GBUREK, W. J.; SHARPLEY, A. L. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watersheds. *Journal of Environmental Quality*, Madison, Wis., n. 27, p. 267-277, 1998.

GOLABI, M.H., RADCLIFFE, D.E., HARGROVE, W.L., TOLLNER, E.W. Macropore effects in conventional tillage and no-tillage soils. *Journal of Soil and Water Conservation* v.50, 205– 210, 1995.

GRAF, W.H. *Hydraulics of sediment transport*. New York: McGraw-Hill, 1971. 509 p.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M.. (Org.). *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 15-55, 1999.

GUERRA, A.J.T. Experiments and monitoring in soil erosion. *Revista do Departamento de Geografia*, n. 16, p. 32-37, 2005.

HASSET, J.J.; BANWART, W.L. *Soils and their environment*. New Jersey: Englewood Cliffs, 424p., 1992.

JOHNSON, C.B.; MANNERING, J.V. & MOLDENHAUER, W.C. Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:772-777, 1979.

JONG VAN LIER, Q. & LIBARDI, P. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:1005-1014, 1999.

JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S. *SIARCS 3.0: novo aplicativo para análise de imagens digitais aplicado a ciência do solo*. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, Águas de Lindóia-SP, ago. 1996. Solo suelo 96. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo,. 5p. (CD-ROM) 1996.

JORGE, L. A. C.; DE MARIA, I. C.; LOMBARDO NETO, F.; CRESTANA. S. *Avaliação da cobertura do solo por culturas através de processamento de imagens* In: Congresso brasileiro de Ciência do Solo – Cerrados: Fronteira Agrícola no Século XXI, 24., Goiânia Resumos. Goiânia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1993.

KLUTE, A. & DIRKSEN, C. *Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods* In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, Soil Science Society of America, p.697-734, 1986.

LEHRSCHE, G.A.; WHISLER, F.D.; RÖMKENS, M.J.M. Soil surface roughness as influenced by selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, v.10, p.197-212, 1987.

LEPSCH, I.F. *Solos: formação e conservação*. 5.ed. São Paulo, Melhoramentos, 1993. 157p.

LEVIEN, R.; COGO, N.P. & ROCKENBACH, C.A. Erosão na cultura do milho em diferentes sistemas de cultivo anterior e métodos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:73-80, 1990.

LIBARDI, P. L, MORAES, S O, SAAD, A M, LIER, Q J V, TUON, R L. Nuclear techniques to evaluate water use of field crops irrigated in different growth stages. Kluwer Academic Publishers, v.84, p.109-119., 1999.

LIMA, W.). *Fungos Micorrízicos arbusculares: bioquímica e morfologia da interação com ácidos húmicos em sua multiplicação em aeroponia*. Dissertação (mestrado) – Instituto Agrônomo Universidade Federal do Rio de Janeiro. Seropédica RJ. 99 p., 2004.

LINDEN, D.R.; VAN DOREN JUNIOR, D.M. Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. *Soil Science Society of America Journal*, v.50, p.1560-1565., 1986.

LIU, P.; ZHOU, P.; YANG, M.; SHI, H. Stable rare earth element tracer to evaluate soil erosion. *Soil & Tillage Research* v.76 147-155., 2004.

LOBB, D.A., KACHANOSKI, R.G., MILLER, M.H. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using <sup>137</sup>Cs as a tracer. *Can. J. Soil Sci.* 75, 211–218., 1995.

LOBB, D.A., KACHANOSKI, R.G., MILLER, M.H. Tillage translocation and tillage erosion in the complex up land scapes of southwestern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.* 52,189–209., 1999.

LOPES, P.R.C.; COGO, N.P.; CASSOL, E.A. Influência da cobertura vegetal morta na redução da velocidade da enxurrada e na distribuição de tamanho dos sedimentos

transportados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.11, p.193-197, 1987.

MALAVOLTA, E. Manual de Química agrícola: nutrição de plantas e fertilidade do solo. São Paulo, Agronômica Ceres, 186p. 1976.

MARTINI, L.C.P.; LANNA, A.E. Medidas compensatórias aplicáveis à questão da poluição hídrica de origem agrícola. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.v.8, n.1 Jan/Mar.p.111-136. 2003.

MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L.; STERNBERG, L.S.L.; RIBEIRO, A.; MOREIRA, M.Z. Using stable isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon Basin. *Journal of Hydrology*, v.183, n.3-4, p.191-204., 1996.

MARTINELLI, L.A.; ALMEIDA, S.; BROWN, I.F.; MOREIRA, M.Z.; VICTÓRIA, R.L.; STERNBERG, L.S.L.; FERREIRA, C.A.C.; THOMAS, W.W. Stable carbon isotope ratio of tree leaves, boles and fine litter in a tropical forest in Rondônia, Brazil. *Oecologia*, v. 114, p. 170-179. 1998.

