
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA / CAMPUS II
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DA EROSÃO
EM MICROBACIAS NA BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ - PB**

Campina Grande - PB

Junho de 1997



P436m

Pereira, Jose de Araujo

Modelagem do escoamento superficial e da erosao em microbacias na bacia experimental de Sume - PB / Jose de Araujo Pereira. - Campina Grande, 1997.

161 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Escoamento Superficial - Bacia Experimental - Sume(PB) 2. Erosao em Microbacias - Bacia Experimental de Sume(PB) 3. Erosao de Microondas. 4. Dissertacao I. Srinivasan, Vajapeyam S. , Prof. Dr. II. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 551.3.053(043)

JOSÉ DE ARAÚJO PEREIRA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM, 10/06/1997

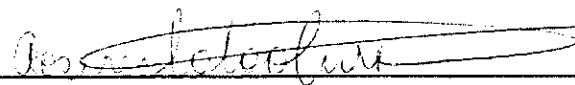
**MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DA
EROSÃO EM MICROBACIAS NA BACIA EXPERIMENTAL DE
SUMÉ - PB**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS



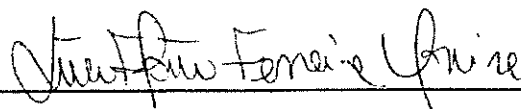
Prof. Dr. Vajapeyam S. Srinivasan

Orientador



Prof.ª Dr.ª Rosires Catão Curi

Examinadora



Prof. Dr. Lúcio Flávio Ferreira Moreira

Examinador

Campina Grande - Paraíba

Junho de 1997

JOSÉ DE ARAÚJO PEREIRA

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DA EROSÃO
EM MICROBACIAS NA BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ - PB**

Dissertação apresentada ao Curso de
Pós-graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração : Recursos Hídricos

Orientador : Prof. Dr. Vajapeyam S. Srinivasan

DEC/UFPB/CCT

Campina Grande

Junho de 1997

DEDICATÓRIA

A minha mãe, Hilda

pelo apoio e carinho

A meu pai

Aos meus irmãos

A minha esposa Vilma

AGRADECIMENTOS

A Deus, que "é menino em mil sertões, e chove em todas as cabeceiras".

À sociedade brasileira que através do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), contribuiu financeiramente para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao prof. Vajapeyam S. Srinivasan pela sua valiosa orientação, sabedoria, incentivo e paciência, concedidos no decorrer de toda a elaboração deste trabalho.

Aos professores e funcionários do curso de Engenharia Civil da área de Recursos Hídricos.

Ao professor M.Sc Manoel Gilberto Barros (in memoriam).

Aos alunos do curso de Mestrado em Engenharia Civil pelo companheirismo e amizade prestados durante o decorrer do curso.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, participaram de alguma forma na realização deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figuras		páginas
2.1	Cascata de n planos recebendo escoamento lateral e descarregando no j-ésimo elemento de canal (Kibler e Woolhiser, 1970)	15
3.1	Relação precipitação - escoamento para microbacia 3 tendo o índice de precipitação antecedente IH como parâmetro (Gomes et al., 1987)	18
3.2	Relação erosão - erosividade EI_{30} para microbacia 3 tendo o índice de precipitação antecedente IH como parâmetro (Gomes et al., 1987)	18
3.3	Relação entre o parâmetro de infiltração N_s com o número de dias anteriores ao evento sem ocorrência de chuva D (Santos, 1994).	20
4.1	Definição resumida do processo de escoamento superficial (Woolhiser & Liggett, 1967).	25
4.2	Definição do processo de erosão-deposição nos declives (Lopes, 1987)	30
4.3	Fluxograma de informações no programa WESP (Lopes, 1987)	38
5.1	Localização da Bacia Experimental de Sumé e das zonas hidrologicamente semelhantes (Cadier et al., 1983).	40
5.2	Repartição dos solos na Bacia Experimental de Sumé (Molinier et al., 1989).	43
5.3	Esquema de circulação na Bacia Experimental de Sumé (Molinier et al., 1989).	45
5.4	Croqui de localização das instalações (Cadier et al., 1983)	47
5.5	Levantamento topográfico da microbacia 3 (Cadier et al., 1983)	49
5.6	Levantamento topográfico da microbacia 4 (Cadier et al., 1983)	50
5.7	Dispositivo de medição das microbacias (Cadier et al., 1983)	51
5.8	Dispositivo de medição das parcelas de 100m ² (Cadier et al., 1983)	53
6.1	Visualização tridimensional da microbacia 4 (Galvão, 1990)	62

6.2	Delineamento geométrico da microbacia 4 sobre o levantamento topográfico (Galvão, 1990)	63
6.3	Representação esquemática da microbacia 4 para o WESP (Galvão, 1990)	64
6.4	Visualização tridimensional da microbacia 3 (Santos, 1994)	65
6.5	Delineamento geométrico da microbacia 3 sobre o levantamento topográfico (Santos, 1994)	66
6.6	Representação esquemática da microbacia 3 para o WESP (Santos, 1994)	67
6.7	Curva granulométrica do solo amostrado na parcela 1	74
6.8	Curva granulométrica do solo amostrado na parcela 4	75
6.9	Curva granulométrica do solo amostrado na microbacia 3	76
6.10	Curva granulométrica do solo amostrado na microbacia 4	77
6.11	A variação da função objetivo do modelo WESP em relação ao parâmetro K_i (Santos, 1994)	80
6.12	Relação entre o parâmetro de infiltração N_s e o índice de umidade IH.	85
6.13	Relação entre o parâmetro de infiltração N_s e a precipitação acumulada para os cinco dias anteriores ao evento.	86
6.14	Relação entre o parâmetro de infiltração N_s e número de dias anteriores ao evento sem ocorrência de chuva NDAC.	87
6.15	Relação entre o parâmetro de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial K_r com o índice de umidade IH	88
6.16	Relação entre o parâmetro de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial K_r com a precipitação acumulada para os últimos cinco dias anteriores ao evento.	89
6.17	Relação entre o parâmetro de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial K_r com o número de dias anteriores sem chuva NDAC.	90
6.18	Relação entre o parâmetro de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial K_r com o parâmetro de infiltração N_s .	91
6.19	Relação entre a lâmina calculada e a lâmina observada para microba-	

	cia 4, utilizando um valor de K_r representativo para todos os eventos.	97
6.20	Relação entre a erosão calculada e a erosão observada para microbacia 4, utilizando um valor de K_r representativo para todos os eventos.	98
6.21	Relação entre a erosão calculada e a erosão observada para microbacia 4, utilizando o valor de K_r determinado pela relação funcional $K_r = 1,7305(N_s)^{-0.1559}$	99
6.22	Relação entre a lâmina observada e a lâmina calculada para microbacia 3	103
6.23	Relação entre a erosão observada e calculada na microbacia 3, obtidas com um valor de K_r representativo para todos os eventos.	104
6.24	Relação entre a erosão observada e calculada na microbacia 3, obtidas com o valor de K_r determinado pela função matemática definida.	105

LISTA DE TABELAS

Tabelas		Páginas
5.1	Características das microbacias instaladas	48
5.2	Características Físicas das parcelas (Gomes et al, 1987).	52
6.1	Características físicas dos elementos da microbacia 4 para entrada no WESP (Galvão, 1990).	68
6.2	Sequência de cálculo e posição relativa dos elementos da microbacia 4 (Galvão, 1990)	69
6.3	Características físicas dos elementos da microbacia 3 para entrada no WESP (Santos, 1994)	70
6.4	Sequência de cálculo e posição relativa dos elementos da microbacia 3 (Santos, 1994)	71
6.5	Calibração dos parâmetros de infiltração e erosão nas parcelas 1 e 4.	92
6.6	Determinação dos valores de $K_{r\text{médio}}$ e $N_{s\text{médio}}$ obtidos através dos parâmetros N_s e K_r das parcelas 1 e 4 e os fatores físicos.	93
6.7	Estimativas dos parâmetros de infiltração " N_s " e de erosão nos canais "a" para microbacia 4.	95
6.8	Calibração dos parâmetros de infiltração " N_s " e de erosão nos canais "a" para microbacia 4, utilizando a função encontrada para determinação de K_r .	96
6.9	Comparação entre a lâmina e erosão observadas e as calculadas na microbacia 3, utilizando os parâmetros otimizados na microbacia 4 com a determinação de um valor único para K_r .	101
6.10	Comparação entre a lâmina observada e a calculada, e entre a erosão observada e a calculada na microbacia 3, utilizando os parâmetros otimizados da microbacia 4, com o valor de K_r definido pela função empírica.	102

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Fator de erodibilidade do solo nos canais
A	Área de seção transversal do fluxo
c	Concentração de sedimentos
d	Deposição dos sedimentos
d_s	Tamanho característico dos sedimentos
d_{50}	Diâmetro médio dos sedimentos
e_i	Erosão pelo impacto da chuva
e_r	Erosão por arrastamento pelo fluxo
E_c	Erosão calculada
$E_{I_{30}}$	Índice de erosividade
E_o	Erosão observada
$f(t)$	Taxa de infiltração
$F(t)$	Profundidade da frente de molhamento
g	Aceleração da gravidade
h	Profundidade do fluxo
I	Intensidade de precipitação
IH	Índice de umidade
K	Fator de redução da umidade do solo utilizado no cálculo do Índice de umidade IH
K_i	Parâmetro de erodibilidade do solo pelo impacto das gotas de chuva
K_r	Parâmetro de erodibilidade do solo pelo fluxo superficial
K_s	Condutividade hidráulica saturada
L_c	Lâmina calculada
L_o	Lâmina observada
m	Parâmetro de geometria do plano ou do canal
n_c	Coefficiente de Manning para os canais
NDAC	Número de dias anteriores sem ocorrência de chuva

n_p	Coefficiente de Manning para os planos
N_s	Potencial de capilaridade
p	Porosidade efetiva do solo
PA5D	Precipitação total acumulada para os últimos 5 dias
q_A	Fluxo de entrada lateral por unidade de comprimento do canal
Q	Vazão do fluxo
Q_o	Vazão de entrada a montante do canal
q_s	Entrada lateral de sedimentos no canal
r	Taxa de entrada do fluxo superficial no plano
R_H	Raio hidráulico
S	Sucção média da frente de molhamento
S_e	Saturação efetiva relativa do solo
S_f	Declividade da linha de energia
S_o	Declividade do plano
t	Tempo
t_p	Tempo de empoçamento
TW	Largura de topo do fluxo
u	Velocidade média do fluxo
V_s	Velocidade de queda das partículas
WP	Perímetro molhado
x	Distância na direção do fluxo
α	Parâmetro de rugosidade superficial
δ	Coefficiente para tensão de cisalhamento crítica
Δt	Incremento de tempo
Δx	Incremento de distância
ε_c	Coefficiente de deposição nos canais
ε_p	Coefficiente de deposição nos canais
ϕ	Taxa de sedimento no fluxo
γ	Peso específico da água
γ_s	Peso específico dos sedimentos
ν	Viscosidade cinemática da água

θ_i	Umidade inicial do solo
θ_s	Umidade na saturação do solo
τ	Tensão de cisalhamento média
τ_c	Tensão de cisalhamento crítica média

LISTA DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Roteiros para coleta de dados nas parcelas e microbacias	121
2	Dados de escoamento superficial e erosão nas parcelas 1 e 4 correspondente às cheias de N ^{os} 146 a 264	124
3	Dados de precipitação - período de 1987 a 1991	129
4	Dados de pluviografia das cheias utilizadas nas parcelas 1 e 4	140

SUMÁRIO

Dedicatória.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tabelas.....	vii
Lista de Símbolos.....	viii
Lista de Anexos.....	xi
Sumário.....	xii
Resumo.....	xvi
Abstract.....	xvii
1 - Introdução.....	1
2 - Modelagem dos processos de escoamento superficial e erosão em bacias hidrográficas.....	3
2.1 - Considerações gerais.....	3
2.2 - Escoamento superficial.....	3
2.3 - Erosão-Sedimentação.....	4
2.3.1 - Origens dos sedimentos e tipos de erosão.....	5
2.3.2 - Erosão na superfície.....	5
2.3.3 - Erosão no canal.....	7
2.4 - Definição e classificação dos modelos.....	7
2.4.1 - Modelo chuva-vazão.....	7
2.4.1.1 - Modelos fundamentais.....	7
2.4.1.2 - Modelos conceituais.....	8
2.5 - Modelos de produção de sedimentos.....	8
2.5.1 - Modelos empíricos.....	9
2.5.2 - Modelos fundamentais.....	11
2.6 - Relação entre um modelo de erosão com um modelo hidrológico.....	13
3 - Trabalhos anteriores realizados na Bacia Experimental de Sumé.....	16
3.1 - Generalidades.....	16

3.2 - Trabalhos desenvolvidos na Bacia Experimental de Sumé.....	16
3.3 - Considerações finais.....	21
4 - Modelo WESP.....	22
4.1 - Considerações gerais.....	22
4.2 - Equações básicas do modelo WESP.....	23
4.2.1 - Infiltração.....	23
4.2.2 - escoamento superficial.....	25
4.2.3 - Componente erosão-deposição.....	29
4.3 - O programa WESP.....	33
4.3.1 - Descrição geral.....	33
4.3.2 - Gerador de arquivos de entrada.....	33
4.3.3 - Componentes do programa computacional WESP.....	34
4.3.4 - Seqüência computacional.....	36
4.3.5 - Dados e parâmetros de entrada.....	36
5 - Bacia Experimental de Sumé.....	39
5.1 - Considerações gerais.....	39
5.2 - Localização.....	39
5.3 - Características físico-climáticas.....	41
5.3.1 - Clima.....	41
5.3.2 - Sub-solo.....	41
5.3.3 - Solo.....	41
5.3.4 - Relevo.....	46
5.3.5 - Vegetação.....	46
5.4 - Dispositivo experimental.....	46
5.4.1 - Microbacias.....	48
5.4.2 - Parcelas experimentais.....	52
5.4.3 - Manejo do solo e vegetação.....	54
5.5 - Coleta de dados.....	55
5.5.1 - Dados coletados nas microbacias.....	56
5.5.2 - Dados coletados nas parcelas experimentais.....	56
5.5.3 - Observações meteorológicas.....	57
5.5.4 - Processamento dos dados de escoamento superficial e	

erosão.....	57
5.6 - Dados utilizados.....	58
6 - Aplicação do modelo WESP para os estudos de Sumé.....	59
6.1 - Aplicação do modelo em parcelas e microbacias da Bacia Experimental de Sumé.....	59
6.1.1 - Considerações gerais.....	59
6.1.2 - Discretização espacial das microbacias em planos e canais.....	60
6.1.3 - Estimativa dos parâmetros.....	72
6.1.4 - Parâmetros definidos a "priori".....	72
6.1.5 - Parâmetros otimizados.....	79
6.2 - A metodologia utilizada para a calibração.....	81
6.3 - Verificação da variação dos parâmetros N_s e K_r com a umidade do solo.....	82
6.3.1 - Determinação do parâmetro de erosão nos planos K_r para a microbacia 4.....	83
6.3.2 - Calibragem dos parâmetros N_s e "a" para a microbacia 4.....	94
6.3.3 - Extrapolação dos parâmetros calibrados na microbacia 4 para a microbacia 3.....	100
7 - Discussão dos resultados.....	106
7.1 - Considerações gerais.....	106
7.2 - Calibragem dos parâmetros N_s e K_r nas parcelas 1 e 4.....	106
7.3 - Calibragem dos parâmetros de infiltração e erosão na microbacia 4.....	109
7.4 - Extrapolação dos parâmetros calibrados na microbacia 4 para a microbacia 3.....	111
8 - Conclusões e recomendações.....	113
8.1 - Conclusões.....	113
8.2 - Recomendações.....	114
9 - Referências bibliográficas.....	115
Anexo 1.....	121
Roteiro para coleta de dados nas microbacias.....	122
Roteiro para coleta de dados nas parcelas.....	123

Anexo 2.....	124
Dados de escoamento superficial e erosão nas parcelas 1 e 4.....	125
Anexo 3.....	129
Dados de precipitação.....	130
Anexo 4.....	140
Dados de pluviografia das cheias utilizadas nas parcelas 1 e 4.....	141

RESUMO

Este trabalho representa uma avaliação da aplicabilidade do modelo hidrosedimentológico WESP (Watershed Erosion Simulation Program), o qual é um modelo distribuído, eventual e baseado nos processos físicos. O modelo foi aplicado para as parcelas e microbacias desmatadas da Bacia Experimental de Sumé, utilizando os dados coletados no período de 1987 a 1991. A aplicação do modelo envolveu a calibragem dos parâmetros e a verificação da natureza de suas variações entre os eventos. Os principais parâmetros foram avaliados em termos das suas variações com alguns índices de umidade.

A aplicabilidade do modelo como um instrumento de quantificação da produção de escoamento superficial e a erosão foi verificada utilizando os parâmetros calibrados numa das microbacias desmatadas, em outra localizada próxima à calibrada, que também era desmatada. Os resultados mostram que enquanto o modelo é bastante satisfatório para a aplicação na região semi-árida, a variação dos parâmetros do modelo precisa ser melhor compreendida.

ABSTRACT

This study is an evaluation of the application of the model WESP (Watershed Erosion Simulation Program) - a distributed, event oriented, physically based model for simulating the surface runoff and erosion. The model was applied to bare plots and microbasins of the Experimental Basin of Sumé, using the data collected during the period of 1987 - 1991. The application of this model involved calibration of the parameters and the verification of the nature their variation between the events. The main parameters were evaluated in terms of their variations associated with a moisture index.

The application of the model as an instrument of quantification of the production of overland flow and erosion was verified using the calibrated parameters of a bare microbasin and applied to another located nearby. The results show that while the model is quite satisfactory of application in a semi arid area the variation of the parameters of the model need to be better understood.

1 - INTRODUÇÃO

As diversas atividades humanas têm provocado impactos ao meio ambiente, podendo modificar consideravelmente os regimes hidrológicos das bacias hidrográficas. As diversas formas de práticas agrícolas, a urbanização acelerada e o desmatamento irracional têm causado mudanças significativas nos processos de escoamento superficial e erosão do solo nas bacias.

Uma compreensão dos processos de erosão e do escoamento superficial produzidos nas bacias hidrográficas é necessária para controlar e desenvolver adequadamente suas condições ambientais.

A região Nordeste apresenta diversos problemas devido à escassez de recursos hídricos, principalmente nas áreas semi-áridas, onde a disponibilidade de solos férteis e água afetam diretamente o desenvolvimento da região. Por isso a importância da racionalização desses recursos aumenta na proporção em que eles se apresentam escassos.

Um controle adequado dos recursos hídricos nas regiões semi-áridas envolve duas questões básicas: a necessidade de garantir o armazenamento de água em reservatórios através do barramento do escoamento superficial e a diminuição de perdas de solo pela erosão provocada por esse escoamento.

Com o objetivo de desenvolver pesquisas que determinem a influência do desmatamento e práticas agrícolas sobre os processos de erosão do solo e escoamento superficial em regiões semi-áridas do Nordeste, foram instaladas duas bacias experimentais na década de 80, pela SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste) em cooperação com o ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour Le Développement en Coopération). Uma delas foi a Bacia Experimental de Sumé, no semi-árido paraibano, cuja operação, bem como a coleta de dados e manutenção, foi desenvolvida em parceria com o campus II da Universidade Federal da Paraíba, em Campina Grande.

A necessidade do desenvolvimento de modelos específicos para as bacias hidrográficas que considerem as características peculiares aos processos hidrológicos do semi-árido nordestino foi enfatizada por Cadier et al., (1987). Entre os diversos tipos de modelos que estão disponíveis na literatura sobre o assunto e aqueles que possam ser desenvolvidos para condições específicas, os modelos fundamentais baseados nos processos físicos aparecem como os mais adequados na estimativa do escoamento superficial e erosão. Por este motivo, utilizou-se neste trabalho o modelo hidrosedimentológico WESP Watershed Erosion Simulation Program (Lopes, 1987) para previsão do escoamento superficial e da erosão do solo. O WESP é um modelo hidrodinâmico, distribuído e eventual. O modelo computacional simula a resposta hidrológica de pequenas bacias hidrográficas sob diferentes condições de manejo.

Galvão, (1990) e Santos, (1994) aplicaram o modelo WESP para previsão do escoamento superficial e da erosão em microbacias desmatadas da Bacia Experimental de Sumé. Afirmaram que a aplicação do modelo é promissora para área estudada e verificaram uma variação nos valores dos parâmetros do modelo, principalmente o da infiltração que ajusta o escoamento superficial (lâmina) calculado ao observado, e de erosão, quando o modelo foi calibrado a nível de cada evento. Assim, para que o modelo WESP seja útil como um instrumento de previsão de escoamento e a erosão, torna-se necessário uma melhor caracterização dos parâmetros para que seus valores para cada evento possam ser estabelecidos.

O presente trabalho foi desenvolvido com dois objetivos básicos. O primeiro foi verificar a natureza das variações dos parâmetros a serem calibrados no modelo, com outros fatores físicos que estão associados às condições de umidade do solo. O segundo objetivo é o de se utilizar o modelo, com os parâmetros considerados mais adequados para a microbacia experimental, em uma microbacia vizinha com as mesmas condições de cobertura vegetal, tipo de solo e sujeito à ação dos mesmos eventos pluviométricos. Com isto poder-se-á observar os resultados e verificar a adequação dos parâmetros utilizados. Isso possibilitará uma avaliação mais extensiva do modelo que já foi testado na Bacia Experimental de Sumé, como ferramenta potencial a ser utilizada em áreas hidrologicamente semelhantes à da bacia, e sem dados de medição de escoamento superficial (lâmina) e erosão.

2 - MODELAGEM DOS PROCESSOS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E EROSÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

2.1 - Considerações gerais

Os processos de geração de escoamento superficial e erosão nas bacias dependem de diversos fatores. Entre eles podemos destacar os hidrológicos, os hidrográficos, os da natureza e conservação do solo, etc.

Neste capítulo serão apresentadas as contribuições de outros autores na evolução científica dos processos físicos de escoamento superficial e erosão em bacias hidrográficas assim como da modelagem dos mesmos, os quais serviram como embasamento para o desenvolvimento desta pesquisa.

2.2 - Escoamento Superficial

O deslocamento de água na superfície da bacia, nos rios, canais e reservatórios é um dos processos mais importantes do ciclo hidrológico.

O escoamento é regido por leis físicas e representado quantitativamente por variáveis como vazão, profundidade do fluxo e velocidade. A natureza do escoamento é descrito pelas equações de conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento.

A equação baseada na conservação de massa do sistema é obtida pela avaliação das massas internas e externas que atuam no mesmo. Por exemplo, num trecho de rio, a vazão de montante, a contribuição lateral e a vazão de saída são as entradas e saídas que devem preservar a massa do sistema, considerado como um trecho do rio. A quantidade de movimento de um corpo é o vetor soma de todas as forças aplicadas a esse corpo num período "t". Segundo Abbott citado por Tucci (1993), é uma das infinitas descrições do estado de movimento do sistema de massas. Esta descrição é relacionada com um estado inicial de referência do sistema. Energia é definida como outra possível descrição

do estado de movimento, usualmente generalizado, na presença de um campo gravitacional, o que inclui o estado vertical de deslocamento, o qual pode ser considerado como o estado da capacidade de movimento do sistema (Tucci, 1993).

O escoamento com superfície livre pode ser permanente ou não-permanente. O escoamento em regime não-permanente considera a variação no tempo e no espaço das variáveis que retratam o mesmo. Esta situação ocorre na maioria dos problemas hidrológicos de escoamento superficial e de rios e canais. O escoamento superficial e, em rios e canais, é retratado por duas equações: conservação de massa e quantidade de movimento, denominadas também de equações de Saint Vénant, (Tucci, 1993).

2.3 - Erosão-Sedimentação

A erosão e a sedimentação pela água incluem processos de desprendimento, transporte e deposição, pelos agentes erosivos, e de transporte através do impacto das gotas de chuva e escoamento sobre a superfície do solo (ASCE, 1975), ou seja, a erosão é o desgaste excessivo do solo, a sedimentação é a deposição dos sedimentos. Desprendimento é a desagregação das partículas individuais da massa do solo por agentes erosivos e o transporte é a suspensão e o movimento do sedimento de sua posição original. Os sedimentos deslocam-se de fontes de planos, através do fluxo e podem eventualmente alcançar o oceano (Holeman, 1968). Nem todos os sedimentos alcançam o oceano; alguns deles são depositados na base de declives, em reservatórios, e em planícies alagadas ao longo do caminho (ASCE, 1975). Este processo é a sedimentação, que é a deposição de partículas quando as forças gravitacionais dominam as forças que causam o transporte (MacCuen, 1989). Alguns sedimentos são depositados apenas temporariamente. Subseqüentes eventos de cheia, às vezes vários anos mais tarde, podem remover o sedimento e transportá-lo para mais adiante, através do sistema de corrente (Trimble, 1975). Portanto, o sedimento é o subproduto da erosão e pode ser transportada pela água. Por isso, uma pedra pode ser tão bom sedimento quanto um grão de areia. O termo é usualmente aplicado para material desagregado que foi transportado e depositado pela água, mas é usado, algumas vezes, para indicar depósitos resultantes do vento, gelo e outras forças.

Erosão pela água pode ser classificada dentro de dois tipos gerais: erosão em planos e erosão em canais. A erosão nos planos é o desprendimento do material da superfície do terreno por meio do impacto das gotas de chuva e sua subsequente remoção por uma lâmina do fluxo ou pelo escoamento superficial. A erosão por canal é a remoção e o transporte de material no leito do canal por escoamento concentrado.