MARTINS, M.E; COIADO,M.C. *Produção de sedimentos em microbacia cultivada com cítrus*. In: Produção quali-quantitativa da produção de sedimentos. UFSM, Santa Maria 435p., 2001.

MELÃO, M.G.G. *A comunidade planctônica (fitoplâncton e zooplâncton) e produtividade secundária do zooplâncton de um reservatório oligotrófico*. Tese de doutorado em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 152p. 1997.

MIDDLETON,R; BRASINGTON, J; MURPHY, B.J.; FROSTICK, L. E. Monitoring gravel framework dilation using a new digital particle tracing method. *Computers & Geosciences* 26, 329-340. 2000.

MILLER, M.P.; SINGER, M.J.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.52, p.1133-1141, 1988.

MINOTI, R. T.; CRESTANA, S. A Perda de Solo como Indicador de Vulnerabilidade de Bacias Hidrográficas: Artigos Publicados na Revista Brasileira de Ciência do Solo e em Congressos Brasileiros de Ciência do Solo, Manejo e Conservação. In: Evaldo Luiz Gaeta Espíndola; Valdir Schalch. (Org.). *Bacia Hidrográfica - Diversas Abordagens em Pesquisa*. São Carlos: RIMA, 2004, v. 3, p. 47-54.

MINOTI, R. T. ; SILVA, F. G. B. ; NETTO, A. A. ; MACHADO, R. E. ; TSUHAKO, E. M.; CRESTANA, S. . Determinação preliminar do aporte de sedimentos na microbacia do ribeirão guabiobas (ESTADO DE SP. VI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS) 2005.

MONESMITH, F.L. *Mercado de fertilizantes nitrogenados: tendências internacionais e nacionais*. In: Workshop sobre Manejo de Fertilizantes Nitrogenados e Sulfatados na Agricultura, Piracicaba, 2001.

MORRIS, C.; MOONEY, S. J. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers. *Geoderma* 118 133–143. 2004.

MURAOKA,T. Uso de técnicas isotópicas em fertilidade do solo. In: OLIVEIRA, A.J; GARRIDO, W.E.; ARAÚJO, J. D.; LOURENÇO, S. Métodos de pesquisa em fertilidade do solo. Brasília: EMBRAPA-SEA, 329p. 1991.

NEVES, F. F. ; SILVA, F. G. B. ; CRESTANA, S. . Uso do modelo AVSWAT na avaliação do aporte de nitrogênio (N) e fósforo (P) aos mananciais de uma microbacia hidrográfica contendo atividade avícola. Revista da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, v. 4, p. 1-19, 2006.

NOLLA, D. *Erosão do solo, o grande desafio*. 1ª ed., Porto Alegre, DDIR/CORAG, 412p. 1982.

NORTCLIFF, S., QUISENBERRY, V.L., NELSON, P., PHILLIPS, R.E. *The analysis of soil macropores and the flow of solutes*. Proc. IX Int. Working meeting on Soil Micromorphology, Townsville, Australia. 1992.

OLDEMAN, L. R.; HAKKELINK, R. T. A.; SOMBROEK, W. *World map of the status of human induced soil degradation: an explanatory note*. Amsterdam: International Soil Reference and Information Centre, 27 p. 1990.

OLIVEIRA, A.D. *Arado de discos: desempenho em função do ângulo do apo e das condições de superfície de um solo Podzólico Vermelho-amarelo Câmbico fase Terraço*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).Viçosa: UFV, 1997.

OLIVEIRA, J. C. M.; REICHARST, K.; BACCHI, O. Nitrogen dynamics in a soil-sugar cane system. *Sci. Agric.*, July/sept, vol 57 no.3 p.467-472. 2000.

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

Parker, D.B.; Michel, T.G.; Smith, J.L. Compaction and water velocity effects on soil in shallow flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.121, n.2, p.170-178, 1995

PAZ GONZÁLEZ, A. & TABOADA CASTRO, M.T. *Medida del microrrelieve del suelo y estimación de la retención hídrica en depresiones de la superficie*. En: GRANDAL D'ANGLADE, A. & PAGÉS VALCARLOS, J.L., eds. In: REUNIÓN DE GEOMORFOLOGÍA, 4., A Coruña, p.829-841.1996.

PHILIP, O.G.; SCHMIDL, W.D.; HASSAN, Y.A. Development of a high speed particle image velocimetry technique using fluorescent tracers to study steam bubble collapse. *Nuclear engineering and design*. Vol 149,1-3:375-385. 1994.

PREVEDELLO, C.L.; KOBAYAMA, M.; JACOBS, G.A. & DIVARDIN C.R. Comparação dos métodos do perfil instantâneo e de Van Genuchten na obtenção da condutividade hidráulica de uma areia marinha. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 19, p. 1-5, 1995.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C.P.A.; PEDROSO, A.F. CAMARGO, A.C.; RASSINI, J.B.; ROCHA FILHO, J. OLIVEIRA, G.P.; CORREA, L.A.; ARMELIN, M.J.A.; VIEIRA, S.R. & DECHEN, S.C.F. Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim. São Carlos, Embrapa Pecuária Sudeste – Boletim de Pesquisa no 5. 133p. 1999.

RIGUETTO, A. M. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. 1º ed. São Carlos: Publicação EESC-USP, . v. 1. 819 p. 1998.

RODRIGUES, J.E (1982). Estudo de Fenômenos Erosivos Acelerados: Boçorocas. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, 148 p.

ROMEIRO, N. M. L. *Simulação Numérica de Modelos de Qualidade de Água Usando o Método de Elementos Finitos Estabilizados*. Tese (Doutorado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 197 p. 2003.



RUSSEL, E.J. & RUSSEL, R.W. *Soil conditions and plant growth*. 9.ed. London, Longman & Green, 770p. 1961.

SCHINCARIOL, R.A.; HERDERICK, E.E.; SCHWARTZ, F.W. On the application of image analysis to determine concentration distributions in laboratory experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*. 12, 197-215. 1993.

SANTOS, J.E. Introdução In: SANTOS, J.E.; PIRES, J.S.R. (eds.), *Estudos Integrados em Ecossistemas: Estação Ecológica de Jataí*. São Carlos. v. 2, pp. ix-xiii.

Sharpley A N (1983) Effect of soil properties on the kinetics of phosphorus desorption. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 462–467. 2000.

SILVA, F.G.B.; CRESTANA, S Modelos e formulações para análise de erosão de solos em bacias hidrográficas voltados ao planejamento ambiental. In: *Ciências Ambientais: diversas abordagens para a bacia hidrográfica*. São Carlos:RIMA Ed. 2004.

SILVA, F. G. B. ; MINOTI, R. T. ; NETTO, A. A. ; REIS, J. A. T. ; TSUHAKO, E. M. ; CRESTANA, S. . Simulação da produção de sedimentos em uma sub-bacia hidrográfica experimental com o modelo SWAT. VI Encontro Nacional De Engenharia De Sedimentos , 2004.

SILVA, F. G. B. ; MINOTI, R. T. ; MONTANO, M. ; NETTO, A. A. ; CRESTANA, S. . Caracterização ambiental e risco de erosão de uma microbacia hidrográfica rural e sua importância para o planejamento regional. In: COORDENAÇÃO PPG-SEA. (Org.). COLEÇÃO CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL VOL 4.. São Carlos: RIMA, 2005.

SIMÕES, L. B. *Integração entre um modelo de simulação hidrológica e sistema de informação geográfica na delimitação de zonas tampão ripárias*. Botucatu.. Tese (Doutorado) – Faculdades de Ciências Agrônomicas Universidade Estadual Paulista. 271p. 2001

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em pomar cítrico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.21, p.367-372, 1997.

Stroosnijder, L. Quantification of nutrient erosion. In: Proceedings Conference on Erosion and Land Degradation in the Mediterranean. Portugal, University of Aveiro, pp. 89–98. 1995.

SWANSON, N.P. A rotating-boom rainfall simulator. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 8:71-72, 1965.

TELLES, D.D. Água na agricultura e pecuária. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TORRENETO, A.; CRUVINEL, P.E.; CORONA-Jr.; CRESTANA, S. *Um Sistema de Aquisição de dados para a área Agropecuária*. São Carlos – EMBRAPA-CNPq. 1999.

TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L.; RODRIGUES, J.C.S. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia- 15 N e uréia- 15 N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.30, p.1375-1385. 1995.

TRIVELIN, P.C.O.; RODRIGUES, J.C.S.; VICTORIA, R.L. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia- 15N e uréia- 15N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.31, p.89-99. 1996.

URI, N.D. & LEWIS, J.A. (1998). The dynamics of soil erosion in US agriculture. *The Science of the Total Environment*, 218, 45-58.

VAN DEN BOSCH, H., GITARI, J.N., OGARO, V.N., MAOBE, S., VLAMING, J. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems

(NUTMON). III. Monitoring nutrient flows and balances in three districts in Kenya. *Agric. Ecosyst. Environ.* 71, 63–80. 1998.

VOLK, M.G. Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf of bare soils. *Agronomy Journal*, Madison, 51:746-9, 1959.

ZACHAR, D. *Soil erosion: developments in soil science*. New York, Elsevier Scientific, 547p. 1982.

ZHANG, J.H; LOBB,D.A; LIU,G.C. Assessment of tillage translocation and tillage erosion by hoeing on the steep land in hilly areas of Sichuan, China. *Soil & Tillage Research* 75: 99-107. 2004.

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

WISCHMEIER, W.H. e SMITH, D.D. *Predicting rainfall erosion losses*. Guide to Conservation Farming. US Department of Agriculture Handbook, 537. 58p.1978.

WOLMAN, M. G. Soil erosion and crop productivity: a worldwide perspective in soil erosion and crop productivity. Madison: *Soil Science Society of America*, 1985. (WordWatch Paper, 60).