2.3.1 - Origens do Sedimento e Tipos de Erosão

As origens do sedimento incluem terras artificiais, tais como terras para agricultura, canteiros de obras, aterros nas estradas, canais e valas, bem como terras naturais. Os tipos dominantes de erosão são: camadas, riachos, valas, canais de escoamento ou erosão por deslizamento de terra (Hutchinson et al, 1976). Erosão por camadas podem ser idealizadas como a remoção, por qualquer processo, de uma camada de sedimento de espessura uniforme sobre uma área inteira. Erosão por riachos é o desenvolvimento de numerosos pequenos canais que possuem vários milímetros de largura e profundidade. Os fluxos de um grande número de riachos concentram-se em valas e canais de terras planas. Quando os riachos não podem ser destruídos por práticas normais de cultivos de agricultura, eles são chamados de valas, que são características topográficas razoavelmente permanentes. A erosão por escoamento em canal ocorre através de fluxo de corrente e a erosão por deslizamento de terra é provocada pelo movimento do solo. Sedimentos típicos penetram inclusive na base dos declives côncavos, faixas estreitas de vegetação, planícies alagadas e áreas de reservatórios de água, onde a deposição ocorre devido à capacidade de transporte de fluxo ser reduzida abaixo de sua carga de sedimento (Foster, 1982).

2.3.2 - Erosão na Superfície

A erosão na superfície é o desprendimento do material da superfície do terreno e sua subsequente remoção para outros locais através de um canal preferencial ou escoamento superficial. A erosão na superfície por meio da água em uma superfície de solo exposta ou parcialmente exposta, tal como uma área recentemente trabalhada,

ocorre em três formas ou estágios (erosão por camada, riachos e em valas), como descrito anteriormente.

Desprendimento, transporte e deposição são processos básicos que ocorrem em áreas de planos: o primeiro é um processo pelo qual sedimentos são desagregados. O desprendimento ocorre quando as forças erosivas do impacto das gotas de chuva ou escoamento de água excedem a resistência à erosão do solo. O transporte das partículas desprendidas ocorre pelo impacto das gotas de chuva, pelo deslocamento das mesmas ao longo do plano. A deposição ocorre quando a carga de sedimentos de um dado tipo de partícula excede sua capacidade de transporte correspondente, isto é, quando as forças gravitacionais dominam as forças que causam o transporte. Embora o escoamento por terra seja usualmente analisado como fluxo de camada larga, frequentemente se concentra em pequenos canais definidos. Qualquer erosão causada pelo fluxo nestes pequenos canais é uma erosão em riacho. Erosão em áreas entre riachos é uma erosão entre sulcos. Ambas são processos proporcionais de escoamento superficial, indicados pela erosão em planos (Foster, 1982).

Variáveis que devem ser consideradas como prognósticos da erosão em planos são as propriedades do solo, clima, vegetação, topografia e influências humanas. Foster (1982) forneceu os principais fatores que afetam os processos de erosão em planaltos, tais como: hidrologia, topografia, erodibilidade do solo, transportabilidade do solo, cobertura, resíduos incorporados, uso de terra residual, efeitos da superfície, agricultura, aspereza e marcas de lavoura.

O processo de erosão sobre declives é conceitualizado pelo Water Erosion Prediction Project (WEPP) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), ocorrendo em riachos e entre sulcos, com parâmetros de erodibilidade caracterizando os processos de desprendimento em riachos e entre sulcos. As equações matemáticas que representam os processos fundamentais de desprendimento e transporte de sedimentos em áreas entre sulcos, o desprendimento de partículas, transporte de sedimentos e deposição em áreas de fluxo dos riachos foram introduzidas. A natureza física dos parâmetros usados nas equações de erosão e suas implicações sobre as previsões de erosão estão resumidas por Lopes et al, (1989).

2.3.3 - Erosão no Canal

Erosão no canal é a remoção e transporte de material por meio de fluxo concentrado e depende da energia exercida pelas forças de seu fluxo concentrado de água. A taxa de erosão por canal depende das características hidráulicas do fluxo e da erodibilidade inerente aos materiais do canal. Foster (1982) apresentou os principais fatores que afetam os processos num canal: erodibilidade do solo, transportabilidade do solo, lavoura, camada não erodível, cobertura, controle do canal, estabilidade da parede do canal e alinhamento do canal.

2.4 - Definição e Classificação dos Modelos

Modelos hidrológicos oferecem condições de transferir conhecimentos de medidas ou áreas conhecidas para outros locais onde não se disponha desses conhecimentos, mas que sejam necessários para o gerenciamento ou tomadas de decisões (Góes, 1993).

Segundo Fleming, citado por Galvão (1990) os modelos matemáticos de simulação hidrológica podem ser classificados em duas vertentes: modelos determinísticos e estocásticos. Os primeiros na sua maioria tentam representar as leis que regem a física dos processos. Os segundos incorporam conceitos probabilísticos e as variáveis hidrológicas são consideradas aleatórias.

2.4.1 - Modelo Chuva-Vazão

2.4.1.1- Modelos Fundamentais

Os modelos baseados nos processos físicos e do tipo distribuído são mais úteis quando os dados de fluxo para a calibração não estão disponíveis, por exemplo, se a bacia a ser modelada está descalibrada ou se o efeito de uma mudança hipotética no uso da terra está para ser investigado. Valores de parâmetros destes modelos podem ser determinados em laboratórios ou por observações no campo (Morris, 1981).

O auxílio dos computadores e as avançadas técnicas de sensoriamento remoto têm contribuído significativamente para o desenvolvimento deste tipo de modelagem, devido às facilidades encontradas para uma maior rapidez no processamento dos dados e na estimativa inicial dos parâmetros físicos envolvidos. Como exemplo deste tipo de modelagem tem-se o Sistema Hidrológico Europeu (SHE), desenvolvido por um grupo de países europeus. É um modelo de base física, distribuído e sua finalidade é auxiliar nas tomadas de decisões das questões de avaliação de impacto hidrológico por mudanças no meio ambiente (Galvão, 1990).

2.4.1.2- Modelos Conceituais

Os modelos precipitação-vazão mais difundidos e utilizados são os conceituais determinísticos, pela facilidade de construção e porque podem incorporar conceitos ligados diretamente aos processos físicos. Segundo Morris (1981), os modelos conceituais, usualmente irão produzir boas previsões do fluxo para uma determinada bacia, mas eles não são necessariamente bons modelos para os processos físicos envolvidos.

Segundo Galvão (1990), entre os modelos conceituais mais utilizados estão o SSARR, do US Army Corps of Engineers, o Stanford Watershed Model, da Universidade de Stanford, o de Boughton, da Austrália, o Mero, de Israel, o Institute of Hydrology Model, da Grã Bretanha, entre outros. No Brasil são bastante utilizados o SMAP (Lopes et al., 1981), o IPH II (Tucci et al., 1987) e o MODHAC (Lanna e Schwarzbach, 1989).

2.5 - Modelos de Produção de Sedimentos

Para modelagem de erosão do solo é necessário descrever matematicamente os processos físicos de desprendimento de partículas do solo, transporte e deposição na superfície do terreno. São três as razões para modelagem da erosão (Lopes et al., 1994):

- a) Modelos de erosão podem ser usados como ferramentas para previsão e avaliação das perdas do solo, cuja informação é indispensável para um adequado uso e conservação do solo;
- b) Modelos matemáticos com base física podem prever onde e quando e sob que condições ocorrerá erosão, ajudando, deste modo, ao planejamento do uso do solo para fins de conservação, e conseqüentemente, reduzir a erosão;
- c) Modelos podem ser usados como ferramentas para compreensão dos processos de erosão e suas influências, direcionando as pesquisas prioritárias. São basicamente três tipos de modelos utilizados para previsão de erosão: empírico, conceitual e fundamental ou de base física.

Os modelos de sedimentação-erosão são amplamente classificados dentro de dois grupos: regressões empíricas baseadas na grande quantidade de dados observados, tais como a Equação Universal de Perdas de Solo e os modelos fundamentais que podem ser chamados de modelos físicos (Lopes et al., 1994).

2.5.1 - Modelos Empíricos

A Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) foi originalmente desenvolvida como um instrumento para conservação do solo por utilizar, no seu desenvolvimento, projetos de controle de cultivo de terra para controlar a erosão e manter a produtividade do solo e é, provavelmente, a equação de erosão mais amplamente utilizada. Mais recentemente, tem sido utilizada para estimar os sedimentos produzidos para projetos de pequenos reservatórios de água. À medida que a conscientização dos problemas de qualidade de água tem crescido, ela tem sido grandemente usada para estimar os sedimentos produzidos. A Equação Universal de Perdas de Solo é baseada em um grande conjunto de 10000 parcelas-ano de dados de escoamento natural e o equivalente a 1000 parcelas-ano de dados de campo sobre simuladores de chuva (Foster, 1982).

A equação de perdas de solo exprime a ação dos principais fatores que influenciam a erosão pela chuva e é expressa por:

$$A = R.K.L.S.C.P.....(2.1)$$

onde

A é a perda de solo por unidade de área,

R é a erosividade da chuva, sendo o produto da energia cinética da chuva e a maior intensidade da chuva no intervalo de 30 min

K é o fator de erodibilidade do solo,

L é o comprimento do declive,

S é a declividade em %,

C é o fator de cobertura ou controle e

P é o fator prática conservacionista.

Apesar disso, três principais limitações da USLE restringem sua aplicação em muitas análises de modelagem. Primeiro, ela não é destinada à estimativa da perda de solo por eventos isolados de pequenas cheias. Segundo, ela é uma equação de erosão e, conseqüentemente, não estima a deposição (Wischmeier, 1976). Terceiro, ela não estima erosão por vala ou canal. A USLE é destinada a estimar a média da perda de solo sobre um período prolongado, por exemplo, a perda anual média de solo (Foster, 1982)

Outras limitações à aplicação da USLE se devem a grande quantidade de informações requeridas para seu uso, um problema sério nos países subdesenvolvidos, conforme Lopes (1980); não estima perdas de solo de eventos isolados, não considera deposição nem erosão em ravinas ou em cursos d'água (Foster 1982). Em zonas semi-áridas, com chuvas irregulares, pouco numerosas mas intensas, o uso da equação exige bastante critério (Leprun, 1981).

O sedimento produzido é, algumas vezes, estimado pela avaliação de modo geral da erosão grosseira, com a USLE e, então, multiplicada por uma distribuição de proporção para obter o sedimento produzido (ASCE, 1975). Para pequenas bacias hidrográficas, especialmente no campo, este método é freqüentemente inadequado e pode levar a conclusões totalmente falsas. Portanto, ele deve ser usado somente como uma primeira aproximação (Foster, 1982).

Leprun (1981 e 1983) e Bertoni & Lombardi Neto (1985) fazem uma boa análise da USLE e seus parâmetros e também comentam os principais esforços de pesquisa sobre perdas de solo no Brasil e no Nordeste. Bertoni & Lombardi Neto (1985) apresentam exemplos de aplicação da equação universal de perdas de solo.

A USLE não leva em conta a deposição dos sedimentos. Neste caso, a produção de sedimentos depende muito das características de escoamento superficial, já que o fluxo controla a capacidade de transporte dos sedimentos (Foster, 1982).

Williams, citado por Foster (1982), modificou a USLE para estimar a produção de sedimentos de eventos individuais, propondo um novo fator de erosividade R de chuvas, aplicável para cada evento. A USLE usada com este fator é chamada de USLE modificada, ou MUSLE (Modified USLE). Este novo fator R é dado por:

$$R_w = 9,05.(V.Q_p)^{0,56} \quad (2.2)$$

onde

V é o volume de afastamento (m³) e

Q_p é a taxa de descarga de pico (m³/s)

Embora a MUSLE assuma que a deposição ocorra na bacia hidrográfica, ela somente fornece uma estimativa do total de sedimentos produzido e não uma estimativa da produção de classes individuais de partículas.

2.5.2 - Modelos Fundamentais

A importância dos princípios fundamentais no processo de erosão foi reconhecida próximo dos anos 30 (Cook, 1936). Nos anos 40, Ellison (1947) apresentou uma análise extensiva de vários subprocessos de erosão, que foi uma base importante para modelagens mais recentes de erosão. Meyer e Wischmeier (1969) formularam os conceitos de Ellison e outros mais recentes em um modelo. Eles e Negev (1967), que adicionaram um componente de erosão ao modelo da bacia hidrográfica de Stanford, demonstraram o potencial de tais modelos para o entendimento e a estimativa do comportamento da erosão do solo (Foster, 1982).

Os modelos fundamentais são baseados em conceitos e teorias sobre a dinâmica do processo de erosão e fornece maiores informações sobre a variabilidade da erosão e da carga de sedimentos transportada, no espaço e no tempo, durante um evento, em relação a outros tipos de modelos. São várias as vantagens que os modelos fundamentais

exercem sobre as equações empíricas. Algumas dessas vantagens foram destacadas por Foster (1982):

- i) Eles são baseados nos processos físicos e, conseqüentemente, podem ser mais precisamente extrapolados para outras situações de erosão e transporte de sedimentos,
- ii) Representam os processos com maior fidelidade, por exemplo, erosões de riachos e entre sulcos são consideradas separadamente, ao invés de serem como um todo,
- iii) São mais precisos para eventos de pequenas cheias,
- iv) Podem considerar áreas mais complexas,
- v) Consideram diretamente os processos de deposição,
- vi) Consideram a erosão e deposição no canal.

Por outro lado, seu uso fica restrito a condições que permitam o controle da maioria das variáveis (Lopes, 1980). Em geral, necessitam de calibrações de parâmetros com dados observados (Foster, 1982), o que limita muito o seu uso em regiões com ausência de medições de taxas de erosão (Fleming e Al Kadhimi, 1982). Entretanto, Foster (1982) considera esses modelos como uma importante ferramenta, à medida que tanto as pesquisas teóricas como as redes coletoras de dados forem expandidas, propiciando um melhor fornecimento dos valores desses parâmetros para regiões diferentes.

Outros modelos fundamentais para os processos de erosão e de transporte de sedimentos têm sido apresentados na literatura.

Um modelo adaptável para pequenas bacias é o de Smith (1977), baseado em relações fundamentais de erosão e transporte de sedimentos e a propagação é feita através de um modelo de onda cinemática. Este calcula a erosão e produção de sedimentos no espaço e no tempo, mas necessita de calibração com dados observados, Foster (1982).

O CSU desenvolvido por Li, citado por Foster (1982), usa um sistema de canais e planos para representar a bacia, calcula a erosão e o transporte de sedimentos separadamente para o fluxo superficial e nos canais e propaga o fluxo através de um modelo de onda cinemática. O modelo pode representar grandes e pequenas áreas,

devendo ter calibrado alguns dos seus parâmetros. O modelo, em geral, produz distorções, caso a representação da bacia não seja adequada.

O KINEROS desenvolvido por Smith, citado por Lopes (1987) incorporou ao modelo hidrológico de Rovey et al., (1977) componentes de erosão, transporte e deposição. É um modelo distribuído, em que a bacia é representada por planos, canais e elementos de armazenamento. Utiliza a equação da continuidade de transporte de sedimentos de Bennett (1974) e calcula o desprendimento das partículas pelo impacto das gotas de chuva através da equação Meyer e Wischmeier (1969).

O componente hidráulico do KINEROS foi utilizado no modelo hidrosedimentológico WESP (Watershed Erosion Simulation Program), desenvolvido por Lopes (1987), no âmbito do Projeto WEPP (Water Erosion Prediction Project), elaborado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Os processos de erosão-deposição, considerados não permanentes e variados, são descritos dinamicamente, utilizando taxas de erosão e deposição simultaneamente, ao invés da abordagem convencional onde são utilizadas funções de transporte de sedimentos para fluxo permanente.

O CHDM (Catchment Hydrology Distributed Model), desenvolvido por Lopes et al., (1995), é um modelo hidrosedimentológico que discretiza a bacia hidrográfica em elementos de planos e canais como no caso do WESP, mas utiliza as equações de transporte de sedimentos de: Meyer e Wischmeier (1969), Yang (1973), Bagnold's relationship (Kilinc e Richardson, 1973), Ackers e White (1973), Yalin (1963), Engelund e Hansen (1967), como alternativas para estimar a taxa de transporte sólido.

2.6 - Relação entre um Modelo de Erosão com um Modelo Hidrológico

Modelos hidrológicos podem ser formulações matemáticas para simular os fenômenos hidrológicos naturais que são considerados como processos. Soluções de forma analítica aproximada para erosão têm sido obtidas para condições especiais de cada estado estacionário ou declive uniforme e taxa uniforme de excesso de precipitação pluviométrica.

Nenhum modelo disponível na bibliografia ainda é capaz de uma representação real da bacia hidrográfica. Vários sistemas têm sido usados para representar a bacia hidrográfica. Alguns conceitos aproximados como o de corrente de tubo (Onstad e Foster, 1975), de um sistema de planos e canais (Curtis, 1976), de um sistema de superfícies convergentes, planos e canais (Smith, 1977), e de uma rede uniforme (Beasley, 1977). Cada um deles possui suas próprias vantagens; nenhuma em particular é melhor para todas as situações.

Kibler e Woolhiser (1970) desenvolveram uma solução cinemática para uma cascata de planos como é mostrado na figura 2.1, na qual a cascata de planos n recebe afluência lateral r e descarrega em um segmento de canal. Neste caso a geometria da bacia hidrográfica é representada por uma configuração simplificada, que consiste de sequências de discretos planos de fluxo e segmentos de canal.

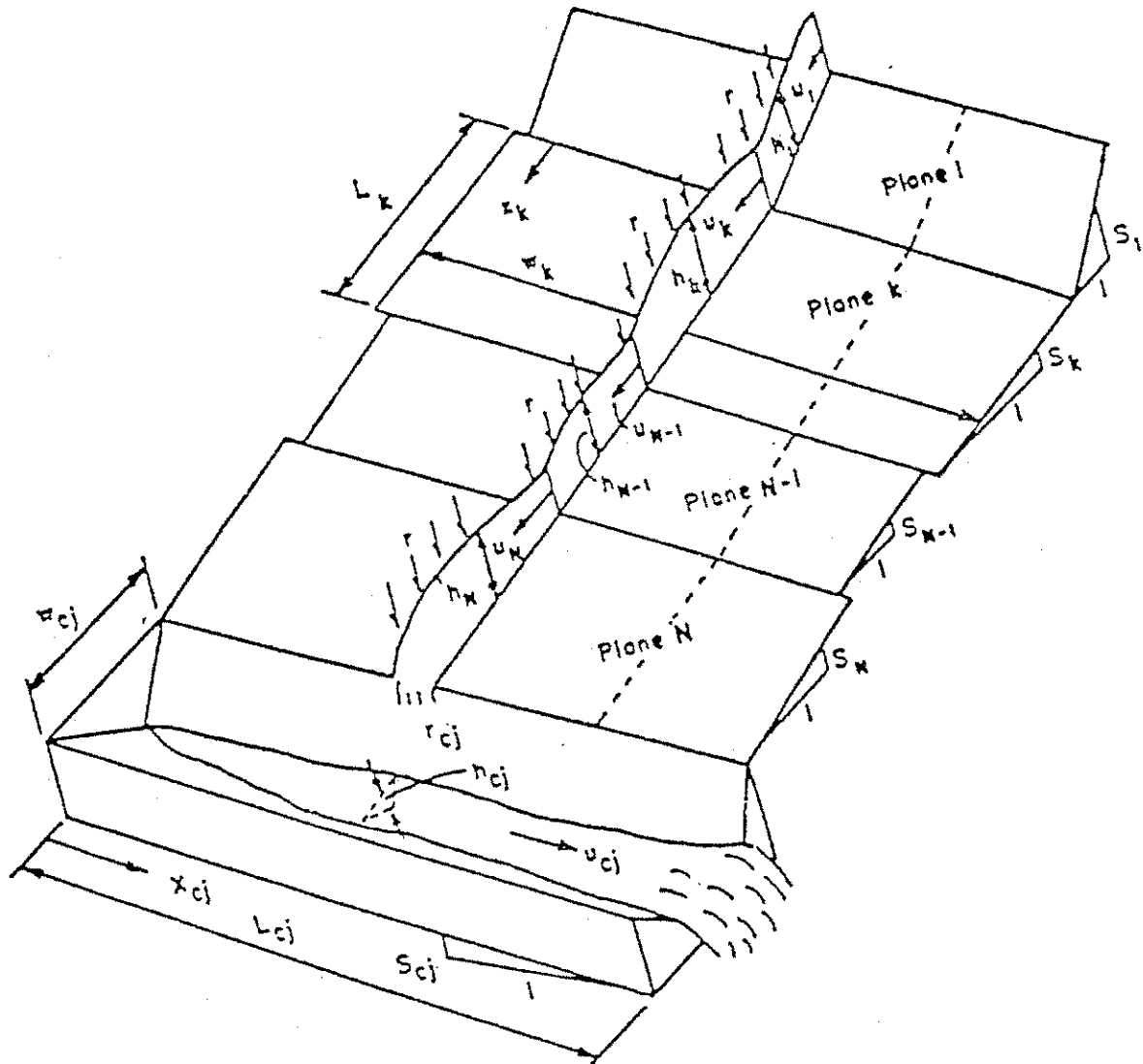


Figura 2.1 - Cascata de n planos recebendo escoamento lateral e descarregando no j -ésimo elemento de canal (Kibler e Woolhiser, 1970)

3 - TRABALHOS ANTERIORES REALIZADOS NA BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ

3.1- Generalidades

Com o objetivo de quantificar a influência do desmatamento da vegetação natural e de várias práticas de manejo de culturas nos escoamentos e na degradação dos solos na Bacia Experimental de Sumé, vários trabalhos foram desenvolvidos visando cada vez mais intensificar o conhecimento sobre o comportamento dos fatores que regem os processos de escoamento e da erosão do solo.

Este capítulo apresenta resumidamente os principais trabalhos realizados na Bacia Experimental de Sumé, desde a sua instalação em 1981. A evolução destes trabalhos ocorreu ao longo dos anos, de acordo com a disponibilidade de equipamentos e de um maior número de dados. São apresentados os trabalhos que destacam, entre os vários objetivos, a aplicação do modelo hidrosedimentológico WESP.

3.2 - Trabalhos Desenvolvidos na Bacia Experimental de Sumé

Cadier et al., (1983) iniciaram os trabalhos no local com as primeiras instalações da Bacia Experimental. Verificaram a influência que a declividade e a cobertura vegetal causam no escoamento e na erosão, através da análise dos dados obtidos no primeiro ano de coleta de dados.

Gomes et al., (1987) e Srinivasan et al., (1988) em seus estudos na região semi-árida paraibana, deram prosseguimento ao trabalho de Cadier et al. (1983), apresentaram novos dados, na análise dos quais observaram a influência do índice de umidade (IH) no escoamento e na erosão. Os dados utilizados foram do período de 1982 a 1986. O índice de umidade representado pela equação de Kohler:

$$IH_i = K(IH_{i-1} + P_{i-1})$$

onde

IH é o índice de umidade,

i compreende ao dia do evento,

$i-1$ corresponde ao dia anterior ao evento.

P_{i-1} é a precipitação em mm do dia anterior e

K é um fator de redução, adotado como 0,95 neste trabalho.

Eles verificaram também a grande influência causada pela vegetação e a relação existente entre a produção de sedimentos e a erosividade. Para o escoamento superficial, o índice de umidade permitiu estabelecer tendências entre a precipitação e o escoamento, conforme a figura 3.1. No caso da erosão, o índice de erosividade EI_{50} da Equação Universal de Perda de Solos foi o que permitiu uma melhor representação de tendências, como mostra a figura 3.2.

Molinier, Galvão e Gomes (1987) transferiram resultados obtidos em parcelas experimentais, para a escala de bacias de interesse nos projetos de aproveitamento hídrico, utilizando dados obtidos na Bacia Experimental de Sumé. Foram apresentados métodos de transferência das relações para o escoamento superficial, das microparcels de 1 m^2 , operadas sob chuva simulada, para parcelas de 100 m^2 , microbacias de 1 ha e uma bacia de 10 km^2 .

Molinier, Audry e Leprun (1989) estudaram o perfil do solo da Bacia Experimental de Sumé, preocupando-se com o desenvolvimento e comportamento da infiltração, que afeta o escoamento superficial e conseqüentemente o armazenamento de água a ser utilizada nos períodos de estiagem.

Galvão (1990) utilizou dois modelos em quatro microbacias com áreas que variam entre (0,5 a 1,0 ha), desmatadas ou com vegetação nativa, localizadas na Bacia Experimental de Sumé. O primeiro modelo foi o MODIBI do tipo conceitual global, diário de chuva-vazão. O segundo foi o modelo WESP (Watershed Erosion Simulation Program), um modelo fundamental baseado nos processos físicos de infiltração, escoamento superficial e erosão-deposição, simulando o escoamento superficial e erosão por evento. Os resultados indicaram ajustes satisfatórios aos dados observados. Na calibragem do modelo WESP para uma série de eventos, observou-se uma grande variação no parâmetro de infiltração que ajusta a lâmina calculada à observada, e uma razoável dispersão dos parâmetros de erosão nos planos e canais. Os dois modelos foram considerados promissores para estudos em microbacias.

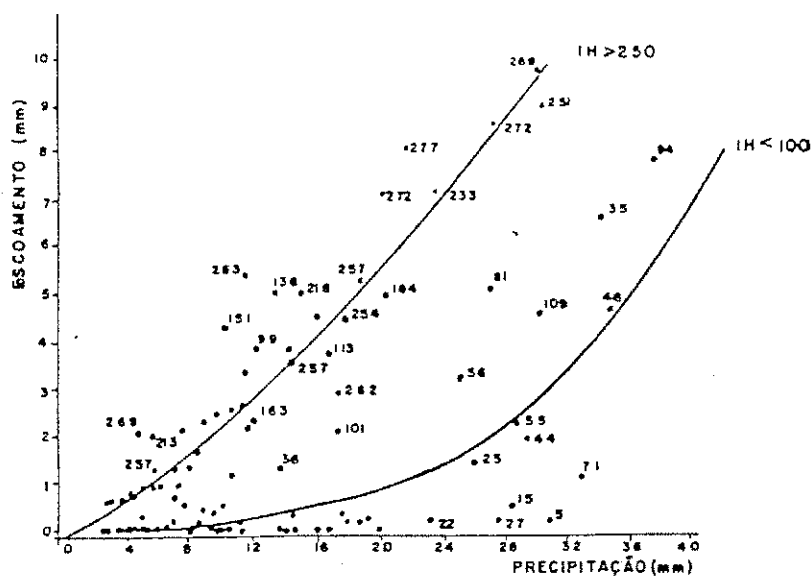


Figura 3.1 - Relação precipitação - escoamento para microbacia 3 tendo o índice de precipitação antecedente IH como parâmetro (Gomes et al., 1987)

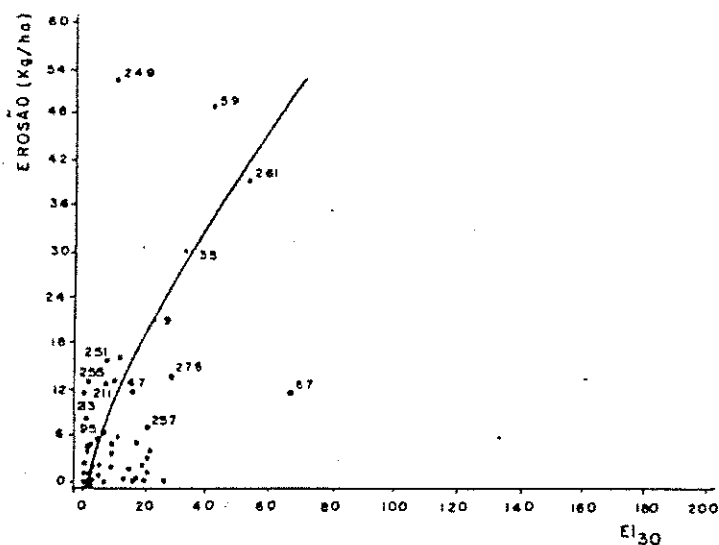


Figura 3.2 - Relação erosão - erosividade EI₃₀ para microbacia 3 tendo o índice de precipitação antecedente IH como parâmetro (Gomes et al., 1987)

Montenegro et al., (1991) analisou a repartição em escoamento superficial e infiltração da água precipitada por um minissimulador de chuva. Os trabalhos foram realizados em uma micro-parcela de 1 m² localizada na Bacia Experimental de Sumé. Verificou-se o papel da estratificação do solo sobre esta repartição. A análise baseia-se em resultados experimentais do acompanhamento da dinâmica da água no solo através de medições tensiométricas e com sondas de neutrons.

Góes (1993) utilizou dois modelos determinísticos de previsão do escoamento e da erosão em nove parcelas experimentais de 100 m² da Bacia Experimental de Sumé. O primeiro modelo aplicado foi o de regressão linear múltipla que se mostrou sensível às variáveis, visto que pode refletir o comportamento dos fenômenos a partir delas, especialmente para o escoamento. O segundo, o WESP, foi aplicado a uma das parcelas e forneceu resultados coerentes para a maioria dos eventos testados, com amplas possibilidades de aplicações. Os valores encontrados por ela para a lâmina escoada e erosão foram relativamente próximos daqueles medidos no campo.

Santos et al., (1995) determinou uma relação entre o parâmetro de infiltração que afeta diretamente os valores de escoamento superficial (lâmina) calculados, com o número de dias sem chuva anterior ao evento, como mostra a figura 3.3. Utilizou um método normalizado de POWELL (Standardized Powell Method), que forneceu, pela otimização, valores de parâmetros bastante realistas para o modelo WESP. O método pode ser considerado útil na avaliação dos parâmetros do modelo na região onde não existem meios para estimar a faixa de variabilidade dos parâmetros. O método também pode ser considerado útil para determinação da forma mais adequada de discretização da bacia quando os parâmetros são considerados de forma global. É importante frisar que, no caso de modelos hidrodinâmicos, os valores de parâmetros obtidos pela otimização devem ser avaliados em termo de adequação dos mesmos. Dados de erosão e produção de sedimentos estão sujeitos às grandes variações nos processos de amostragem e medição que podem resultar em valores não realistas dos parâmetros. A utilização de dados pouco representativos também pode resultar em valores incorretos.

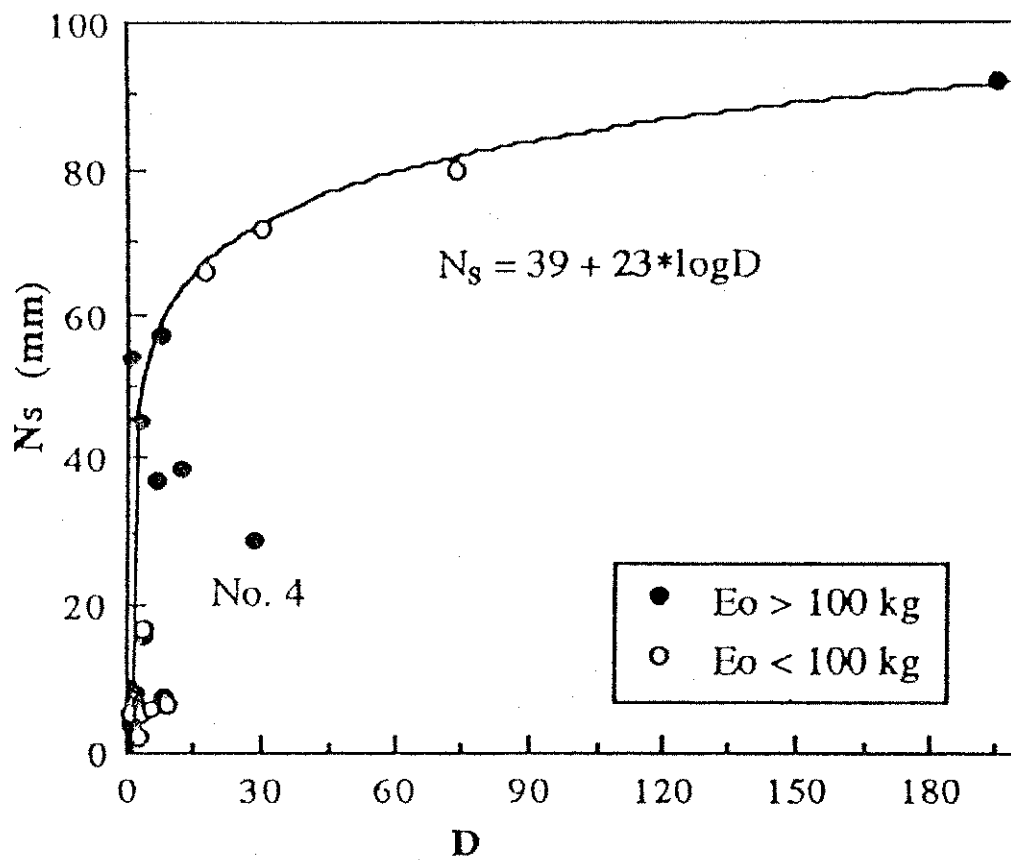


Figura 3.3 - Relação entre o parâmetro de infiltração N_s com o número de dias anteriores ao evento sem ocorrência de chuva D (Santos, 1994).

3.3 - Considerações Finais

O modelo WESP, (Watershed Erosion Simulation Program), elaborado por Lopes (1987), e desenvolvido para simular a resposta hidrológica (hidrograma e sedigrama) de pequenas bacias hidrográficas sob diferentes condições de manejo do solo (Lopes e Lane, 1987), mostrou-se aplicável em pequenas bacias de regiões semi-árida (Arizona, EUA). Este modelo foi também aplicado à Bacia Experimental de Sumé, através dos trabalhos de Galvão (1990), Góes (1993) e Santos (1994), quando foi considerado promissora a sua utilização na bacia.

Com base nas considerações anteriores, procurou-se neste trabalho um aprofundamento dos conhecimentos de processos de escoamento superficial e erosão na Bacia Experimental de Sumé. Nesta direção, pretende-se avaliar melhor a aplicação do modelo WESP para bacias do semi-árido com condições semelhantes, bem como caracterizar a natureza dos parâmetros do modelo.

4 - MODELO WESP

4.1 - Considerações Gerais

O modelo computacional WESP (Watershed Erosion Simulation Program), desenvolvido por Lopes (1987), foi elaborado com duas propostas bem específicas: modelar e simular o sistema erosão-deposição para o escoamento unidimensional e ser um instrumento de comparação para avaliação de modelos simplificados, desenvolvidos para aplicação prática. Pode ser usado para geração de dados sintéticos, preenchimento de falhas e previsão da resposta das bacias a vários tipos de manejo. A concepção estrutural e as equações básicas do modelo WESP resultam da tentativa de desenvolvimento de um modelo matemático, cujos componentes possam simular os processos naturais. Tais modelos são denominados hidrodinâmicos ou fundamentais e oferecem duas vantagens principais com relação aos modelos mais tradicionais do tipo empírico e conceitual: 1) oferecem uma possibilidade real de sucesso quando aplicados a uma ampla faixa de condições e localidades, 2) ajudam na compreensão dos processos físicos, e, portanto, possibilitam uma ponte entre teoria e aplicação na análise hidrológica, (Lopes, 1987).

O modelo WESP tem como base principal os seguintes componentes: infiltração, escoamento superficial e a mecânica dos processos de erosão e deposição. O modelo utiliza as equações da continuidade e quantidade de movimento para descrever o movimento da água e sedimentos nas bacias hidrográficas. Ele usa parâmetros distribuídos e produz simulações por evento. Foi estruturalmente desenvolvido para acomodar as mudanças espaciais em topografia, rugosidade superficial, propriedades dos solos, geometria e padrões do escoamento superficial e condições do uso da terra, (Lopes, 1987). Tal modelo considera a bacia como sendo composta de planos e canais.

A equação de infiltração de Green e Ampt (Mein e Larson, 1973) com o cálculo do tempo de empoçamento para uma chuva não permanente (Chu, 1978) é usada para calcular o excesso de precipitação. As equações da onda cinemática são usadas para descrever o escoamento superficial unidimensional não permanente e variado nos planos

e nos canais. Os processos de erosão e deposição nas encostas da bacia e nos canais são descritos dinamicamente, utilizando equações para taxas de desprendimento e deposição simultânea ao invés do procedimento convencional que usa as funções de transporte de sedimentos com escoamento permanente e uniforme (Lopes, 1987).

Na aplicação do modelo, a bacia hidrográfica é representada por uma geometria simplificada de planos de escoamento e que descarregam em canais, como mostra a figura 2.1, (capítulo 2).

As equações de continuidade para o escoamento superficial e para o transporte de sedimentos são resolvidas numericamente usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos (Rovey et al., 1977; Lopes, 1987).

4.2 - Equações Básicas do Modelo WESP

4.2.1 - Infiltração

Mein & Larson (1973) propuseram a equação de Green & Ampt (1911) para modelar a infiltração durante uma chuva permanente, apresentada a seguir:

$$f(t) = dF/dt = K_s \cdot (1 + N_s / F(t)) \quad (4.1)$$

onde

$f(t)$ é a taxa de infiltração (m/s),

K_s é a condutividade hidráulica saturada do solo (m/s),

$F(t)$ é a profundidade da frente de molhamento (m),

N_s é o potencial efetivo, ou potencial de capilaridade, associado à frente de molhamento (m), e

t é o tempo (s)

O potencial de capilaridade N_s pode ser calculado como:

$$N_s = (1 - S_e) \cdot p \cdot S \quad (4.2)$$

onde

S_e é a saturação efetiva relativa e varia entre 0 e 1; é dada por θ_i/θ_s , onde θ_i é a umidade inicial no solo e θ_s é a umidade na saturação,

p é a porosidade efetiva e varia entre 0 e 1,

S é a sucção média na frente de molhamento (m).

A equação de Green e Ampt adota algumas considerações: existe uma frente de molhamento distinta e precisamente definível; a sucção ou o potencial nesta frente permanece constante independente do tempo ou posição; o perfil de solo é homogêneo; e, a distribuição da umidade antecedente no solo é uniforme em todo o perfil (Lopes 1987).

Numa chuva permanente podem ocorrer duas fases distintas e consecutivas de comportamento da infiltração no solo. Na primeira, ainda não houve saturação do perfil e a infiltração ocorre na taxa da intensidade de precipitação, se esta for menor que a capacidade de infiltração. Na segunda, o perfil está saturado, passa a ocorrer “empoçamento” e a taxa de infiltração é igual à capacidade de infiltração, independente da distribuição da precipitação. Numa chuva não permanente, esses estados podem se repetir várias vezes durante o evento. Tempo de empoçamento é o momento em que passa a ocorrer excesso de precipitação, ou seja, quando a intensidade de precipitação supera a taxa de infiltração.

Em 1978 Chu modificou a equação de Green e Ampt para descrever a infiltração durante uma chuva não permanente. No modelo WESP o tempo de empoçamento, como proposto por Chu (1978), é calculado através da seguinte equação:

$$t_p = t_{n-1} + (K_s \cdot N_s / (I - K_s) - P(t_{n-1}) + R(t_{n-1})) / I \quad (4.3)$$

onde

t_p é o tempo de empoçamento (h),

I é a intensidade de precipitação (mm/h),

P é a precipitação acumulada (mm),

R é o escoamento acumulado (mm) e

t_{n-1} é o tempo no início do intervalo considerado (h), e as outras variáveis são as mesmas já descritas.

4.2.2 - Escoamento Superficial

O escoamento superficial (considerado unidimensional não permanente e espacialmente variado) é o resultado da propagação (ao longo dos planos e canais da bacia) do excesso de precipitação utilizando a simplificação pelas equações da onda cinemática. A figura 4.1 mostra o comportamento dos processos de escoamento superficial e infiltração definidos pelo modelo WESP.

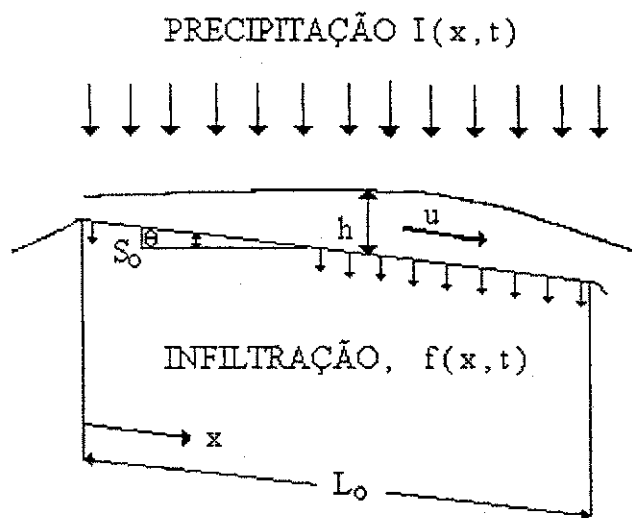


Figura 4.1 - Definição resumida do processo de escoamento superficial (Woolhiser & Liggett, 1967).

A modelagem deste componente foi baseada principalmente nos trabalhos de Woolhiser e Liggett (1967), Smith e Woolhiser (1971) e Rovey et al. (1977).

As equações da continuidade utilizadas para o fluxo superficial sobre os planos são:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot h)}{\partial x} = r \quad \text{Eq. (4.4)}$$

e a equação de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot (S_0 - S_f) - r \cdot (u/h) \quad \text{Eq. (4.5)}$$

onde

t é o tempo em (s),

x é a distância na direção do fluxo (m),

$h(x,t)$ é a profundidade do fluxo (m),

$u(x,t)$ é a velocidade média do fluxo (m/s),

$r(x,t)$ é a taxa de entrada de fluxo lateral por unidade de área (m/s),

g é a aceleração da gravidade (m/s^2)

S_0 é a declividade do plano, e

S_f é a declividade da linha de energia.

Algumas considerações foram feitas por Lopes (1987) à equação da quantidade de movimento até que se chegasse à forma apresentada anteriormente. Foram elas:

- a) a pressão adicional causada pela precipitação sobre o fluxo é desprezível,
- b) a componente da velocidade na direção perpendicular ao escoamento é nula,
- c) o seno do ângulo formado pelo plano e a horizontal é aproximadamente igual a sua declividade,
- d) o coeficiente de distribuição de velocidade é igual a 1, e
- e) o fluxo superficial é unidimensional.

Assume-se que a chuva é particionada pelas equações anteriores em infiltração e excesso de precipitação. Este excesso é então propagado como se a superfície fosse impermeável. Outra simplificação é que a infiltração é uniformemente distribuída sobre a superfície (Lopes, 1987).

Para o fluxo concentrado nos canais, as equações da continuidade e da quantidade de movimento são:

$$\partial A / \partial t + \partial (u \cdot A) / \partial x = q_A \quad (4.6)$$

$$\partial u / \partial t + u \cdot \partial u / \partial x + g \cdot \partial h / \partial x = g \cdot (S_0 - S_f) - q_A \cdot (u/A) \quad (4.7)$$

onde

$A(x,t)$ é a área da seção transversal do fluxo (m^2),

q_A é o fluxo de entrada lateral por unidade de comprimento do canal, e as outras variáveis são as mesmas já descritas. O fluxo de entrada à montante é considerado como uma condição de fronteira.

A aproximação da onda cinemática considera basicamente que a declividade da linha de energia é igual à do plano. Em outras palavras, os termos da gravidade e atrito são considerados preponderantes em relação aos outros na equação da quantidade de

movimento (Lopes, 1987). Com base nessa aproximação, a equação (4.7) pode ser escrita para o fluxo concentrado no canal como:

$$Q = \alpha \cdot A (R_H)^{m-1} \quad (4.8)$$

onde

Q é a vazão do fluxo,

α é um parâmetro relacionado à rugosidade superficial,

m é um parâmetro relacionado à geometria do canal

R_H é o raio hidráulico em (m),

e as outras variáveis são as mesmas já descritas.

A simplificação da equação de quantidade de movimento é

$$S_o = S_f \quad (4.9)$$

A equação (4.9) pode ser usada na descrição da equação paramétrica para velocidade local como:

$$u = \alpha \cdot h^{m-1} \quad (4.10)$$

Para os planos, considerando a fórmula de Manning para a velocidade, a equação (4.10) pode ser substituída na equação (4.4), obtendo-se a seguinte equação diferencial da equação da continuidade (Lopes, 1987).

$$\partial h / \partial t + \alpha \cdot m \cdot h^{m-1} \cdot \partial h / \partial x = r \quad (4.11)$$

onde as variáveis foram já definidas.

As condições iniciais e de fronteira são as seguintes:

$$h(0,t) = 0, \text{ para } t \geq 0, \text{ e} \quad (4.12)$$

$$h(x,0) = 0, \text{ para } x \geq 0. \quad (4.13)$$

A fórmula de Manning para o fluxo turbulento é

$$u = (1/n)(R_H)^{2/3}(S_f)^{1/2} \quad (4.14)$$

onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning

Para planos e canais largos $R_H = h$. Esta aproximação e a substituição da equação (4.9) na equação (4.14), resulta na equação (4.10) com $\alpha = (1/n) \cdot (S_0)^{1/2}$ e $m = 5/3$.

No caso de canais, a vazão $Q(x,t)$ pode ser expressa como uma função de $A(x,t)$, por isso a equação (4.6) pode ser reescrita como:

$$\partial A / \partial t + (\partial Q / \partial A) \cdot (\partial A / \partial x) = q_A \quad (4.15)$$

onde todas as variáveis já foram descritas e estão sujeitas às seguintes condições iniciais e de contorno:

$$Q(0,t) = Q_0(t), \text{ para } t \geq 0, \text{ e} \quad (4.16)$$

$$Q(x,0) = 0, \text{ para } x \geq 0. \quad (4.17)$$

onde

$Q_0(t)$ é a vazão de entrada à montante do trecho do canal.

Substituindo $R_H(x,t) = A(x,t)/WP(x,t)$, na equação (4.8), onde $WP(x,t)$ é o perímetro molhado em (m), teremos:

$$Q = \alpha \cdot A^m / (WP)^{m-1} \quad (4.18)$$

As equações são resolvidas utilizando um esquema de diferenças finitas não linear de segunda ordem, o qual foi proposto por Rovey et al., (1977). A expansão pela série de Taylor é usada na linearização das equações, baseada num esquema implícito de diferenças finitas a quatro pontos (Lopes, 1987). O intervalo de tempo máximo para os cálculos numéricos que assegura a estabilidade é dado pela relação (Rovey et al., 1977):

$$\Delta t < \Delta x / (\alpha \cdot m \cdot h^{m-1}) \quad (4.19)$$

onde

Δt e Δx são os incrementos no tempo e espaço utilizados no esquema e as outras variáveis são as mesmas já descritas.

4.2.3 - Componente Erosão-Deposição

Segundo Lopes (1987) o componente erosão-deposição do modelo calcula as taxas de deposição e desprendimento das partículas por impacto das gotas de chuva (nos planos) e por arrastamento (nos planos e nos canais). A propagação é realizada através da equação de continuidade de transporte de sedimentos. O desenvolvimento da modelagem deste componente é baseado nos trabalhos de Bennett (1974), Foster (1982), Croley (1982), Einstein (1968), Lane e Shirley (1985) e Mehta (1983). A resolução das equações é feita através de um esquema implícito de diferenças finitas.

Para os planos, o sistema é representado através de um volume de controle de fluxo sobre o plano, alimentado pela erosão e transporte, considerando as perdas pela deposição (Bennett, 1974; Foster, 1982). A propagação é feita através da equação de continuidade de transporte de sedimentos apresentada abaixo:

$$\partial(c.h)/\partial t + \partial(c.q)/\partial x = \phi \quad (4.20)$$

onde

$q(x,t)$ é a vazão de fluxo (m^3/s),

$c(x,t)$ é a concentração de sedimentos (kg/m^3),

$\phi(x,t)$ é a taxa de sedimento no fluxo ($kg/m^2/s$), e

as outras variáveis são as mesmas já descritas anteriormente.

O termo $\partial(c.q)/\partial x$ representa a variação da carga de sedimento com a distância e o termo $\partial(c.h)/\partial t$ é a taxa de armazenamento de sedimento com a profundidade do fluxo.

A erosão no plano pelo impacto das gotas de chuva (e_i) e pelo arrastamento pelo fluxo (e_r) menos a deposição (d) vão dar a taxa de sedimentos no fluxo, que é calculada pela expressão abaixo, em que todos os termos variam no tempo e no espaço e são expressos em $kg/m^2/s$:

$$\phi = e_r + e_i - d \quad (4.21)$$

A figura 4.2 define um esboço do processo erosão-deposição (Lopes, 1987).

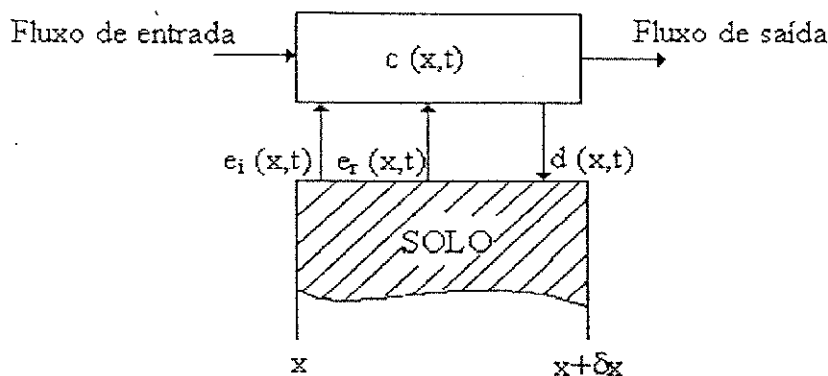


Figura 4.2 - Definição do processo de erosão-deposição nos declives (Lopes, 1987)

A erosão pelo arraste do solo pelo fluxo superficial (e_r) é considerada proporcional à tensão de cisalhamento média na superfície do solo, sendo obtida através da expressão:

$$e_r = K_r \tau^{1.5} \quad (4.22)$$

onde

K_r é um fator de erodibilidade do solo pelo fluxo superficial ($\text{kg.m/N}^{1.5}.\text{s}$) e $\tau(x,t)$ é a tensão de cisalhamento média “efetiva” (N/m^2).

A erosão pelo impacto das gotas de chuva (e_i) é obtida por:

$$e_i = K_i . i . r \quad (4.23)$$

K_i é um coeficiente de erodibilidade do solo por impacto da chuva (kg.s/m^4),

$i(t)$ é a intensidade de chuva (m/s), e

$r(x,t)$ é o excesso de precipitação (m/s).

A deposição é expressa por:

$$d = \varepsilon_p . V_s . C \quad (4.24)$$

onde

ε_p é um coeficiente de deposição que depende das propriedades do solo e do fluido (adimensional),

V_s é a velocidade de queda da partícula (m/s), e

$C(x,t)$ é a concentração de sedimentos em transporte (kg/m^3).

A velocidade de queda da partícula é calculada através da expressão de Rubey (Lopes, 1987):

$$V_s = F_o \cdot (((\gamma_s - \gamma) / \gamma) \cdot g \cdot d_s)^{1/2} \quad (4.25)$$

$$F_o = (2/3 + (36 \cdot \nu^2 / g \cdot (d_s)^3 \cdot ((\gamma_s / \gamma) - 1)))^{1/2} - (36 \cdot \nu^2 / g \cdot (d_s)^3 \cdot ((\gamma_s / \gamma) - 1))^{1/2} \quad (4.26)$$

onde

γ_s é o peso específico do sedimento (N/m^3),

γ é o peso específico da água (N/m^3),

ν é a viscosidade cinemática da água (m^2/s),

d_s é o tamanho representativo do sedimento (m) e

g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

As condições iniciais e de fronteira são as seguintes:

$$C(0,t) = K_i \cdot I(t) \cdot r(t) / (\epsilon_p \cdot V_s + r(t)), \text{ para } t \geq t_p \quad (4.27)$$

$$C(x, t_p) = K_i \cdot I(t) \cdot r(t_p) / (\epsilon_p \cdot V_s + r(t_p)), \text{ para } x \geq 0 \quad (4.28)$$

onde t_p é o tempo de empoçamento em (segundos).

Para os fluxos concentrados nos canais, o modelo não faz distinção entre a carga do leito e a carga em suspensão e as equações estimam a carga total. O fluxo de sedimentos é representado por funções que consideram simultaneamente o desprendimento, a deposição e a entrada lateral de sedimentos.

A equação da continuidade, considerando um fluxo unidimensional, é:

$$\partial(A \cdot C) / \partial t + \partial(C \cdot Q) / \partial x = e_r - d + q_s \quad (4.29)$$

onde

$e_r(x,t)$ é a taxa de desprendimento de sedimentos pelo fluxo (kg/m/s),

$d(x,t)$ é a taxa de deposição dos sedimentos (kg/m/s),

q_s é a entrada lateral de sedimentos provenientes dos planos adjacentes (kg/m/s) e

as outras variáveis são as mesmas já descritas.

As condições iniciais e de fronteira são as seguintes:

$$C(0,t) = C_o(t), \text{ para } t \geq 0 \quad (4.30)$$

$$C(x,0) = 0, \text{ para } x \geq 0 \quad (4.31)$$

onde

$C_o(t)$ é a concentração de sedimentos chegando à montante do trecho considerado. É assumido que os perfis do leito são relativamente estáveis, com material mais grosso que silte (0,062 mm).

Para modelar o desprendimento das partículas e_r pelo fluxo concentrado é usada a seguinte equação (Croley, 1982; Foster, 1982):

$$e_r = a (\tau - \tau_c)^n, \text{ para } \tau \geq \tau_c \quad (4.32)$$

$$e_r = 0, \text{ para } \tau \leq \tau_c \quad (4.33)$$

onde

$$\tau = \gamma \cdot R_H \cdot S_f \quad (4.34)$$

$$\tau_c = \delta \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot d_s \quad (4.35)$$

R_H é o raio hidráulico (m),

a é o fator de erodibilidade nos canais, um coeficiente de desprendimento de sedimento ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{N}^{1.5} \cdot \text{s}$),

$\tau(x,t)$ é a tensão de cisalhamento média (N/m^2),

τ_c é a tensão de cisalhamento crítica média para o tamanho representativo das partículas (N/m^2),

n é um expoente,

δ é o coeficiente para tensão de cisalhamento crítica e depende das propriedades do fluxo e dos sedimentos (adimensional),

as outras variáveis já foram descritas.

A deposição nos canais é considerada proporcional à concentração e à velocidade de queda efetiva dos sedimentos:

$$d = \epsilon_c \cdot TW \cdot V_s \cdot C \quad (4.36)$$

onde

ϵ_c é o coeficiente de deposição para os canais (adimensional),

$TW(x,t)$ é a largura de topo do fluxo (m),

as outras variáveis já foram descritas.

4.3 O Programa WESP

4.3.1 - Descrição Geral

O modelo computacional WESP foi desenvolvido na linguagem de programação ANSI FORTRAN 77, é composto por três subsistemas que são executados separadamente: um gerador de arquivos de entrada, um utilitário para modificar qualquer parâmetro no arquivo de entrada e o modelo WESP propriamente dito. Esta organização simplifica o desenvolvimento e manutenção do código, reduzindo a quantidade de memória residente necessária para a execução do programa, o que torna possível a sua execução em computadores de menor porte como "micros" IBM PC/AT ou compatível.

Neste trabalho foi feita uma nova compilação para o programa executável do WESP, através do aplicativo Microsoft FORTRAN 1.0, que reduziu a sua quantidade de memória de 527 para 185 Kbytes, permitindo uma reestruturação no programa executável para que ele pudesse rodar cheias longas, para um intervalo de cálculo (Δt) relativamente pequeno.

4.3.2 - Gerador de Arquivos de Entrada

O programa INPUT foi desenvolvido para geração de arquivo de entrada do modelo WESP, através de um processo interativo em que o usuário fornece parte dos dados necessários para simulação. O programa aumenta os dados de entrada e calcula internamente outros dados secundários, que podem ser obtidos a partir dos dados primários fornecidos pelo usuário.

Três tipos de dados primários são requeridos para execução do modelo WESP:

- i) características da bacia hidrográfica,
- ii) parâmetros de erosão e deposição,
- iii) características da precipitação.

Uma vez que o arquivo de entrada tenha sido gerado interativamente pelo programa INPUT, o usuário pode fazer modificações nos dados de entrada através da execução do programa WESPAR. Este programa é extremamente útil na análise da

resposta hidrológica da bacia a um dado evento de precipitação, quando a bacia é sujeita a diferentes condições de manejo e/ou uso do solo.

4.3.3 - Componentes do Programa Computacional WESP

O modelo WESP propriamente dito é composto por três componentes principais (Lopes, 1987):

- i) *A infiltração*. O componente infiltração calcula a distribuição temporal do excesso de precipitação através da equação de Green e Ampt (Mein e Larson, 1973) com o cálculo do tempo de empoçamento para chuva não permanente, desenvolvido por Chu (1978);
- ii) *Escoamento superficial*. Propaga o excesso de precipitação (escoamento superficial) através dos planos de escoamento e canais, utilizando as equações da onda cinemática;
- iii) *Erosão e Deposição*. O componente erosão e deposição calcula as taxas de deposição e desprendimento de partículas por impacto das gotas de chuva (nos planos de escoamento) e por arrastamento (nos planos de escoamento e leito dos canais).

O programa computacional do WESP é composto por um programa principal e onze subrotinas que serão mostradas a seguir. O fluxograma de funcionamento do modelo WESP é mostrado na figura 4.3 (Lopes, 1987).

PROGRAMA WESP propaga o fluxo de água e sedimento em pequenas bacias hidrográficas. Ele chama as subrotinas READER, RAIN, INFIL, CLERK, PLNFLOW, CHNFLOW e WRITER.

SUBROTINA READER lê as informações contidas no arquivo de entrada gerado pelo programa INPUT. Esta subrotina é chamada várias vezes pelo programa WESP durante a simulação, dependendo da ordem de execução dos diversos elementos representativos da bacia.

SUBROTINA RAIN lê os dados de precipitação (histograma) no arquivo contendo as características do evento (ou eventos), e os coloca nos arrays (vetores) TPRECP e PRECP como pares ordenados de pontos tempo-intensidade. Esta subrotina é chamada pelo programa WESP.

SUBROTINA INFIL calcula as taxas de infiltração nos planos de escoamento usando a equação de GREEN e AMPT e gera o histograma do excesso de precipitação. É chamada pelo programa WESP.

SUBROTINA CLERK executa o manejo da localização de armazenamento temporário dos arrays QSTORE e QSSTORE durante a execução do programa. É também chamada pelo programa WESP.

SUBROTINA ITER resolve equações implícitas, não lineares, usando o método iterativo de Newton-Raphson. É chamada pelas subrotinas INFIL, PLNFLOW e CHNFLOW.

SUBROTINA IMPLCT calcula os resíduos para subrotina ITER através de EQN1 (para a equação de escoamento superficial), EQN2 (para a equação de escoamento em canais), EQN3 (para as equações de descarga) e EQN4 (para a equação de infiltração). É chamada pela subrotina ITER.

SUBROTINA PLNFLOW propaga o excesso de precipitação através dos planos de escoamento, usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos. É chamada pelo programa WESP.

SUBROTINA PLNSED calcula as taxas de desprendimento do solo pelo impacto das gotas de chuva e tensão de arrastamento, as taxas de deposição nos planos de escoamento (encostas da bacia), e propaga o sedimento através dos planos de escoamento, usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos. É chamada pela subrotina PLNFLOW.

SUBROTINA CHNFLOW propaga o escoamento superficial concentrado através dos segmentos de canais, usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos. É chamada pelo programa WESP.

SUBROTINA CHNSED calcula as taxas de desprendimento por arrastamento, as taxas de deposição nos leitos dos canais e propaga o sedimento através dos segmentos de canais (rede de drenagem), usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos. É chamada pela subrotina CHNFLOW.

SUBROTINA WRITER escreve o arquivo de saída do modelo WESP. É chamada pelo programa WESP.

FUNÇÃO ABSTRACT fornece as perdas por infiltração (transmissão) nos leitos dos canais. É chamada por EQN2 através da subrotina IMPLCT.

4.3.4 - Seqüência Computacional

A seqüência computacional do modelo WESP é organizada de tal modo que o "inflow" requerido por qualquer elemento (plano ou canal), em qualquer estágio da simulação (execução do programa) provém de elementos previamente processados. Esta seqüência é determinada pelo usuário, durante o processo de discretização da bacia e segue o padrão descrito pelas linhas de fluxo através da "cascata" de planos. A ordem na qual os elementos aparecem na linha de fluxo define a seqüência computacional. Como regra geral para esta definição, o elemento número 1 é atribuído a um dos elementos localizados próximos ao divisor topográfico da bacia, e, a partir daí, as linhas de fluxo são seguidas para baixo, determinando a ordem computacional dos demais elementos. Se o próximo elemento da seqüência não pertence a um ramo tributário diferente, a ele é atribuído o próximo número de execução consecutiva, caso o próximo elemento pertença a um ramo tributário diferente, o próximo número da seqüência é atribuído ao elemento mais distante, contribuindo para aquele ramo tributário. Este processo é repetido até que o ponto de descarga da bacia seja atingido e a todos elementos da discretização tenha sido atribuído um número de ordem de execução (Lopes, 1987).

Durante uma simulação (execução) os "outflows" de alguns elementos são retidos em uma localização de armazenamento temporário, enquanto outros elementos são processados até que a junção entre canais convergentes seja atingida. Neste ponto "outflows" armazenados em localização temporária são combinados e a localização é liberada para ser usada no processamento dos elementos subseqüentes. Esta estratégia reduz consideravelmente o número e a dimensão dos arrays usados no programa, e portanto, reduz o tamanho da memória residente necessária para a execução do programa (Lopes, 1987). A figura 4.3 mostra o fluxograma de informações do modelo WESP (Lopes, 1987).

4.3.5 - Dados e Parâmetros de Entrada

Os dados e os parâmetros de entrada no WESP é feita através de um gerador de arquivos de entrada, o qual é interativo e também realiza cálculos de dados secundários. Os dados requeridos são os seguintes:

a) Características da bacia:

1. Geometria:

área superficial, elevações e rugosidade superficial n_p

2. Rede de drenagem:

declividades, seções transversais de escoamento e coeficiente de rugosidade n_c

3. Solos:

condutividade hidráulica saturada K_s , e o parâmetro de infiltração N_s

b) Parâmetros de erosão/deposição:

1. Erodibilidade do solo:

parâmetro de erodibilidade por impacto das gotas de chuva K_i e por arrastamento pelo fluxo nos planos K_r e nos canais a

2. Características dos sedimentos:

tamanho característico d_s , e peso específico γ_s

3. Parâmetros para tensão crítica:

arrastamento δ , e de deposição ϵ_p e ϵ_c

c) Características da precipitação:

1. Histograma

2. Distribuição espacial na bacia

Alguns destes parâmetros são obtidos através de mapas topográficos, outros medidos em campo, ou estimados a partir de indicações na literatura, e outros estimados experimentalmente ou por calibração, quando há disponibilidade de dados de produção de escoamento superficial e sedimentos.

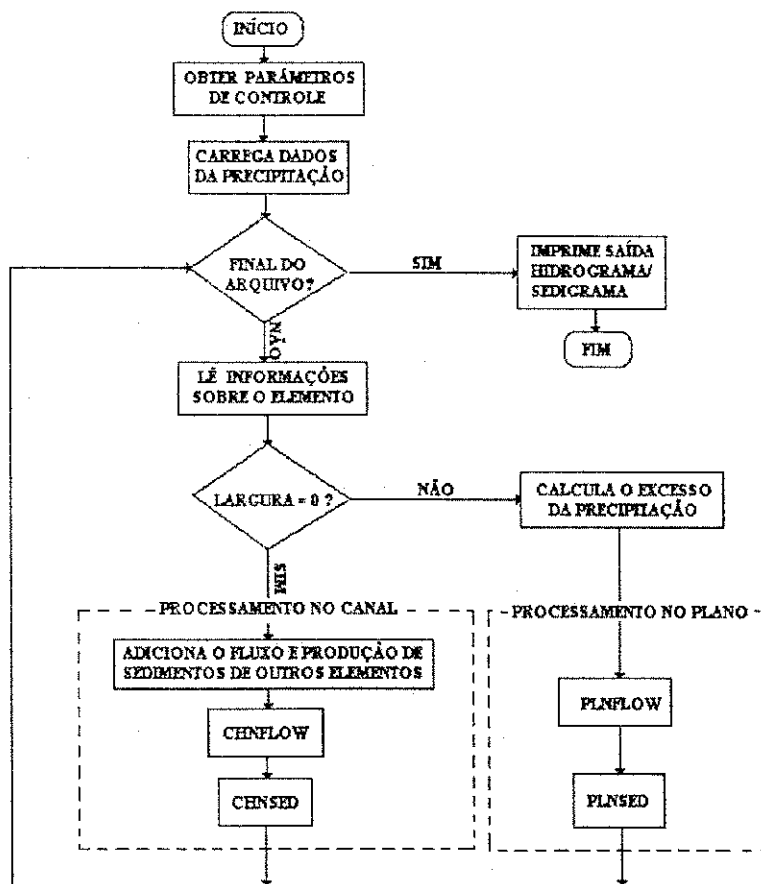


Figura 4.3 - Fluxograma de informações no programa WESP (Lopes, 1987)

5 - BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ

5.1 - Considerações Gerais

Os dados utilizados no presente trabalho foram coletados na bacia experimental de Sumé, no Estado da Paraíba, onde a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) desenvolveu diversas pesquisas através do Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico para o Nordeste (PDCT/NE). A UFPB teve como colaboradores a SUDENE e o ORSTOM. O apoio financeiro foi dado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Com o cancelamento do apoio pelo BID/CNPq, em 1990, e o fim da participação da SUDENE e o ORSTOM, os trabalhos na bacia continuam a ser operados pela UFPB numa escala muito reduzida.

5.2 - Localização

A Bacia Experimental de Sumé está localizada na propriedade Fazenda Nova, no município de Sumé, Estado da Paraíba, conforme Figura 5.1. Situa-se na altura do km 118 da BR-412, entre as cidades de Sumé e Monteiro. Esta região, considerada uma das mais secas do Nordeste do Brasil, é denominada Cariris Velhos ou simplesmente Cariri, faz parte da área superior da bacia do Rio Paraíba, com 7°40' de latitude sul e 37°00' de longitude oeste (Cadier et al., 1982).

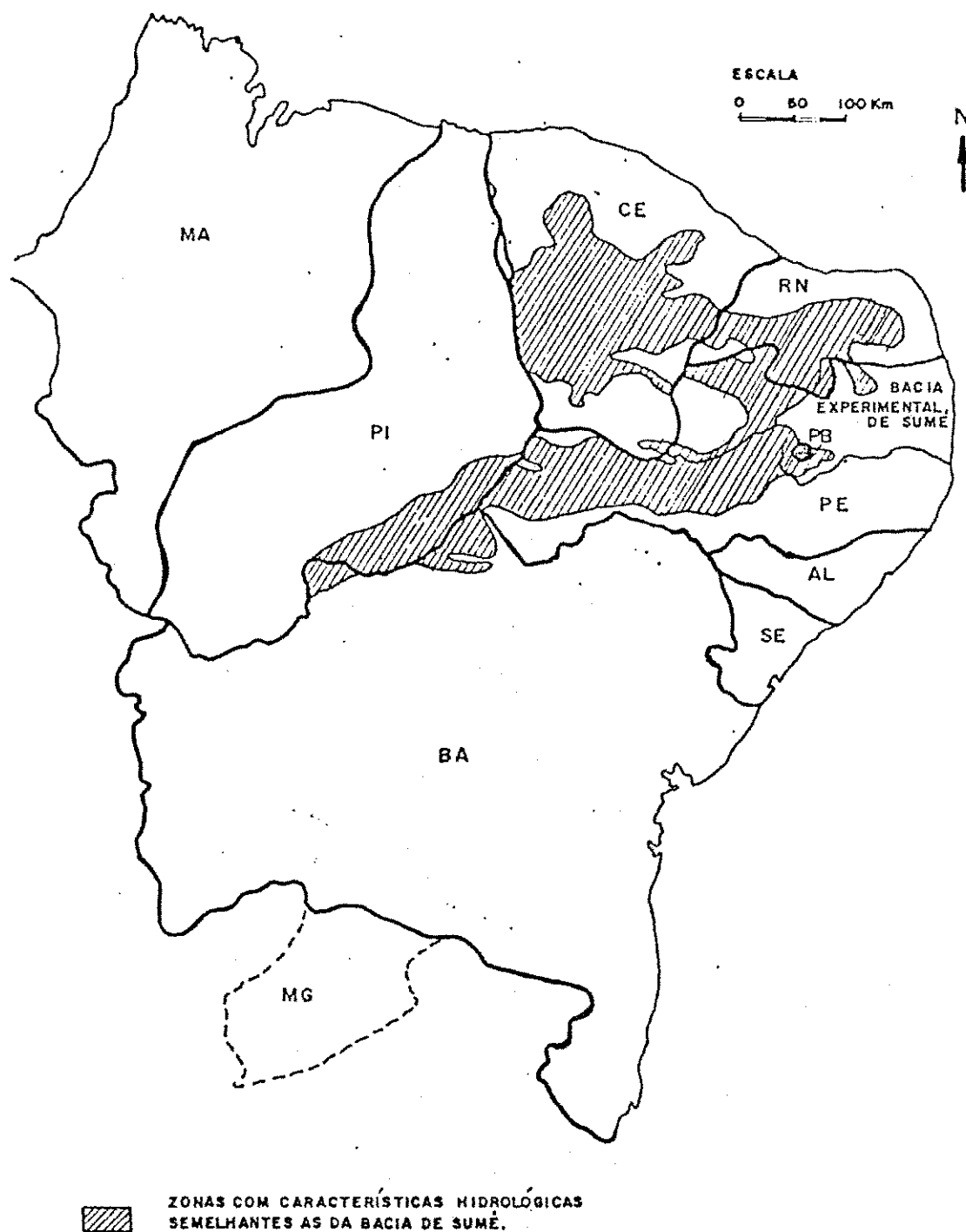


Figura 5.1 - Localização da Bacia Experimental de Sumé e das zonas hidrologicamente semelhantes (Cadier et al., 1983).

5.3 - Características Físico-Climáticas

A Bacia Experimental de Sumé possui características físico-climáticas semelhantes a outras áreas do semi-árido nordestino, com solo e sub-solo de baixa permeabilidade. O armazenamento de água de superfície por açudagem deveria ser a solução básica para regularizar os recursos hídricos da região, (Cadier et al., 1982).

Segundo Cadier et al., (1983), as principais características físico-climáticas da Bacia Experimental de Sumé são:

5.3.1 - Clima

A precipitação média anual na faixa de 550 e 600 mm, distribuída entre janeiro e junho, apresentando uma maior concentração entre fevereiro e abril. A precipitação média diária ultrapassada uma vez é da ordem de 63 mm para 1 ano, 106 mm para 10 anos e 152 mm para 100 anos.

A temperatura média anual de 24°C, com médias máxima e mínima diárias em torno de 33°C em dezembro e 15°C em julho.

A insolação média anual com cerca de 2800 horas. A evaporação do tanque "Classe A" é de 2900 mm ao ano.

5.3.2 - Sub-Solo

Segundo Albuquerque (1970), o subsolo do Cariri paraibano é formado por rochas do complexo cristalino pré-cambriano, na maioria granitos. É impermeável mas com fissuras e a presença de Gnaisses e quartezitos foi verificado no local da experimentação (Cadier et al. 1983).

5.3.3 - Solo

O solo característico do sertão nordestino é o bruno não cálcico vértico, constituindo cerca de 15% da superfície do polígono das secas. Apresenta uma permeabilidade média de 26,4 mm/h. Esse tipo de solo representa mais de 85% da superfície da bacia. Os outros 15% restantes são compostos por manchas de solos bruno não cálcico modais associados a raros vertissolos. Os solos são rasos (espessura variando

de alguns decímetros a pouco mais de 1 m). O perfil médio do solo de Sumé, determinado pelos estudos de Molinier et al., (1989), é:

- i) Horizonte A com 20 cm de espessura, bruno acinzentado, textura franco-areno-argilosa, fase pedregosa com estrutura poliédrica a cúbica, porosidade média;
- ii) Horizonte B, de 20 a 70 cm de profundidade, bruno, textura franco-argilo-arenosa, estrutura cúbica a prismática até maciça, com porosidade muito fina;
- iii) Horizonte C, de 70 a 90 cm de profundidade, textura areno-argilosa, proveniente de um gnaisse com anfibólio.

Os solos na sua morfologia têm estreita dependência da estrutura geológica. A sucessão das rochas da superfície para o fundo é: pegmatita quartzítica feldspática, gnaisse com anfibólio, anfibolito de acordo com a figura 5.2, (Molinier et al 1989). Isto determina a distribuição espacial:

- i) Nas vertentes, onde os solos bruno vérticos são dominantes, cada ocorrência de pegmatita é marcada por uma saliência topográfica e a aparição de solos bruno modais, enquanto que as micro depressões correspondem a uma rocha básica mais alterável e aos vertissolos;
- ii) A mesma coisa acontece na escala das bacias hidrográficas: os cimos correspondem a uma ossatura da rocha dura, e a parte alta das vertentes têm uma maior proporção de solos bruno modais.

Os horizontes do solo em Sumé podem ser agrupados em duas grandes classes:

- a) Horizontes porosos e permeáveis. São os horizontes A dos solos bruno vérticos e da totalidade dos solos bruno pouco desenvolvidos passando aos solos litólitos. A taxa de argila não ultrapassa 15-20%. A densidade aparente está próxima de 1.5, ou seja, uma porosidade total de 40 a 45%. Estes horizontes têm uma baixa capacidade de estocagem de água, porém são os condutores do sistema.
- b) Os horizontes B compactos, pouco permeáveis. Os horizontes B são vérticos. A densidade aparente aumenta com a profundidade, chegando a 1.8, ou seja, uma porosidade de 30 a 32%. A proporção de argila na faixa de (40 a 45%) e o grande poder de contração e expansão fazem com que essas camadas sejam pouco permeáveis, mas com a capacidade de reter grandes quantidades de água quando molhadas.

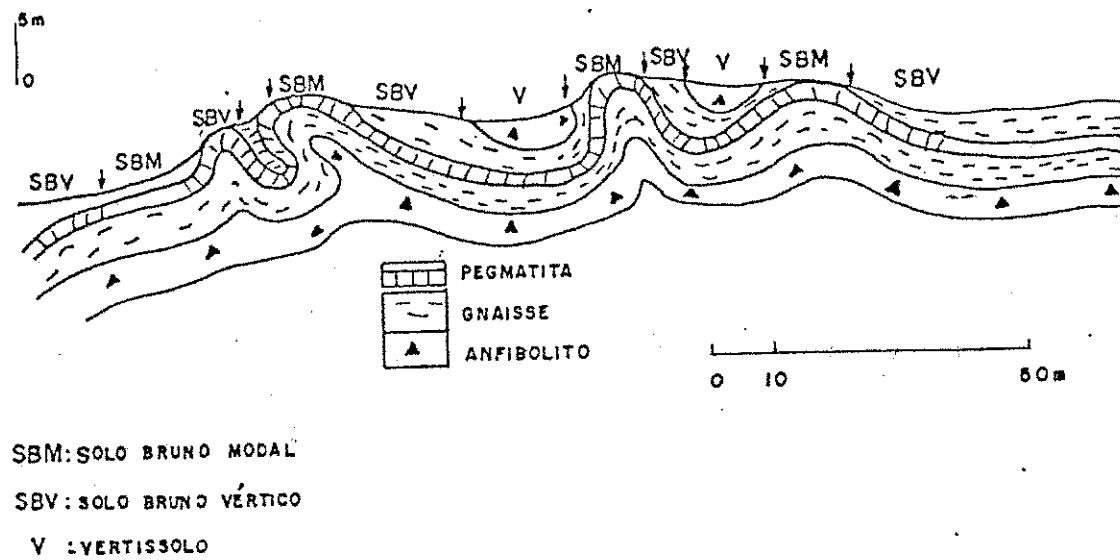


Figura 5.2 - Repartição dos solos na Bacia Experimental de Sumé (Molinier et al., 1989).

Combinando essas características com a distribuição espacial, tem-se o esquema de funcionamento da Figura 5.3 (Molinier et al. 1989). Os únicos meios confinados são as micro-depressões de vertissolos.

Pode-se, finalmente, distinguir os vários fluxos no solo:

- i) Infiltração superficial. Sobre os solos desmatados, a infiltração e o umedecimento do solo parecem regidos pela condutividade hidráulica da película superficial que se forma após as primeiras chuvas. Nos solos protegidos pela vegetação, sem limitação superficial, a infiltração parece controlada pelo umedecimento do perfil, atingindo a rejeição quando as capacidades de armazenamento do solo e de transmissão da água subsuperficialmente atingem seus limites.
- ii) As transferências de horizontes A para B e C. O horizonte A não se comporta apenas como um simples reservatório que se enche, mas suas relações com os horizontes adjacentes, aos quais transmite seus fluxos, são determinantes. Nos solos bruno modais sem horizonte B textural e nos solos litólicos a infiltração progride com rapidez até a base do solo. São zonas de infiltração preferencial, sobretudo quando cobertos por vegetação. Nos solos bruno não-vérticos, as transferências de A para B são muito lentas enquanto A não está próximo da saturação. O que ocorre também com a circulação dentro de B. Esta dinâmica bem contrastada entre A e B leva, com chuva suficiente, o horizonte A à saturação, criando condições de drenagem lateral. A ausência de vegetação aumenta esse efeito, desviando grande parte dessa circulação para o escoamento. Podem também acontecer “curto-circuitos” de A para C, sem umedecer B, através de caminhos preferenciais.
- iii) As drenagens. A existência de drenagem oblíqua nas condições experimentais foi confirmada pela comprovação da presença de lençóis dentro da alteração. Entretanto é muito difícil avaliar este termo. Ao fechar o balanço hídrico, constatou-se a existência de perdas (fugas), às vezes de mais da metade da chuva. Pode também existir uma drenagem vertical na base do solo, a respeito da qual não se têm dados. Tudo indica que é fraca e localizada, em relação à heterogeneidade e à estrutura falhada do embasamento rochoso.

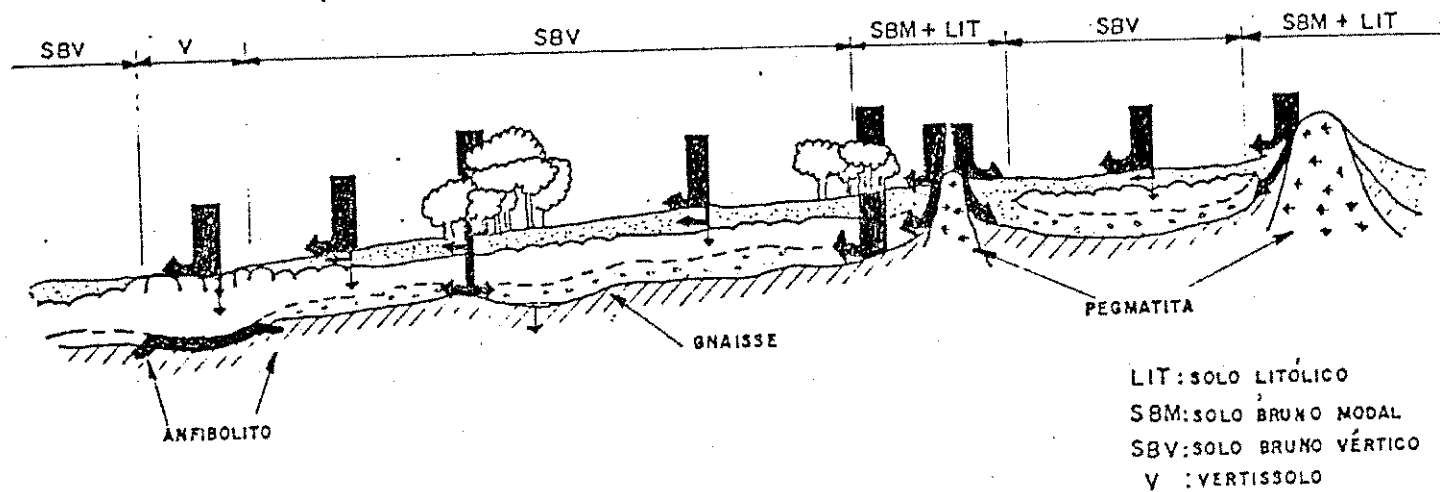


Figura 5.3 - Esquema de circulação na Bacia Experimental de Sumé (Molinier et al., 1989).

Um esquema de funcionamento da infiltração, em que cada horizonte principal é representado por um reservatório com entradas e saídas correspondentes aos vários fluxos, é apresentado por Molinier et al (1989).

5.3.4 - Relevo

O relevo varia de ondulado a pouco ondulado, com declividade variando entre 4% e 9%.

5.3.5 - Vegetação

"A vegetação nativa na região é do tipo caatinga dos cariris velhos, com um estrato dominante, do ponto de vista do recobrimento foliar, de 2 a 3 m de altura. O estrato de 4 a 6 m também é importante, mas os arbustos estão sobretudo localizados ao longo dos eixos de drenagem" (Fotius, 1983). A vegetação regional é a caatinga hiperxerófila, arbóreo arbustiva e a local é o Marmeleiro (*Croton sonderianus*) e a Caatingueira (*Caesalpinia pyramidales*) e a Jurema Preta (*Mimosa Hostilis*); (Leprun citado por Cadier et al 1983).

5.4 - Dispositivo Experimental

O conjunto da Bacia Experimental é formado por quatro microbacias com área entre 0,5 e 1,0 ha, nove parcelas experimentais de 100 m² e uma sub-bacia de 10 km², operadas sob chuva natural, e microparcelsas de 1 m², sob chuva simulada. Possui também uma estação climatológica e vários pluviômetros e pluviógrafos localizados em vários pontos para permitir um melhor acompanhamento das variações temporais e espaciais das chuvas. A figura 5.4 mostra o croqui das instalações.

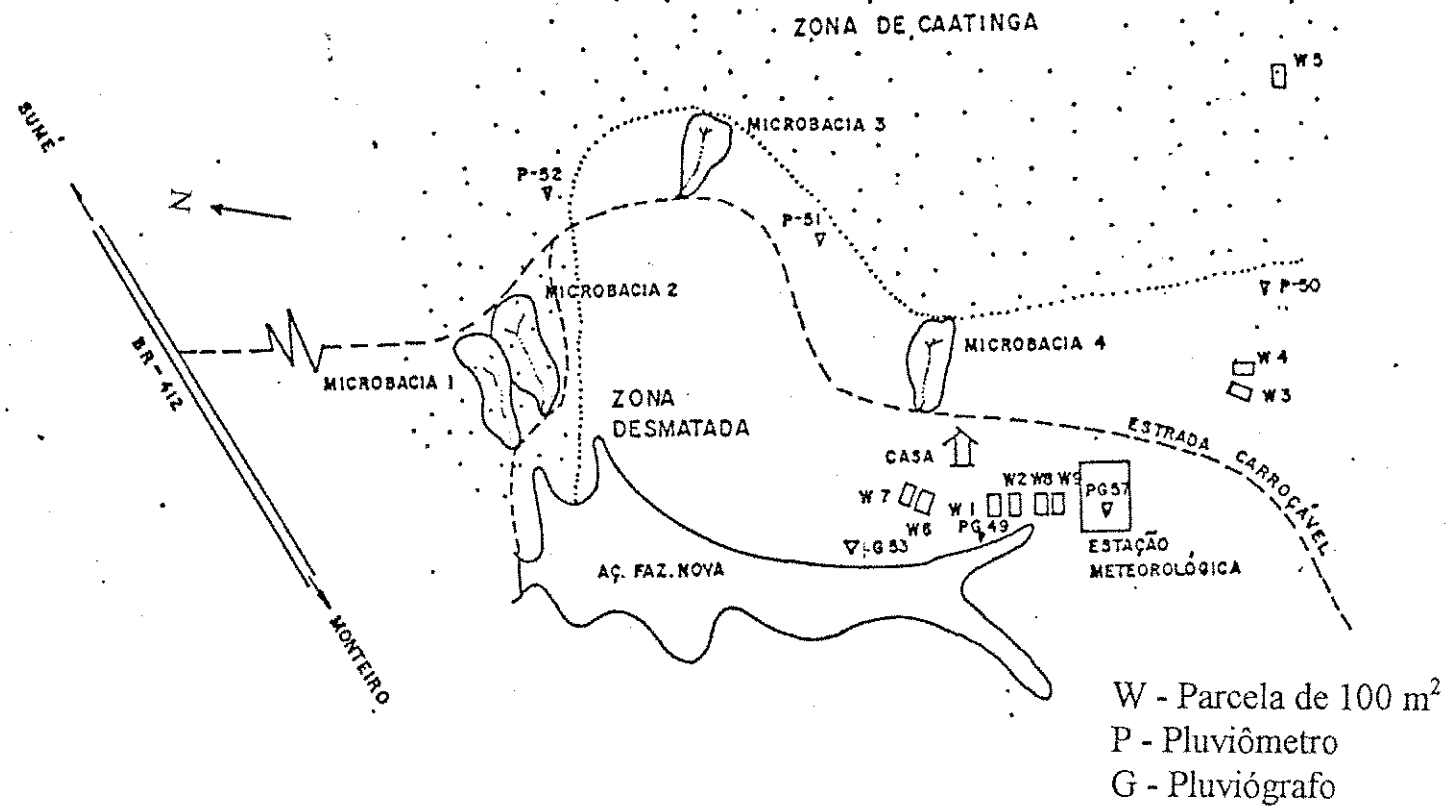


Figura 5.4 - Croqui de localização das instalações (Cadier et al, 1983)

5.4.1 - Microbacias

Foram iniciadas as operações nas microbacias em 1982, quando foi realizado um levantamento topográfico das quatro microbacias realizados por Cadier et al., (1983). As características das microbacias estão apresentadas na Tabela 5.1, onde são mostrados as suas áreas, declividades médias e tipos de cobertura vegetal.

As figuras 5.5 e 5.6 mostram o levantamento topográfico das microbacias 3 e 4, respectivamente.

Tabela 5.1 - Características das microbacias instaladas

Microbacia	Área (ha)	Declividade média (%)	Cobertura vegetal e Estado da Superfície
1	0,62	7,0	Caatinga Nativa
2	1,07	6,1	Caatinga Nativa
3	0,52	7,1	Desmatada
4	0,48	6,8	Desmatada

As microbacias são equipadas com uma fossa que coleta as águas e os sedimentos escoados correspondentes a cada chuva e de linígrafos para acompanhar a variação do volume d'água escoado através do tanque. A fossa possui forma retangular com capacidade para 2300 litros e um vertedor triangular de 90°. Um dispositivo de amostragem automática das águas que sangram pelo vertedor completa o mecanismo de coleta de dados (Gomes et al., 1987). A figura 5.7 mostra o dispositivo de medição das microbacias.

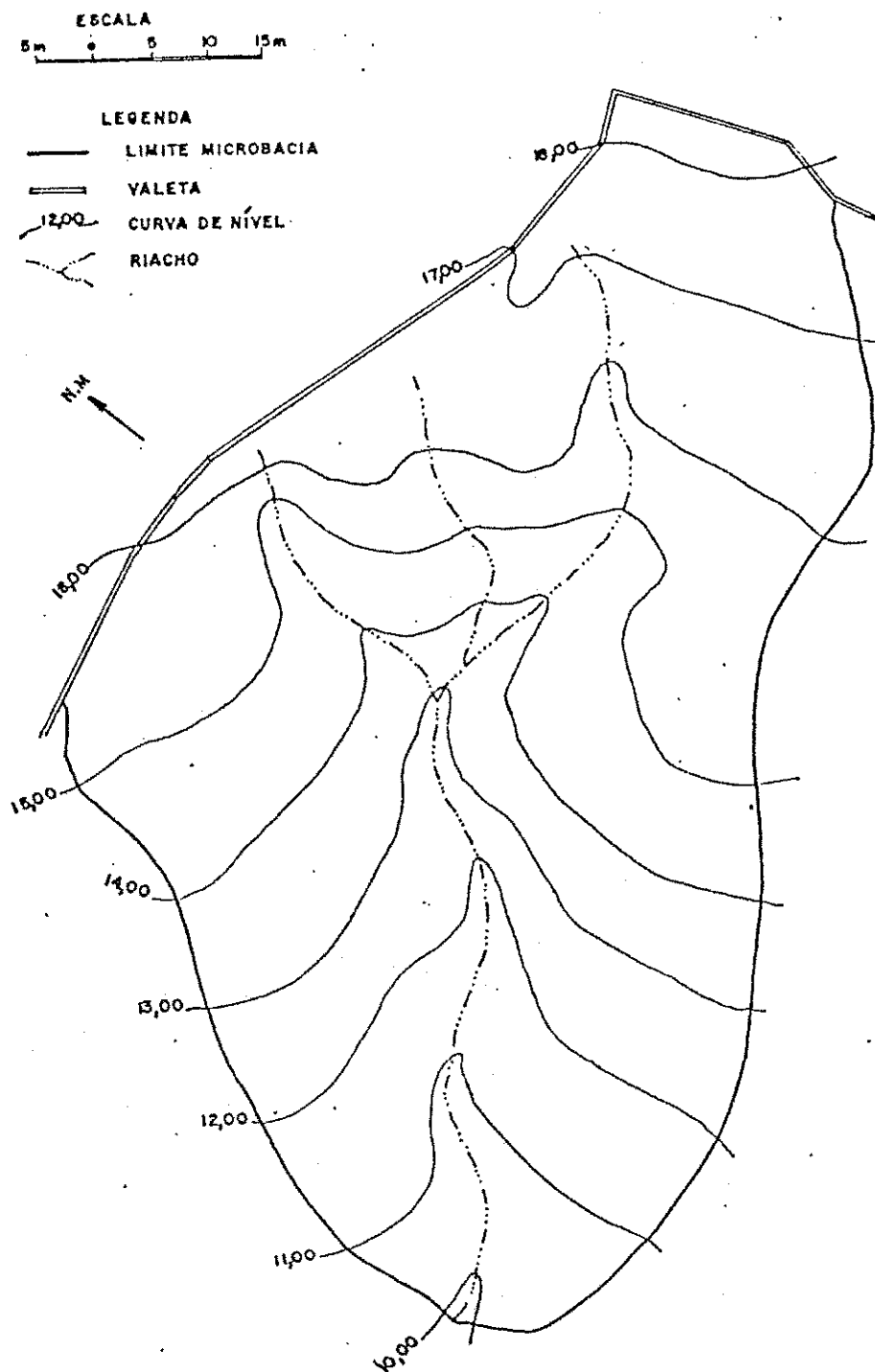


Figura 5.5 - Levantamento topográfico da microbacia 3 (Cadier et al, 1983)

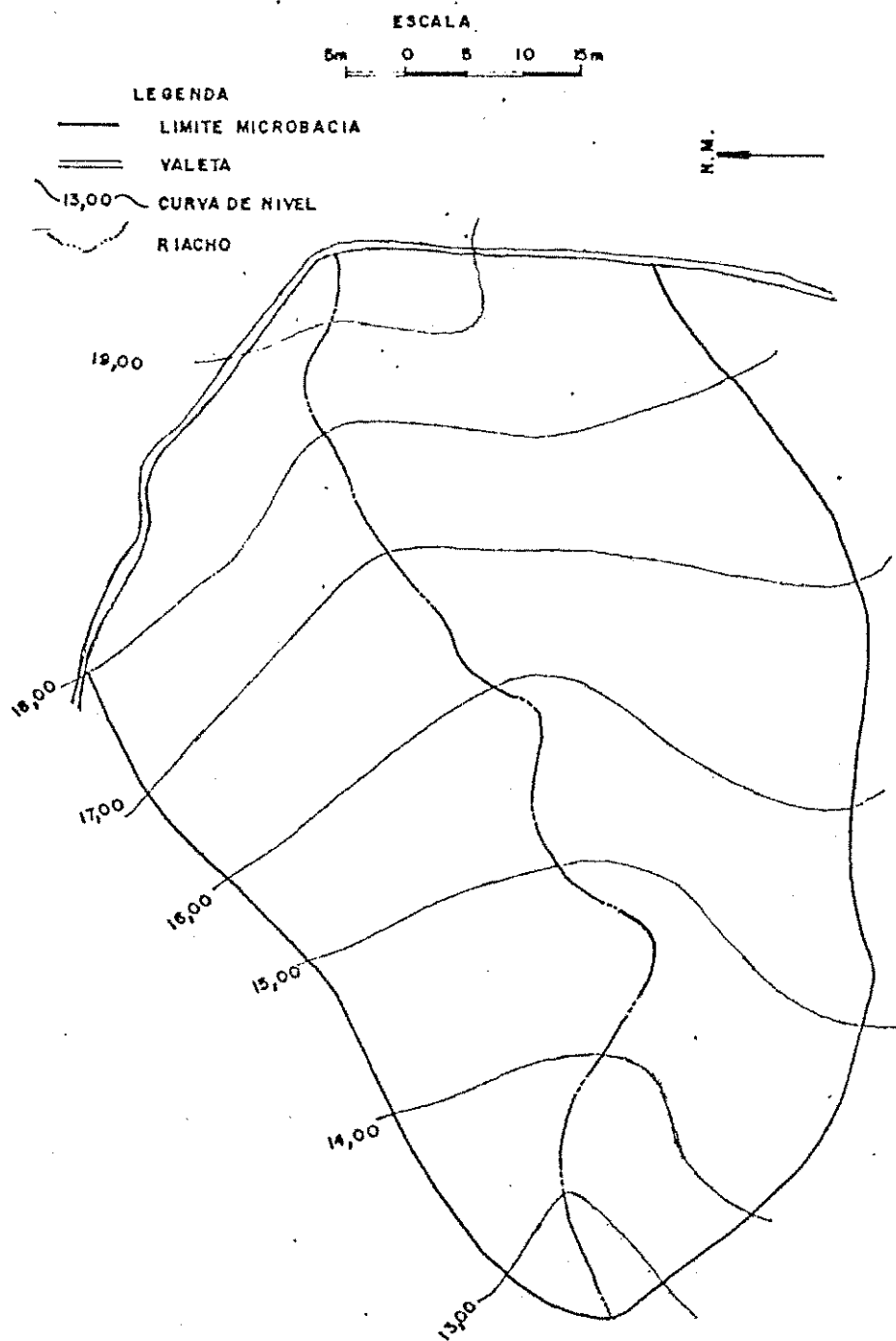


Figura 5.6 - Levantamento topográfico da microbacia 4 (Cadier et al., 1983)

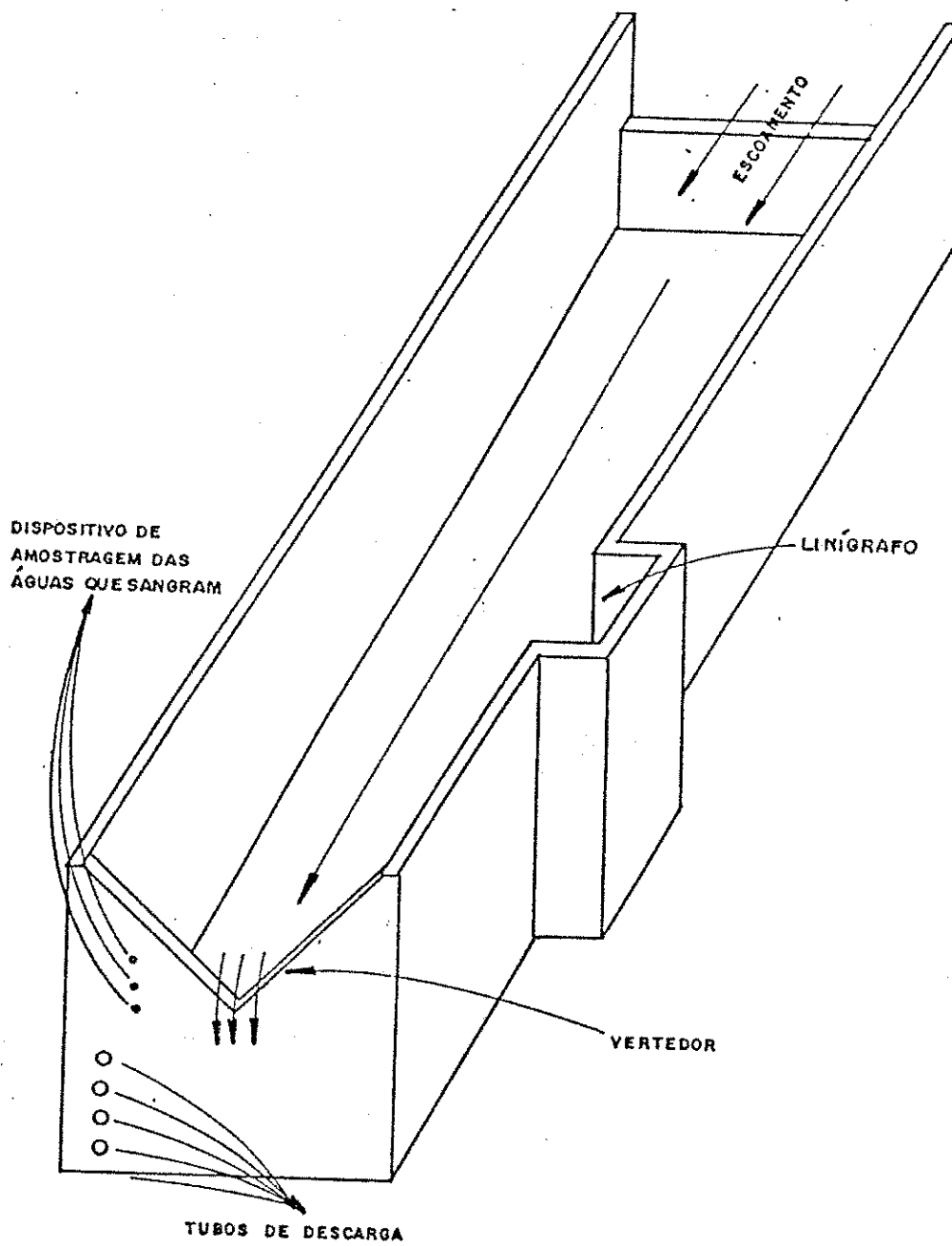


Figura 5.7 - Dispositivo de medição das microbacias (Cadier et al, 1983)

5.4.2 - Parcelas Experimentais

A Bacia Experimental de Sumé possui um total de nove parcelas experimentais de 100 m², com dimensões de (4,55 x 22,00)m. A tabela 5.2 mostra as características das parcelas instaladas.

Tabela 5.2 - Características Físicas das parcelas

Parcelas	Declividade (%)	Cobertura Vegetal e Estado da Superfície
01	3.8	Desmatada
02	3.9	Cobertura morta
03	7.2	Cobertura morta
04	7.0	Desmatada
05	9.5	Caatinga nativa
06	4.0	Palma Forrageira plantada morro a baixo
07	4.0	Palma Forrageira plantada em sulco nivelado
08	4.0	Desmatada e manejada tipo Wischmeier
09	4.0	Caatinga Renascida

O dispositivo de medição de cada parcela é composto por dois tanques coletores de fibrocimento calibrados, cuja capacidade para cada um é de 1000 litros. A figura 5.9 mostra um sistema de partidores no primeiro tanque, que embora possua nove tubos vertedores, apenas um deles é interligado ao segundo tanque.

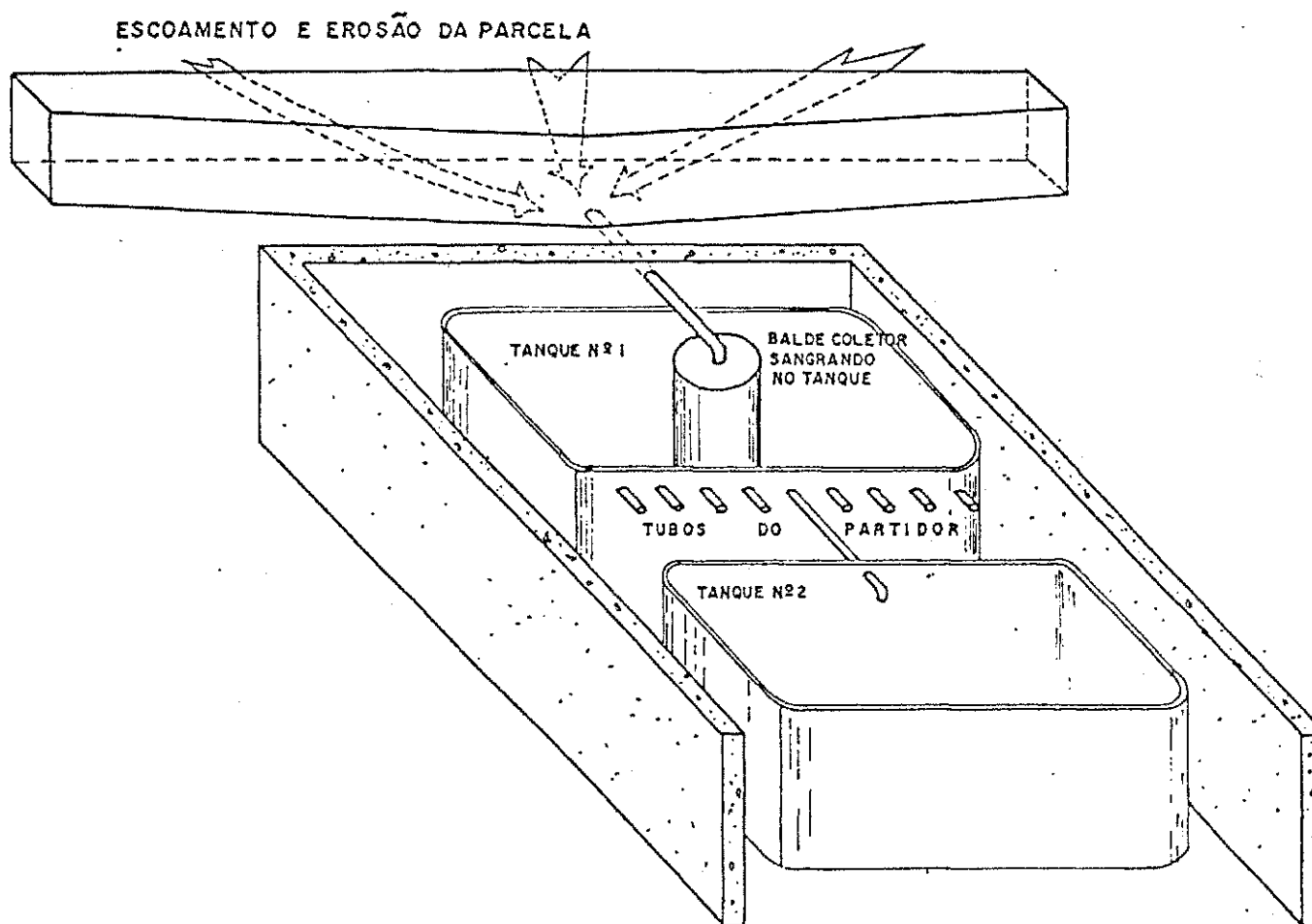


Figura 5.8 - Dispositivo de medição das parcelas de 100m² (Cadier et al, 1983)

5.4.3 - Manejo do Solo e Vegetação

O manejo das parcelas e microbacias desmatadas era feito com uma limpeza da superfície sempre que a vegetação atingisse a uma altura de 5 cm em média.

As microbacias desmatadas 3 e 4 não tiveram continuamente esta manutenção rigorosa e, assim, sofreram mudanças em termos de exposição do solo e de características de vegetação ao longo da sua operação. Isto implica, na realidade, em vários períodos separados, nos quais as condições da superfície podem ser consideradas como consistentes, mas diferentes.

O primeiro período compreende os anos de 1982 e 1983. Foram anos em que os processos hidrológicos sofreram influência do manejo do solo anterior à implantação das microbacias. A área era um plantio de tomate em sulcos depois abandonado. A baixa pluviosidade destes dois anos contribuiu também para que as condições do solo permanecessem pouco alteradas. Os anos mais chuvosos de 1984 e 1986 constituem o segundo período identificado. Nesta fase, dificuldades operacionais não permitiram que o corte da vegetação fosse realizado regularmente, o que provocou seu crescimento além do previsto em determinados períodos. A partir de março de 1985 iniciou-se um acompanhamento contínuo do estado da vegetação e do solo, permitindo identificar os eventos em que a vegetação foi mantida dentro dos níveis estabelecidos na metodologia (Galvão, 1990).

Cadier (SUDENE-ORSTOM), em comunicação pessoal com Galvão (1990), recomendou-lhe que os três primeiros meses do ano de 1984 fossem excluídos do ajuste dos modelos, pois nesta época praticamente inexistia qualquer vegetação superficial, diferenciando-se do restante do período. Nesse período verificou-se ainda uma outra lacuna, entre 26/03 e 08/05 de 1985. Esta fase foi bastante pluviosa; observações "in loco" e registros linigráficos atestaram a ocorrência de escoamento de base na microbacia 3, proveniente inclusive de áreas fora dos seus divisores, e de um grande aumento, nas lâminas escoadas nas microbacias 3 e 4 em relação às outras fases.

A partir de 1987 as normas de manejo da vegetação foram seguidas rigidamente, mantendo-se as microbacias desmatadas permanentemente. Este constitui o último período.

Em 1988, algumas cheias fortes produziram grande quantidade de sedimentos, o que provocou, nas microbacias 3 e 4, problemas na operação dos linígrafos durante estes eventos. Antes do final da estação chuvosa foram tomadas medidas corretivas e as fossas de medição foram adaptadas de modo que os linígrafos não sofreram mais problemas no registro das cheias.

Desde 1982 as parcelas e microbacias, principalmente as desmatadas, são submetidas à ação da erosão hídrica. Por isso toneladas de solo foram carregados pelas águas neste período, alterando as características do solo exposto, o que influenciaria na produção de escoamento e de sedimentos. Não se dispõe de amostragem contínua do solo para verificação destas mudanças, a não ser a granulometria do material erodido em alguns eventos e de uma coleta do material dos experimentos realizados em 1990.

Em alguns eventos, observou-se que parte do material erodido ficou depositado no trecho final das microbacias, próximo à fossa de coleta, ou na entrada da calha de coleta das parcelas. Eventos subseqüentes, às vezes com menor intensidade de precipitação e/ou escoamento superficial, poderiam ter carregado este material, fornecendo um resultado aparentemente incoerente. Os dados de escoamento superficial podem ser considerados de qualidade satisfatória na Bacia Experimental de Sumé (Galvão, 1990).

5.5 - Coleta de Dados

Os equipamentos instalados nas microbacias e parcelas permitem coletar e medir o escoamento superficial e os sedimentos transportados para fora das microbacias e parcelas, provocados por cada chuva. Eles foram preparados para funcionar sem intervenção direta do operador durante as cheias. As medições são realizadas logo após cada cheia, o que implica na presença permanente de um técnico no campo durante a estação chuvosa (Cadier et al., 1983).

Os processos de medição de escoamento superficial e produção de sedimentos nas microbacias e parcelas são descritos a seguir.

5.5.1- Dados Coletados nas Microbacias

O cálculo do escoamento superficial é feito somando-se o volume colhido na fossa com o eventual volume sangrado através do vertedor. A fossa é pré-calibrada e o hidrograma do escoamento gerado é obtido através da curva de calibragem do vertedor e do linigrama registrado. O volume total escoado é a soma do que passa pelo vertedor com o volume que ficou retido na fossa.

O processo de avaliação da produção total de sedimento na microbacia é baseado nas amostras do material retido na fossa (em suspensão e depositado no fundo), e no fluxo vertido. As amostras dos sedimentos retidos na fossa eram obtidas em três estágios com diferentes concentrações. Dois orifícios situados ao lado do vertedor e em alturas diferentes sifonam pequena parte da mistura água-sedimento que passa pelo vertedor, acumulando-a em dois recipientes coletores. Uma terceira amostra adicional, quando necessária, é coletada manualmente durante o evento, na descarga do vertedor. A concentração média dessas três amostras é associada ao volume vertido. A produção total de sedimentos em kg/ha é calculada pelo somatório da produção de cada estágio da fossa e ao escoamento através do vertedor. O roteiro para coleta de amostras na fossa da microbacia está apresentado no anexo 1.

5.5.2- Dados Coletados nas Parcelas Experimentais

Para o escoamento superficial, como se observa na figura 5.8, o volume total escoado nas parcelas equivale a soma do volume do primeiro tanque, mais nove vezes o volume do segundo tanque. Esse volume obtido em m^3 é dividido pela área da parcela, e transformado em lâmina escoada em mm.

A avaliação da produção de sedimento é feita através de amostras obtidas nos dois tanques coletores. As amostras são coletadas no balde coletor, no primeiro tanque (em dois estágios correspondentes a diferentes tipos de concentração), e no segundo tanque em um único estágio.

A quantidade de sedimento transportado é obtida somando-se o sedimento retido no tanque (em suspensão ou no fundo) com a quantidade de sedimento que foi levado pela sangria. O roteiro para coleta das amostras nas parcelas está apresentado no anexo 1.

5.5.3 - Observações Meteorológicas

A estação climatológica possui cinco pluviômetros, três pluviógrafos, tanque evaporimétrico "Classe A", termômetros, anemômetros, conjunto psicométrico e heliográfico. Os dados de precipitação e sua variação de intensidade (mm/h) foram coletados do pluviógrafo 49, devido ao fato de sua localização e os pluviogramas registrados nas cheias serem praticamente idênticos aos dos outros dois pluviógrafos. Os dados obtidos nesta estação foram processados por Srinivasan e Galvão (1997).

5.5.4 - Processamento dos Dados de Escoamento superficial e Erosão

O volume total de escoamento superficial obtido nas parcelas e microbacias em m^3 é transformado em lâmina escoada em mm após ser dividido pelas respectivas áreas.

As amostras de sedimento das microbacias e parcelas são coletadas em volumes de 5 litros e de 1 litro, em quantidades que dependem do volume da cheia. Para diminuir o volume transportado para o laboratório, as amostras são submetidas a um processo de reconcentração por floculação com sulfato de alumínio. Podendo ser reduzida a até 200 ml, dependendo da quantidade de sedimentos. A determinação do peso de sedimento contido na amostra é feito por um processo de filtração, secagem na estufa e pesagem do resíduo seco. A produção do total de sedimento transportado nas parcelas e microbacias é obtido em kg/ha.

No processo de medição da produção de sedimento baseada na determinação da concentração média do sedimento no fluxo externo, através da coleta de várias amostras, podem ocorrer erros na quantificação final da produção dos sedimentos produzidos.

Todos os dados de lâmina de água e erosão observados, os quais totalizavam 264 eventos do período de 1982 à 1991, foram processados e transformados para cada parcela e microbacia pela equipe de pesquisa da Universidade Federal da Paraíba.

5.6 - Dados Utilizados

No presente trabalho os dados utilizados são provenientes das parcelas 1 e 4 de 100 m² e das microbacias 3 e 4. Estas parcelas e microbacias são totalmente desmatadas.

Escolheu-se o período de 1987 a 1991 para a aplicação do modelo WESP neste estudo, por ter existido neste período um controle das áreas estudadas sobre a vegetação para todos os eventos, bem como um acompanhamento regular para que o solo se mantivesse permanentemente nu. Os dados de lâmina de água em mm e erosão em kg para as parcelas 1 e 4, totalizaram 117 eventos que correspondem às cheias de nº 146 à 264, conforme se verifica no anexo 2.

Os dados foram selecionados com base nos seguintes critérios:

- i) os dados de lâmina e erosão observados, deveriam existir nas duas parcelas,
- ii) Os eventos cujas lâminas observadas fossem inferiores a 0,5 mm não foram considerados.

Após a eliminação de vários dados, devido aos dois critérios adotados, outros eventos foram eliminados em função da falta de dados de precipitação, o que inviabiliza a simulação do evento pelo modelo.

6 - APLICAÇÃO DO MODELO WESP PARA OS ESTUDOS DE SUMÉ

6.1 - Aplicação do Modelo em Parcelas e Microbacias da Bacia Experimental de Sumé

6.1.1 - Considerações Gerais

Alguns trabalhos já foram desenvolvidos utilizando dados da Bacia Experimental de Sumé para aplicação do modelo WESP.

Galvão (1990) utilizou os dados obtidos na parcela 4 e na microbacia 4 (ambas desmatadas e com solo nu) para modelagem do escoamento e da erosão através do WESP. Alguns eventos foram selecionados na parcela 4, para os quais foram ajustados os valores de lâmina e erosão calculados aos observados, pelo processo de calibragem dos parâmetros de infiltração N_s e de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial K_r , para cada evento. Da seqüência dos valores calibrados de K_r na parcela 4 foi calculado o valor médio, que foi considerado como o valor representativo para as microbacias desmatadas. Com o valor do parâmetro de erodibilidade nos planos K_r para o fluxo superficial na microbacia 4 adotado como a média da parcela 4, foram determinados por calibragem os valores do parâmetro N_s para cada evento que ajustaria a lâmina calculada à lâmina observada, e os valores do parâmetro de erodibilidade nos canais "a" que, junto com o parâmetro K_r já utilizado, ajustaria a erosão calculada à erosão observada. Uma simulação dos eventos foi realizada na microbacia 4, para a qual foram mantidos os valores de N_s e K_r , e o parâmetro "a" utilizado foi a média dos valores do mesmo, obtidos para cada evento anteriormente. Esta simulação na microbacia 4 mostrou que a erosão calculada pelo modelo WESP resultou, na maioria dos eventos, num erro abaixo de 50% em relação aos valores de erosão observada.

Santos (1994) discretizou a microbacia 3 em 4, 10 e 23 elementos de planos e canais, e ao aplicar o modelo WESP na microbacia sobre as três condições de

discretização, verificou que os parâmetros (N_s , K_i , K_r , e "a") tiveram uma menor variação quando aplicados à microbacia com 10 elementos. No caso do parâmetro N_s , foi verificado uma grande variação do mesmo entre os eventos. O autor desenvolveu uma função logarítmica relacionando N_s e o número de dias anteriores sem chuva, como mostra a figura 3.3.

As duas aplicações anteriores serviram para indícios de que o modelo WESP simula adequadamente os processos de escoamento e erosão em pequenas bacias, já que nos dois trabalhos citados, o número dos eventos utilizados foi pequeno.

Para a aplicação do modelo WESP no presente trabalho foram utilizados dados das parcelas 1 e 4, bem como dados das duas microbacias desmatadas, que apresentam as mesmas condições de manejo do solo. Essa escolha foi feita para se obter os parâmetros de erodibilidade para os planos pelo fluxo superficial da microbacia 4, através dos dados das parcelas 1 e 4, onde não existe o processo de canais, e após a verificação da consistência dos dados. Os outros parâmetros do modelo foram os mesmos utilizados por Galvão (1990), com exceção dos diâmetros médios de sedimentos nas parcelas e microbacias. Os diâmetros foram determinados por uma nova amostragem do solo e pela sua granulometria.

6.1.2 - Discretização Espacial das Microbacias em Planos e Canais

Segundo Lane e Woolhiser (1977) a discretização de uma bacia em uma cascata de planos e canais sempre tráz distorções. Estas distorções, se forem significativas, podem trazer sensíveis modificações sobre os hidrogramas.

A discretização da microbacia 4, num conjunto de planos e canais, foi feita por Galvão (1990) a partir do seu levantamento topográfico, como mostra a figura 5.6. Procurou-se preservar principalmente a área total dos elementos representados e os comprimentos das linhas de escoamento. Este trabalho foi realizado em condições não ideais, já que o levantamento topográfico disponível não apresentava um nível suficiente de detalhes. Com a ajuda de recursos de computação gráfica, foram feitas interpolações das curvas de nível existentes e produziu-se uma vista tridimensional da microbacia, conforme a figura 6.1. Associado com inspeções no campo, isto permitiu a identificação

dos planos e canais. A figura 6.2 mostra um delineamento aproximado desses elementos sobre o mapa topográfico. A representação esquemática da microbacia 4 foi feita com 21 elementos entre planos e canais, como mostra a figura 6.3. Todos esses elementos são identificados com suas características físicas para utilização no modelo computacional WESP, conforme a tabela 6.1. A tabela 6.2 apresenta a seqüência numérica para o processamento computacional dos elementos (Galvão, 1990).

Santos (1994) utilizou as mesmas técnicas para discretização da microbacia 3 em 4, 10 e 23 elementos. Para efeito de comparação, foi adotado neste trabalho a representação esquemática de 23 elementos de planos e canais, conforme a figura 6.6 e tabela 6.3. A seqüência numérica para o cálculo computacional dos elementos são mostrados na tabela 6.4.

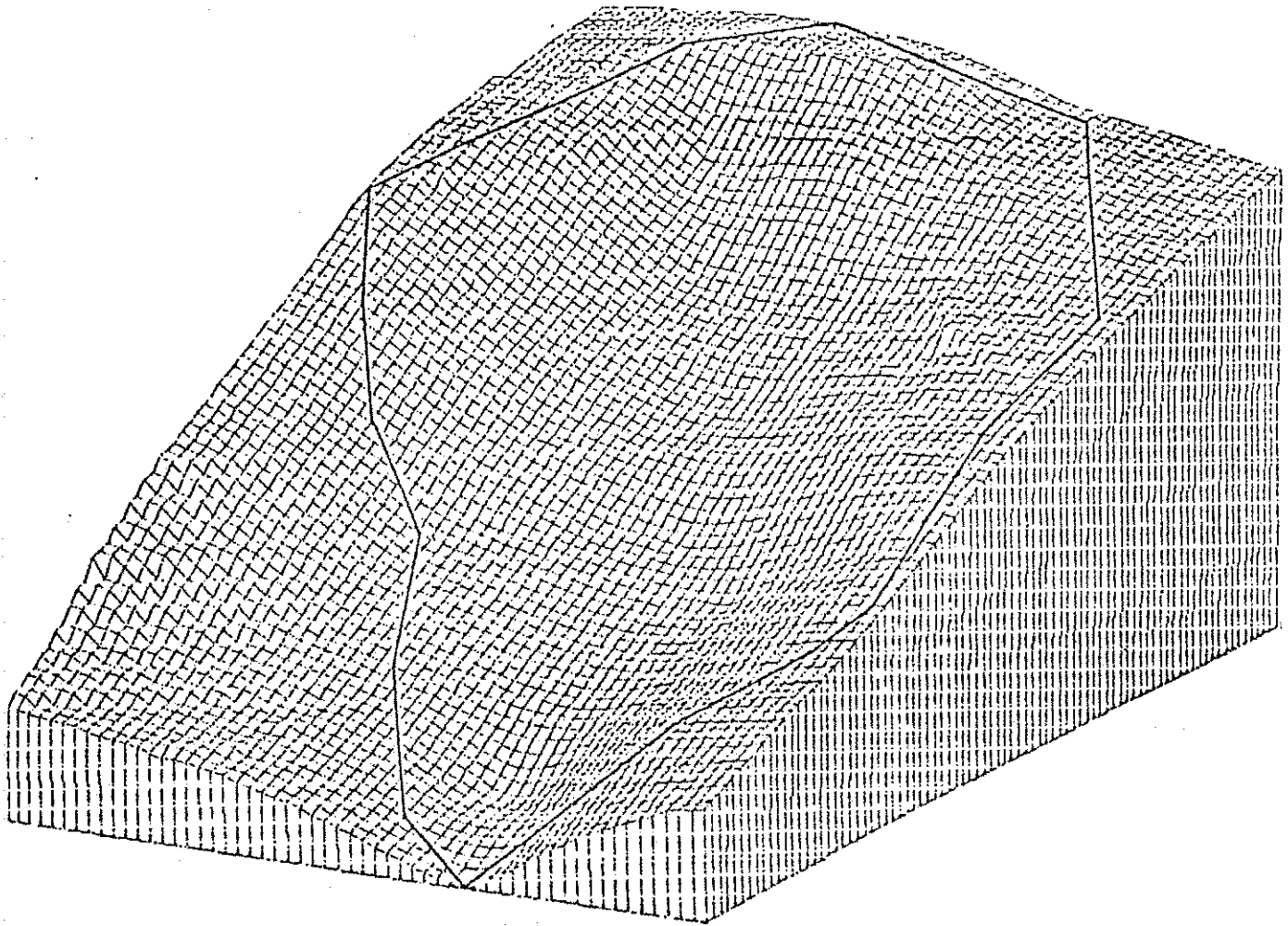


Figura 6.1 - Visualização tridimensional da microbacia 4 (Galvão, 1990)

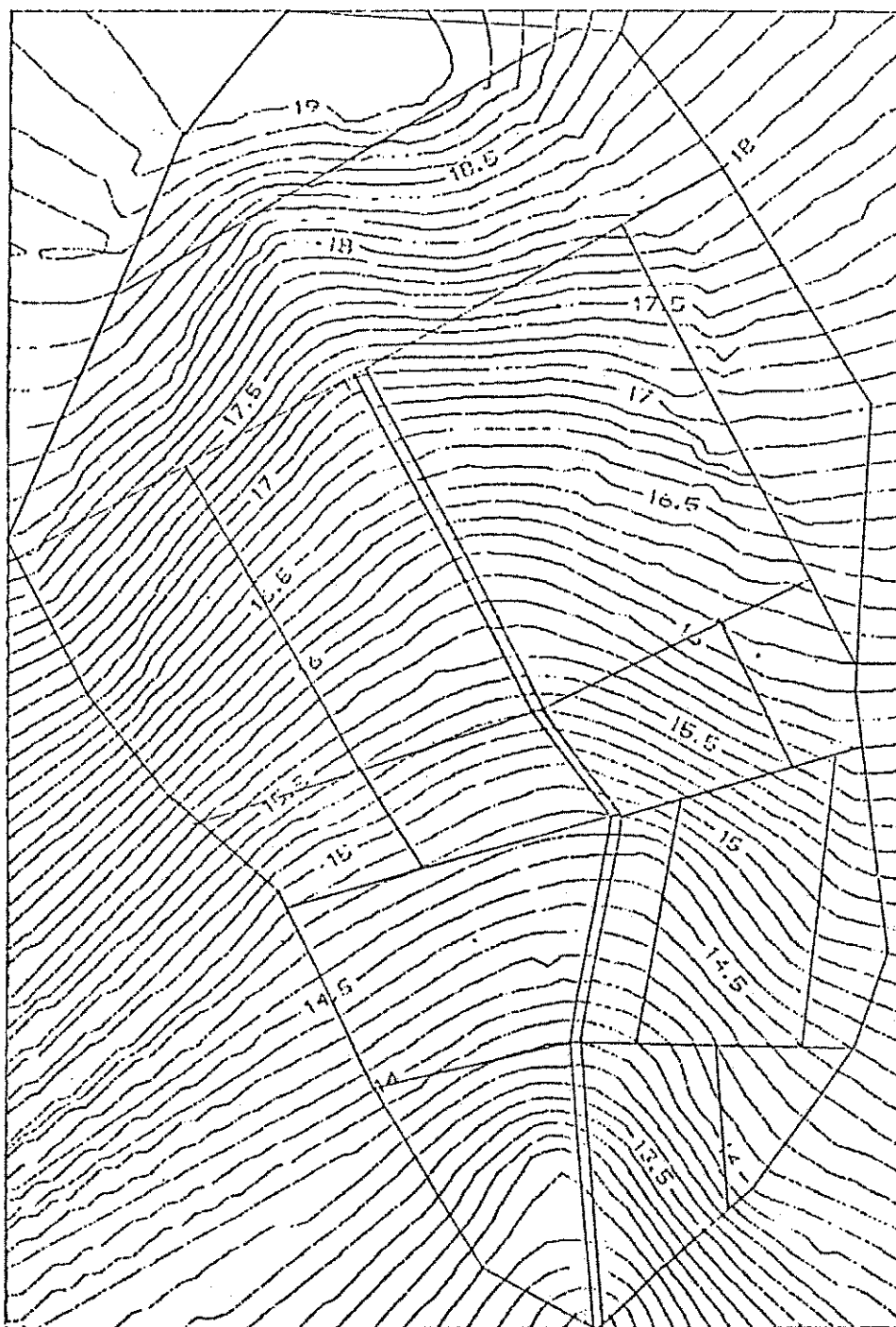


Figura 6.2 - Delineamento geométrico da microbacia 4 sobre o levantamento topográfico
(Galvão, 1990)

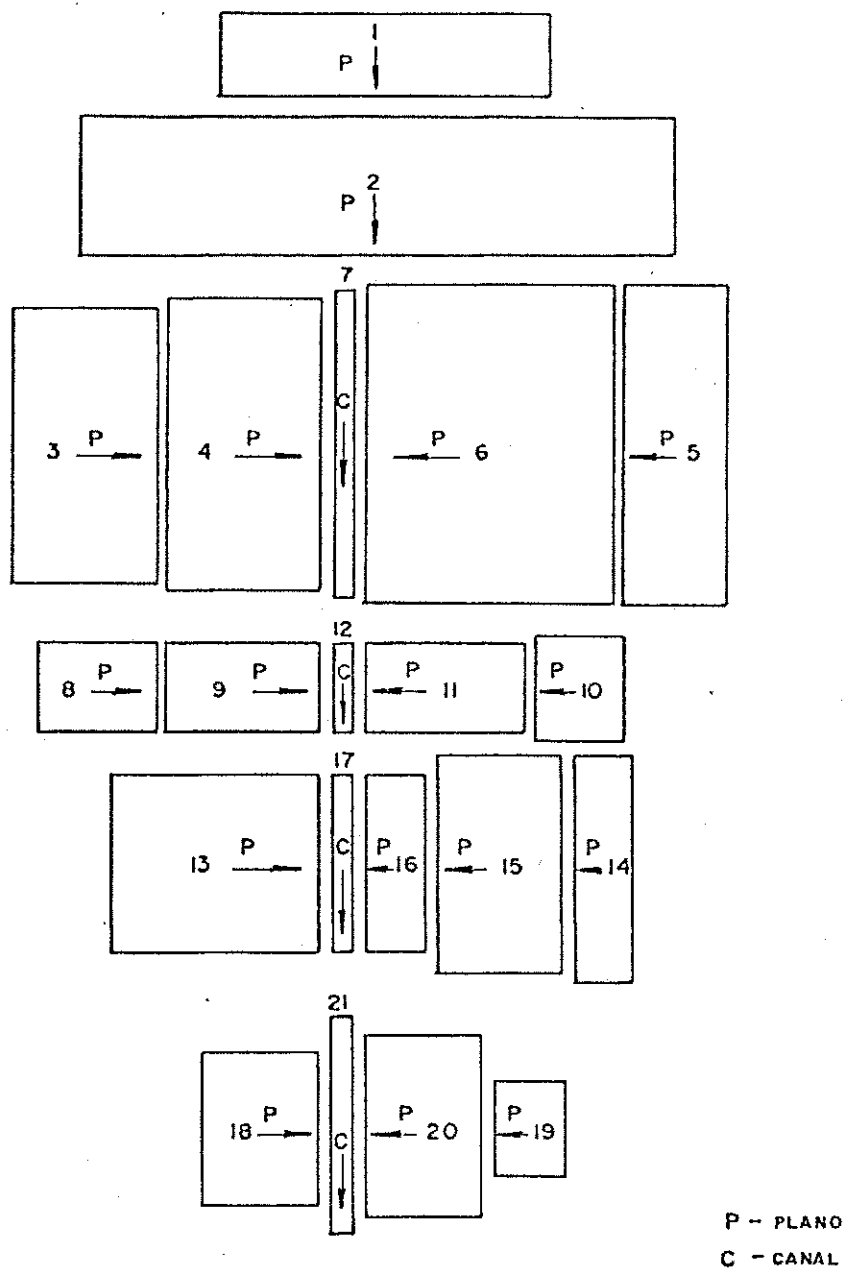


Figura 6.3 - Representação esquemática da microbacia 4 para o WESP (Galvão, 1990)

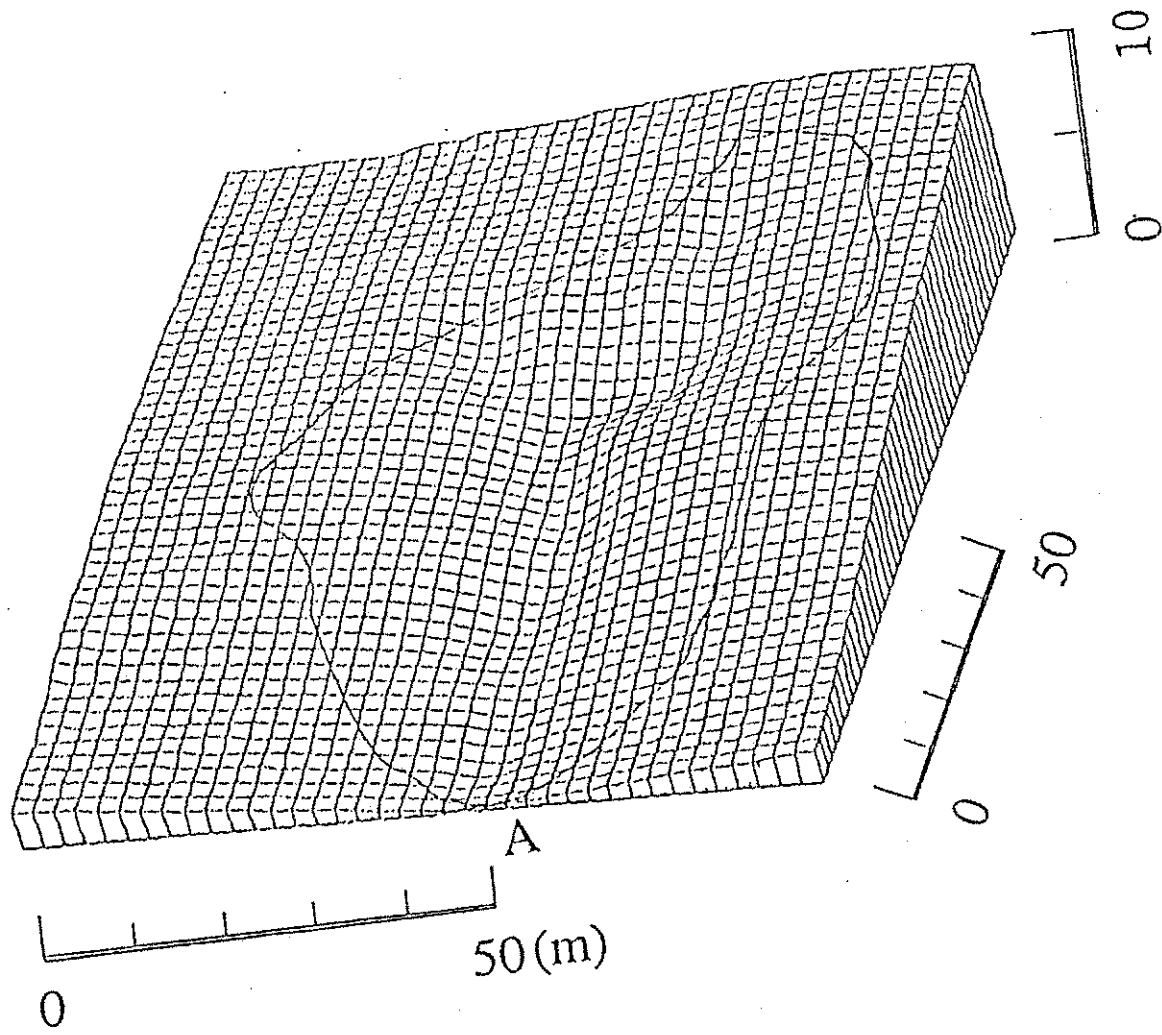


Figura 6.4 - Visualização tridimensional da microbacia 3 (Santos, 1994)

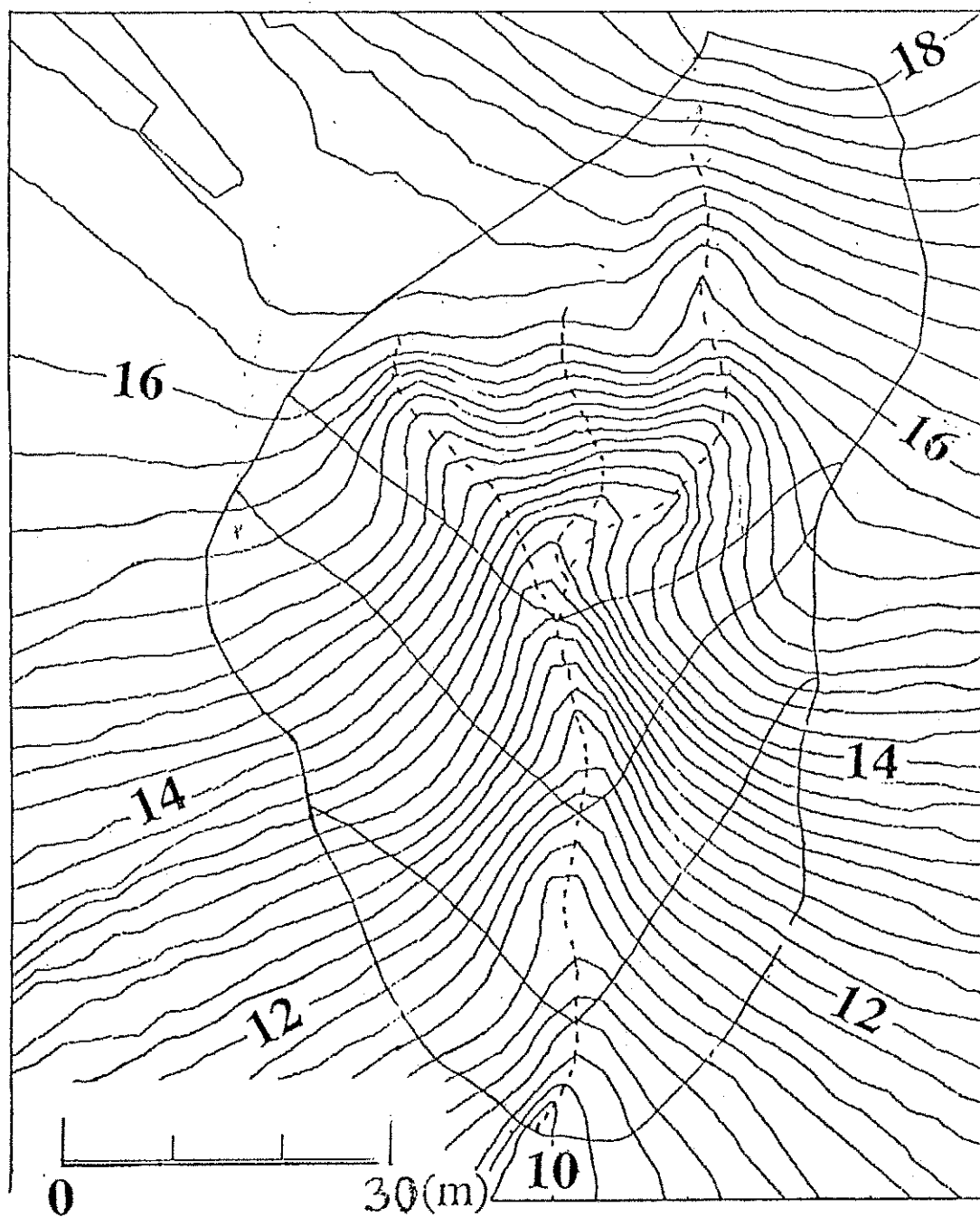


Figura 6.5 - Delineamento geométrico da microbacia 3 sobre o levantamento topográfico
(Santos, 1994)

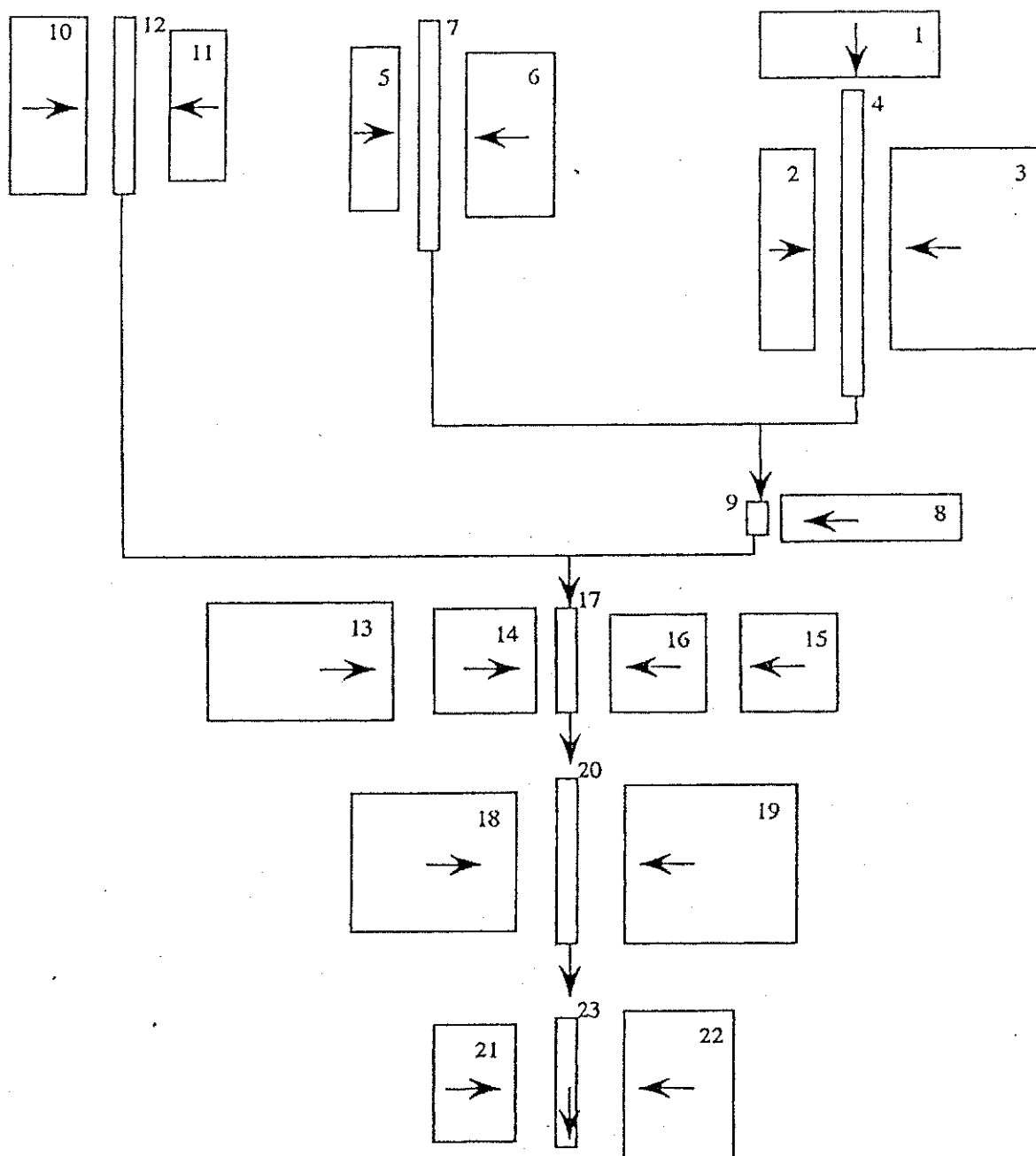


Figura 6.6 - Representação esquemática da microbacia 3 para o WESP (Santos, 1994)

Tabela 6.1 - Características físicas dos elementos da microbacia 4 para entrada no WESP (Galvão, 1990)

Elemento	Área (m ²)	Comprimento (m)	Largura (m)	Declividade	Base ¹ (m)	Inclinação ²
1	272,0	8,5	32,0	0,082		
2	812,0	14,0	58,0	0,079		
3	392,0	14,0	28,0	0,021		
4	450,0	15,0	30,0	0,013		
5	330,0	10,0	33,0	0,020		
6	780,0	24,0	32,5	0,035		
7	-	31,5	-	0,060	0,30	2:1
8	103,5	11,5	9,0	0,013		
9	135,0	15,0	9,0	0,007		
10	93,5	8,5	11,0	0,023		
11	139,5	15,5	9,0	0,053		
12	-	9,0	-	0,055	0,40	2:1
13	360,0	20,0	18,0	0,009		
14	119,6	5,2	23,0	0,020		
15	264,0	12,0	22,0	0,050		
16	99,0	5,5	18,0	0,020		
17	-	18,0	-	0,055	0,0	0,25:1
18	176,0	11,0	16,0	0,027		
19	65,0	6,5	10,0	0,033		
20	209,0	11,0	19,0	0,082		
21	-	22,5	-	0,058	0,0	0,25:1

(1) Dimensão da base da seção transversal do canal
(2) Inclinação laterais da seção transversal do canal. Relação entre a dimensão vertical sobre a horizontal

Tabela 6.2 - Sequência de cálculo e posição relativa dos elementos da microbacia 4
(Galvão, 1990)

Elemento	Plano Antecedente			Canal antecedente	
	Superior	Esquerda	Direita	1	2
1	0				
2	1				
3	0				
4	3				
5	0				
6	5				
7	2	6	4		
8	0				
9	8				
10	0				
11	10				
12	0	11	9	7	
13	0				
14	0				
15	14				
16	15				
17	0	16	13	12	
18	0				
19	0				
20	19				
21	0	20	18	17	

Tabela 6.3 - Características físicas dos elementos da microbacia 3 para entrada no WESP (Santos, 1994)

Elemento	Área (m ²)	Comprimento (m)	Largura (m)	Declividade	Base ¹ (m)	Inclinação ²
1	262,0	10,0	26,2	0,080	-	-
2	225,0	7,5	30,0	0,080	-	-
3	662,2	22,0	30,1	0,057	-	-
4	-	46,0	-	0,078	0,00	0,25:0,25
5	162,5	6,5	25,0	0,030	-	-
6	325,0	13,0	25,0	0,028	-	-
7	-	35,0	-	0,085	0,00	0,25:0,25
8	182,0	26,0	7,0	0,076	-	-
9	-	5,0	-	0,080	0,00	0,25:0,25
10	302,5	11,0	27,5	0,090	-	-
11	180,0	8,0	22,5	0,063	-	-
12	-	27,5	-	0,073	0,00	0,25:0,25
13	463,75	26,5	17,5	0,091	-	-
14	235,5	15,0	15,7	0,133	-	-
15	206,72	13,6	15,2	0,059	-	-
16	219,8	14,0	15,7	0,143	-	-
17	-	15,7	-	0,060	0,10	0,50:0,50
18	508,8	24,0	21,2	0,071	-	-
19	612,5	25,0	24,5	0,080	-	-
20	-	24,5	-	0,049	0,10	0,50:0,50
21	223,86	12,3	18,2	0,090	-	-
22	378,0	16,8	22,5	0,085	-	-
23	-	20,0	-	0,040	0,20	0,50:0,50

(1) Dimensão da base da seção transversal do canal
(2) Inclinação das laterais da seção transversal do canal. Relação entre a dimensão vertical sobre a horizontal.

Tabela 6.4 - Seqüência de cálculo e posição relativa dos elementos da microbacia 3
(Santos, 1994)

Elemento	Plano Antecedente			Canal Antecedente	
	Superior	Esquerda	Direita	1	2
1					
2					
3					
4	1	2	3		
5					
6					
7		5	6		
8					
9			8	4	7
10					
11					
12		10	11		
13					
14	13				
15					
16	15				
17		14	16	9	12
18					
19					
20		18	19	17	
21					
22					
23		21	22	20	

6.1.3 - Estimativa dos Parâmetros

Os modelos fundamentais parecem promissores para obtenção dos resultados próximos a realidade devido ao fato de que eles tentam modelar o processo físico que ocorre nas bacias através das relações fundamentais dos processos (Santos et al., 1995).

No modelo hidrodinâmico WESP a microbacia é discretizada em vários elementos de planos de escoamento (retangulares) e canais. Cada elemento é caracterizado por um conjunto de parâmetros próprios que são determinados através das características físicas dos elementos e os parâmetros de erosão e deposição. Na bacia Experimental de Sumé, alguns parâmetros que podem ser estimados a priori foram adotados ou pelas medições no campo ou pelos valores indicados na literatura conforme as condições físico-climáticas de Sumé. Restaram, então, quatro parâmetros a serem obtidos pelo processo de calibragem com os dados de escoamento superficial e erosão.

6.1.4 - Parâmetros Definidos a "Priori"

A identificação destes parâmetros e a forma de obtenção de cada um deles encontra-se relacionada a seguir:

a) tamanho característico dos sedimentos (d_s)

Simons e Senturk (1977) afirmam que a escolha do tamanho dos sedimentos representativo da mistura é arbitrária e diferentes critérios têm sido usados e recomendados na literatura. Eles apresentam uma variedade de critérios e métodos para escolha e determinação do diâmetro representativo a partir da sua curva de distribuição granulométrica. Neste trabalho foi utilizado o d_{50} , ou diâmetro mediano, definido como o diâmetro para o qual 50% da amostra em peso possui diâmetro menor. Este valor tem sido o mais utilizado para representar misturas de sedimentos. Simons e Senturk (1977) recomendam este diâmetro como a melhor aproximação para aplicação nas expressões de início de movimento, já que elas foram desenvolvidas utilizando material uniforme. As Figuras 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10 mostram as curvas granulométricas médias dos materiais coletados in loco das parcelas 1 e 4 e das microbacias 3 e 4, obtidos através de várias

amostras e onde são observados os diâmetros característicos correspondente a 0,50 mm e 0,60 mm, 0,57mm e 0,50 mm, respectivamente.

b) Peso específico da água (γ)

Assumido como 9779 N/m^3 , a 25°C , considerando esta a temperatura média aproximada nos eventos observados em Sumé, conforme (Streeter e Wylie 1982).

c) Peso específico dos sedimentos (γ_s)

Adotado como 2,650 vezes o peso específico da água, obtendo-se o valor de $25.914,35 \text{ N/m}^3$.

d) Aceleração da gravidade (g)

Adotado o valor de $9,81 \text{ m/s}^2$.

e) Viscosidade cinemática da água (ν)

Considerado o valor de $0,894 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, a 25°C (Streeter e Wylie 1982).

f) Coeficiente para a tensão de cisalhamento crítica (δ)

Segundo Galvão (1990), a formulação utilizada no WESP para τ_c é semelhante ao parâmetro tradicional de Shields, ou seja, $\delta = \tau_c / (\gamma_s - \gamma) \cdot d_s$. Para o fluxo turbulento completamente desenvolvido, o diagrama de Shields dá um valor de 0,060 para δ . Este valor tem sido extensivamente discutido por muitos pesquisadores. Raudkivi (1976), Simons e Senturk (1977) e ASCE (1975) apresentam uma discussão de várias tentativas realizadas na definição do valor de δ e ressaltam as simplificações adotadas em cada uma delas e a disparidade dos resultados. Dentre elas, a equação de Chepil, apresentada por Raudkivi (1976), fornece:

$$\tau_c = 0,66 \cdot N \cdot \text{tg}\alpha \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot d_s / (1 + 0,85 \cdot \text{tg}\alpha) \quad (6.1)$$

onde

N é o fator de correção, estimado em 0,2 por Chepil

α é o ângulo de repouso das partículas, estimado em 24° , e as outras variáveis são as mesmas já descritas no capítulo 4. Aplicando na equação 4.35 o valor calculado de τ_c , encontramos um valor de 0,043 para δ .

GRANULOMETRIA

Peneiras (ASTM)

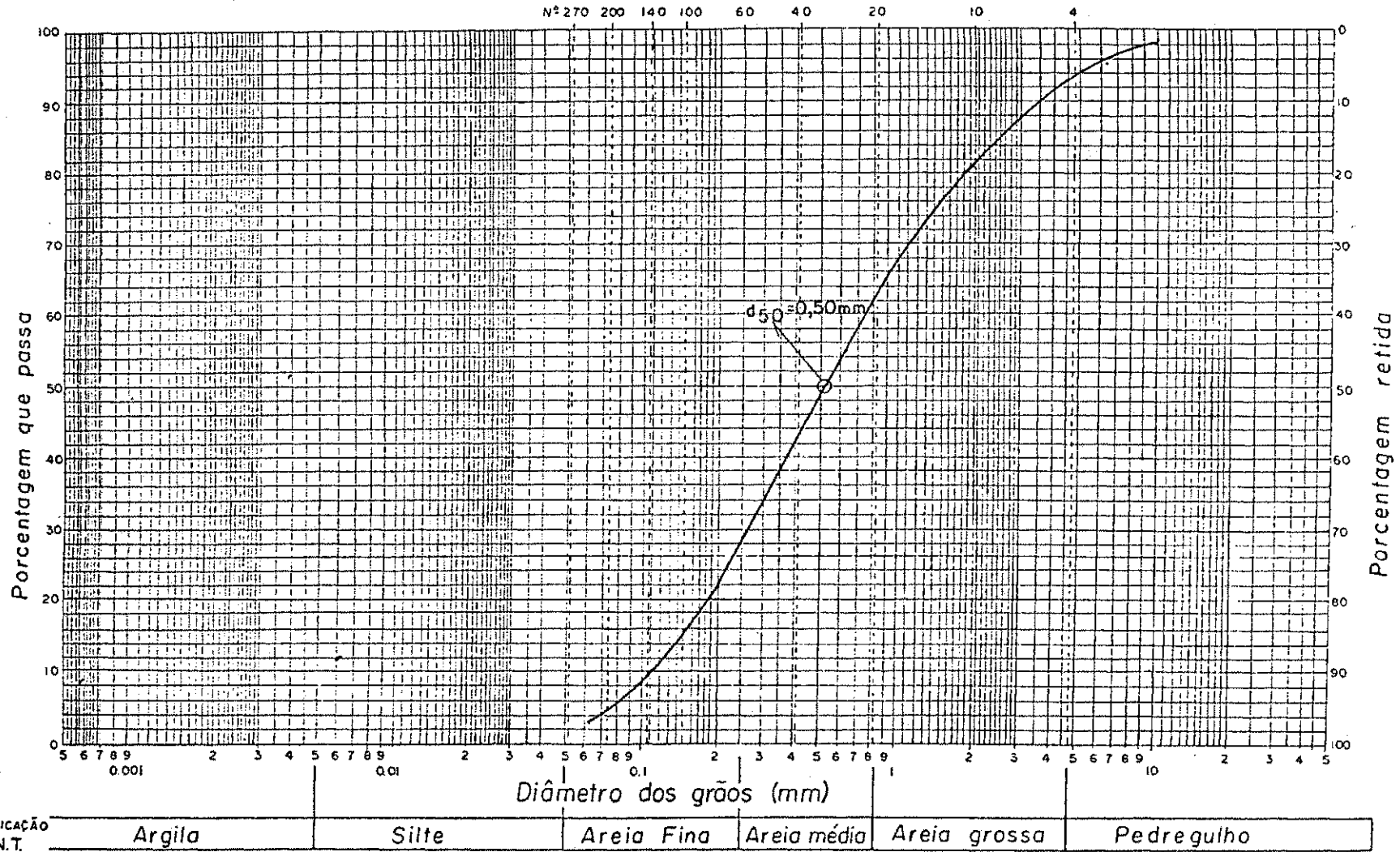
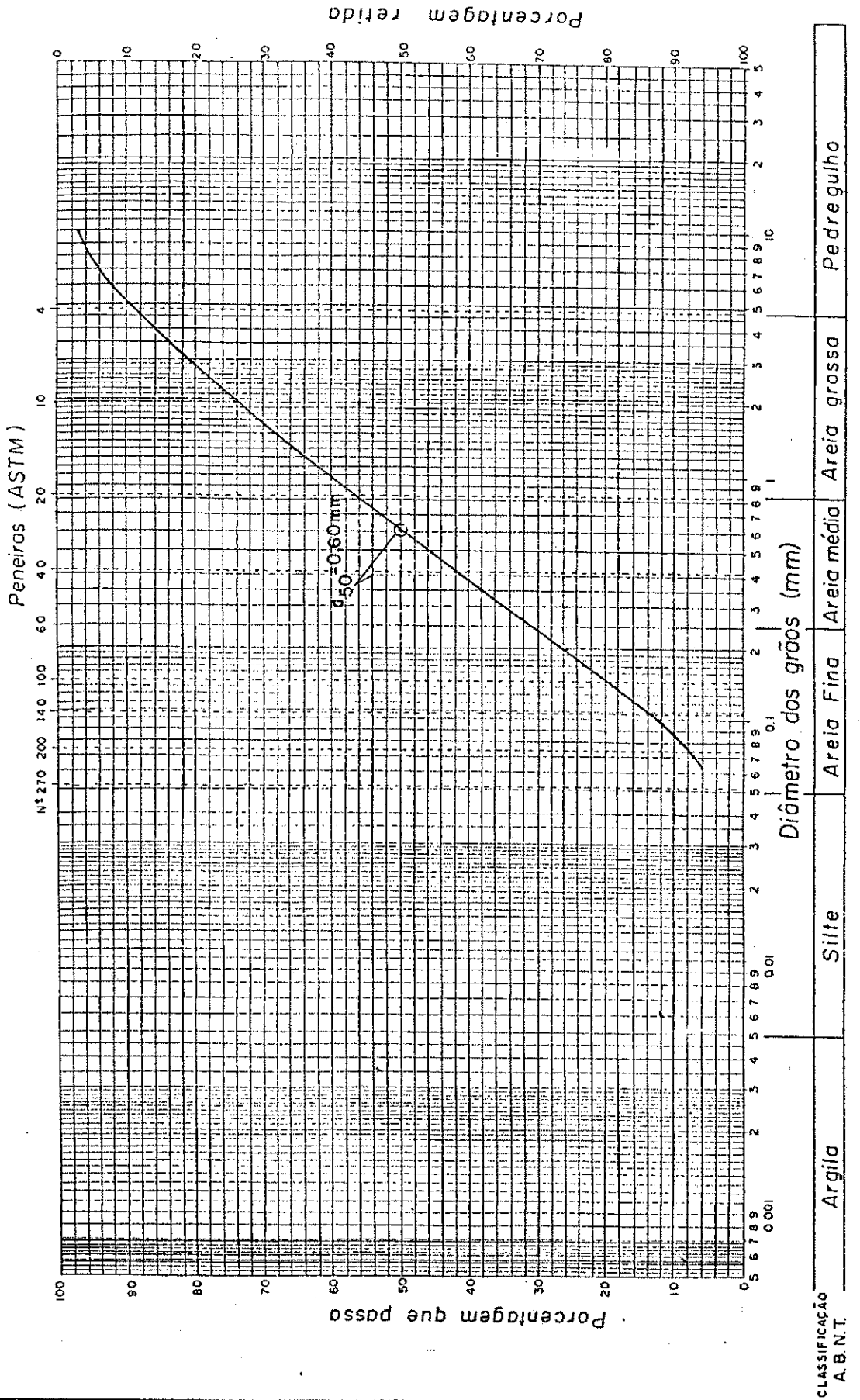


Figura 6.7 - Curva granulométrica do solo amostrado na parcela 1

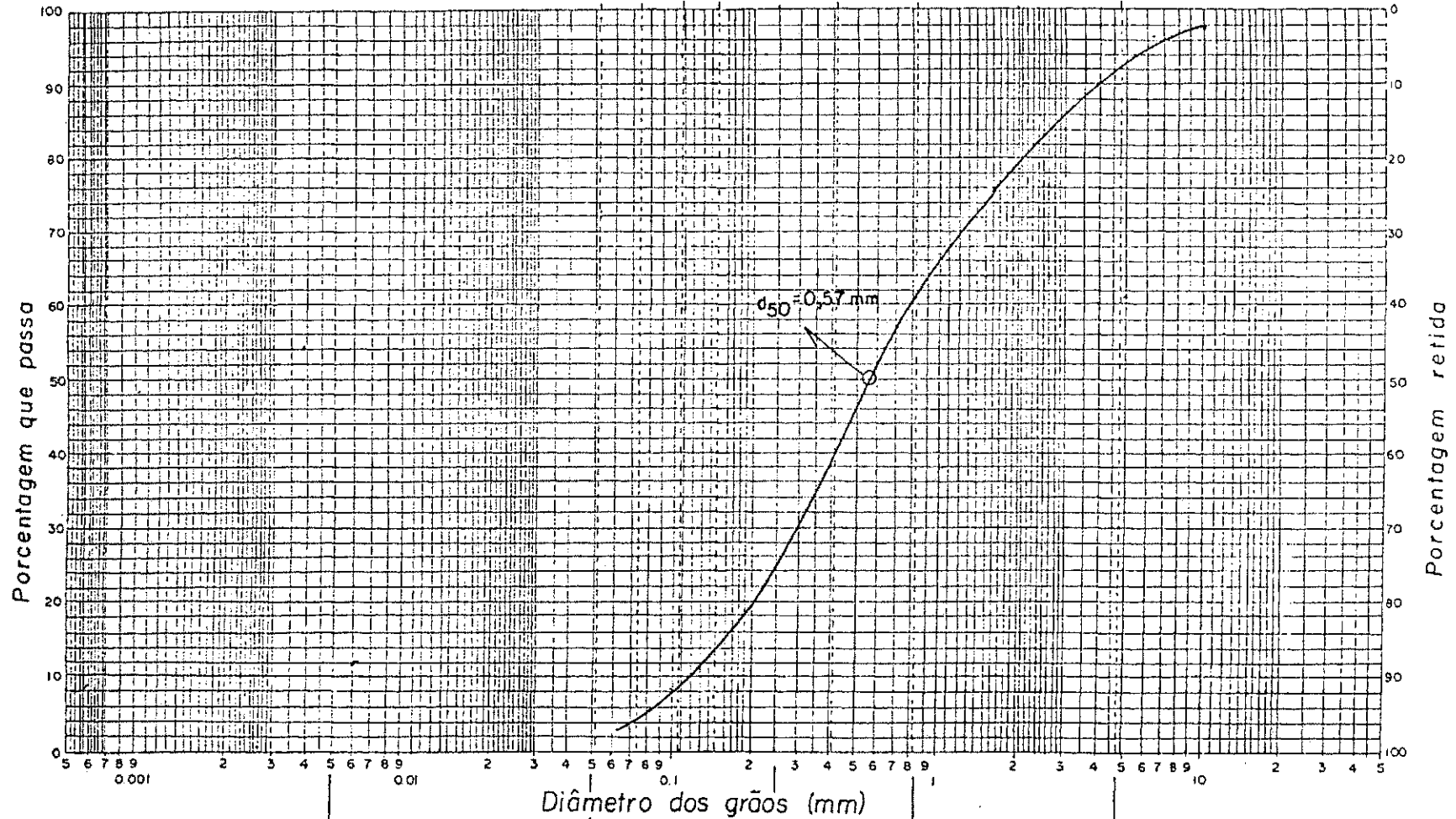
GRANULOMETRIA



GRANULOMETRIA

Peneiras (ASTM)

Nº 270 200 140 100 60 40 20 10 4



CLASSIFICAÇÃO
A. B. N. T.

Argila

Silte

Areia Fina

Areia média

Areia grossa

Pedregulho

Figura 6.9 - Curva granulométrica do solo amostrado na microbacia 3

GRANULOMETRIA

Peneiras (ASTM)

Nº 270 200 140 100 60 40 20 10 4

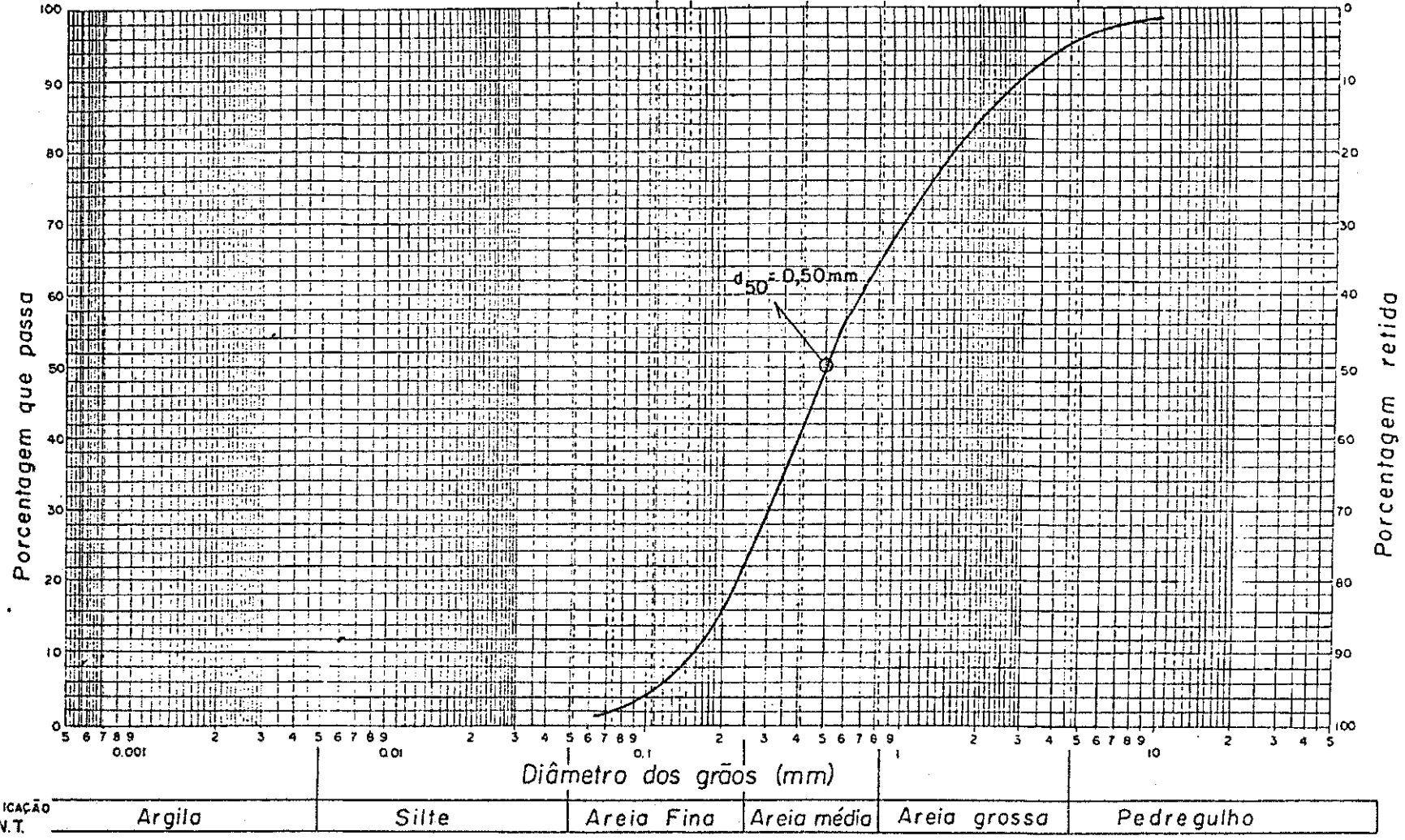


Figura 6.10 - Curva granulométrica do solo amostrado na microbacia 4

Simons e Senturk (1977) aplicam a fórmula de transporte de sedimentos de Meyer-Peter, considerando uma seção suficientemente larga e leito plano para determinar a tensão crítica:

$$\gamma_s \cdot d \cdot S = \tau_c = 0,047 \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot d_s + 0,25 \cdot (\gamma/g)^{1/3} \cdot q_s^{2/3} \quad (6.2)$$

onde

d é a profundidade do fluxo,

q_s é a carga de sedimento transportada, e

as outras variáveis são as mesmas já descritas no capítulo 4.

Na condição crítica, $q_s = 0$, o que dá:

$$\tau_c / (\gamma_s - \gamma) \cdot d_s = 0,047 \quad (6.3)$$

Gessler, citado por Galvão (1990), apresenta uma correção do diagrama de Shields onde o valor de δ para o trecho turbulento fica próximo do obtido pela fórmula de Meyer-Peter.

Lopes (1987) utilizou o valor de 0,047 para δ nos testes realizados no desenvolvimento do WESP. Baseando-se na discussão anterior, decidiu-se pela adoção deste valor também para o caso de Sumé.

g) Parâmetro de deposição para os planos (ϵ_p)

Lopes (1987) cita como única referência para a escolha deste parâmetro o estudo de Davis (1978). Não encontrou-se outros estudos na literatura e decidiu-se adotar o mesmo valor igual a 0,5.

h) Parâmetro de deposição para os canais (ϵ_c)

Adotou-se 1,0, baseado no estudo de Einstein (1968) e recomendado por Lopes (1987).

i) Coeficiente de Manning para os planos (n_p)

Segundo Galvão (1990), este coeficiente poderia ser obtido pelo ajuste do hidrograma observado, como foi realizado, por Lopes (1987). Já que, com as instalações nas parcelas de Sumé não é possível estabelecer o hidrograma, mas apenas o volume

total escoado no evento, o valor de n_p teve de ser adotado com base nas informações da literatura. Considerando o tipo de solo de Sumé e a sua composição granulométrica, adotou-se o valor de 0,02, a partir de Woolhiser (1975) e Liang et al. (1989).

j) Coeficiente de Manning para os canais (n_c)

Uma vez que não se dispõe de medições sobre este coeficiente em Sumé, seu valor foi adotado da literatura. Chow (1959) indica para pequenos cursos d'água a faixa entre 0,025 a 0,033 (valor normal 0,030), quando retos e limpos. Adotou-se o valor de 0,030.

k) Condutividade hidráulica saturada (K_s)

Para estimativa da condutividade hidráulica saturada K_s , tem-se o resultado de um ensaio de infiltração sob carga constante, relatado por Audry et al (1987) e Molinier et al (1988). Audry (ORSTOM), que conduziu esses ensaios, recomendou a Galvão (1990), em comunicação pessoal, um valor entre 2,5 e 5,0 mm/h para o caso das chuvas naturais.

Para verificar o comportamento do modelo com diferentes valores de K_s foram realizadas simulações com vários eventos em diferentes condições antecedentes de umedecimento do solo para a parcela 4, calibrando-se o potencial de capilaridade N_s , com o objetivo de avaliar o mais coerente valor de K_s . Os resultados não evidenciaram qualquer tendência para os valores de K_s testados. Definiu-se então o valor de 5,0 mm/h Galvão (1990).

6.1.5 - Parâmetros Otimizados

Apenas quatro parâmetros foram mantidos para fins de calibração a serem ajustados através do método das tentativas, adotando-se aqueles que forneciam os valores calculados para o escoamento e para a erosão mais próximos dos valores observados nas parcelas 1 e 4, e microbacia 4. Foram eles:

N_s - parâmetro de infiltração (relacionado com a frente de molhamento) (mm)

K_i - Fator de erodibilidade por impacto de chuva (kg.s/m^4)

K_r - parâmetro de erodibilidade do solo pelo fluxo superficial nos planos ($\text{kg.m/N}^{1.5}.\text{s}$)

"a" - parâmetro de erodibilidade do solo pelo fluxo superficial nos canais ($\text{kg.m}^2/\text{N}^{1.5}.\text{s}$).

Segundo Galvão (1990), baseando-se nas simulações de vários eventos na parcela 4 e na microbacia 4, o valor do parâmetro de erodibilidade nos planos pelo impacto das gotas de chuva K_i mostrou-se pouco sensível no modelo e foi então fixado em $5 \times 10^8 \text{ kg.s/m}^4$. Santos (1994) utilizando o método de otimização de POWELL, também observou que o parâmetro K_i era bastante insensível, conforme a figura 6.11. Por isso, no presente trabalho também foi adotado o valor de $5 \times 10^8 \text{ kg.s/m}^4$ para o parâmetro K_i .

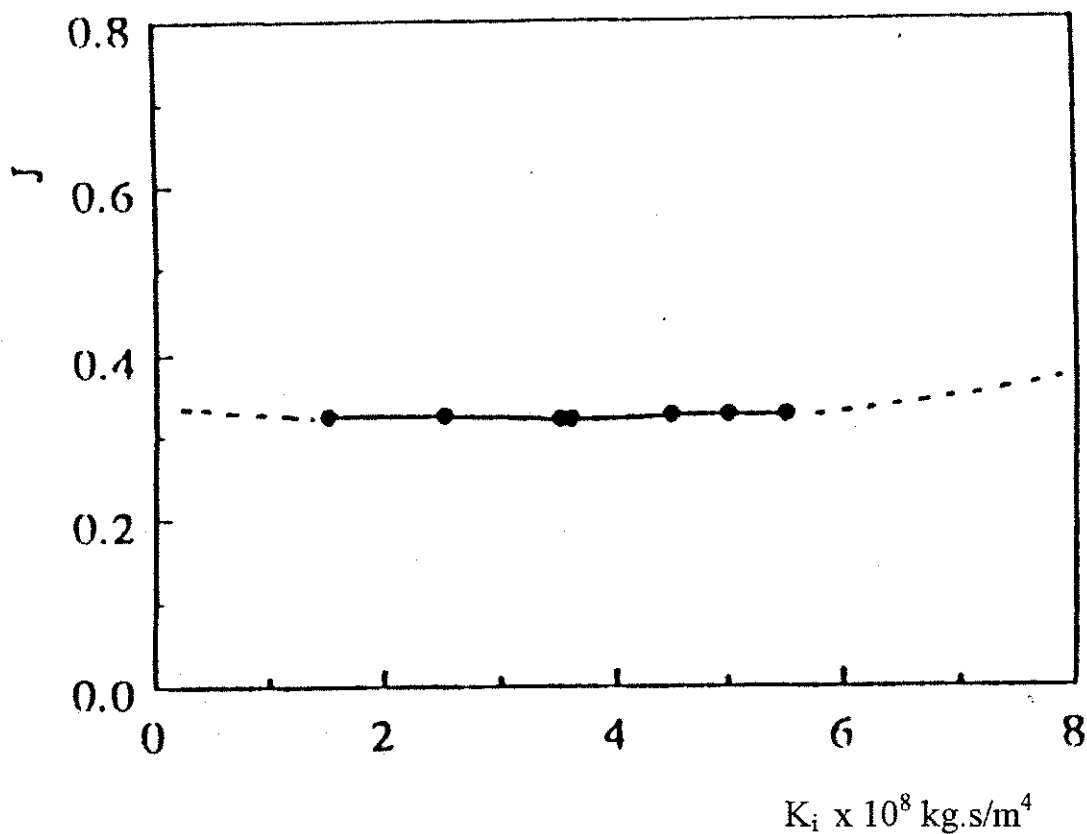


Figura 6.11 - A variação da função objetivo do modelo WESP em relação ao parâmetro K_i (Santos, 1994)

6.2 - A Metodologia Utilizada para a Calibração

A maioria dos modelos precisam ser calibrados para obtenção dos valores dos parâmetros envolvidos. Quando uma técnica de otimização dos parâmetros não é incorporada ao modelo, o processo de calibragem é realizado por tentativas, o que exige muita paciência e alguma intuição (Santos et al., 1995).

Os dados das parcelas 1 e 4 foram utilizados neste trabalho para obter o valor do parâmetro K_r . Para este fim foram inicialmente selecionados os eventos ocorridos entre 1987 a 1990, mas só foram considerados aqueles que tinham dados disponíveis em ambas as parcelas. A tabela 6.5 mostra 38 eventos ocorridos no período de 1987 a 1990 com dados de lâmina e erosão observadas nas parcelas 1 e 4.

O processo de simulação dos eventos para as parcelas se iniciou com a calibragem do parâmetro de infiltração N_s , durante a qual procurou-se obter os valores da lâmina calculada pelo modelo muito próximo à observada no campo para o evento. Em seguida, procedeu-se com o processo de calibragem do parâmetro de erodibilidade nos planos K_r .

Os parâmetros N_s e K_r obtidos pela calibração nos eventos individuais nas parcelas 1 e 4 foram convertidos em valores médios entre as parcelas para obter uma série representativa destes parâmetros para os 38 eventos. Foi observada uma variação relativamente grande nos valores de N_s e K_r dentro da série. Este fato também foi apontado por Galvão (1990) e Santos (1994), ficando claro que estes parâmetros variam entre os eventos devido à variação nas condições do solo nas parcelas. O fator principal da variação entre os eventos seria a umidade no solo e por este motivo tentou-se associar os valores de N_s e K_r de cada evento com algum índice representativo da umidade do solo. Para este fim, foram testados três índices diferentes.

Os índices testados foram: "IH" - índice de umidade de Kohler (Gomes et al., 1987) definida pela relação $IH = K(IH_{i-1} + P_{i-1})$ em que K é um redutor com valor entre 0,7 e 1,0, IH_{i-1} e P_{i-1} sendo o índice de umidade e a precipitação do dia anterior; o segundo índice foi "PASD" - a precipitação total acumulada para os últimos cinco dias anteriores ao evento; o terceiro foi "NDAC" - o número de dias anteriores ao evento sem

a ocorrência de chuva. A tabela 6.6 apresenta os valores destes índices para os 38 eventos.

Para a calibragem do modelo WESP na microbacia 4, discretizado em planos e canais, os parâmetros K_i e K_r das parcelas foram admitidos. Assim, apenas os parâmetros de infiltração N_s e de erodibilidade em canais "a", foram calibrados para cada evento. O uso dos parâmetros de erodibilidade nos planos K_i e K_r para microbacia obtidos com base nos parâmetros calibrados para as parcelas 1 e 4 foi baseado nas características das condições do solo da superfície entre as parcelas e a microbacia 4, como mostram as tabelas 5.1 e 5.2. O parâmetro K_i para os planos da microbacia foi o mesmo valor fixado para as parcelas. A determinação de K_r para os planos da microbacia 4 foi obtida através de dois procedimentos, utilizando os valores de N_s e K_r para as parcelas 1 e 4, conforme a tabela 6.6. O primeiro procedimento foi utilizar um valor médio de K_r da série obtida nas parcelas e aplicá-lo para todos os eventos na microbacia 4. O segundo visava obter uma relação funcional empírica que possa obter o valor de K_r para cada evento, através do parâmetro de infiltração N_s .

A parte final desse trabalho foi utilizar os parâmetros calibrados na microbacia 4 pelos dois procedimentos e extrapolá-los à microbacia 3 para os mesmos eventos. Essa extrapolação seria plenamente justificável devido ao fato das microbacias estarem localizadas bem próximas, como mostra a figura 5.4; possuem o mesmo tipo de solo e características hidrodinâmicas, serem desmatadas e sofrerem a ação dos mesmos eventos pluviométricos. Suas descrições encontram-se na tabela 5.1 e as diferenças entre as microbacias 3 e 4 estão basicamente na granulometria, declividade e rede de drenagem.

Os resultados obtidos com a aplicação desta metodologia são apresentados a seguir.

6.3 - Verificação da Variação dos parâmetros N_s e K_r com a umidade do solo

Galvão (1990) e Góes (1993) verificaram uma variação bastante significativa do parâmetro de infiltração N_s , na aplicação do modelo WESP em parcelas da Bacia Experimental de Sumé, o que era esperado pois o modelo executa a simulação individualmente e não considera as condições de umidade do solo antecedentes ao

evento. Sendo N_s o parâmetro básico no cálculo do escoamento superficial, uma relação de N_s com algum fator físico possibilitaria sua estimativa para futuros eventos.

Santos (1994) observou uma variação considerável de N_s , e encontrou uma relação gráfica entre N_s e o número de dias anteriores ao evento sem ocorrência de chuva, conforme a figura 3.3. Ele enfatizou que esta relação precisava de uma confirmação com um maior número de eventos. Com base nessas informações procurou-se neste trabalho uma análise da variação não só do parâmetro N_s como também do parâmetro de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial K_r , com fatores físicos relacionados às condições de umidade do solo, através dos índices apresentados na secção 6.2.

As figuras 6.12, 6.13 e 6.14 mostram o parâmetro de infiltração N_s plotados com os índices relacionados com a umidade do solo. Foi também verificada a variação de K_r , com os mesmos índices, conforme mostrado nas figuras 6.15, 6.16, 6.17. Em todos os casos apesar do fato de que uma tendência geral podia ser demonstrada, a dispersão dos pontos foi grande e o ajuste de qualquer tipo de função analítica seria muito precária, e, assim, não foi possível encontrar nenhuma relação adequada entre N_s e K_r e os índices de umidade.

Segundo Srinivasan e Galvão, (1994) os parâmetros N_s e K_r guardam uma certa relação com as condições de umidade do solo antecedentes ao evento. Como a erosão está relacionada ao escoamento superficial (lâmina) que, por sua vez, é afetada pelo parâmetro N_s , foi então analisado uma possível relação entre K_r e N_s na qual se verificou uma possível tendência. Essa relação, que pode ser representada pela função $K_r = 1,7305.(N_s)^{-0,1559}$, é mostrada na figura 6.18.

6.3.1 - Determinação do Parâmetro de Erosão nos Planos K_r , para Microbacia 4

Como a microbacia 4 apresenta os processos de planos e canais, conforme a figura 6.3, o parâmetro de erodibilidade nos planos K_r , deve ser definido inicialmente, para que apenas o parâmetro de erodibilidade para os canais "a" seja calibrado na microbacia além do parâmetro de infiltração N_s . A calibragem de N_s seria feita com os

dados de escoamento superficial, enquanto que a calibragem de "a" seria feita com os dados de erosão.

Com os parâmetros N_s e K_r , estabelecidos para cada evento nas parcelas 1 e 4 de 100 m², a escolha de K_r para a microbacia 4 foi estabelecida através de dois procedimentos, citados anteriormente, isto é, utilizar a média dos valores de K_r para as parcelas 1 e 4, que forneceu um valor de (1,6313 kg.m/N^{1.5}.s), conforme tabela 6.7, e obter o valor de K_r pela relação funcional $K_r = 1,7305.(N_s)^{-0,1559}$, a partir do valor de N_s determinado para cada evento na microbacia 4, conforme a tabela 6.8.

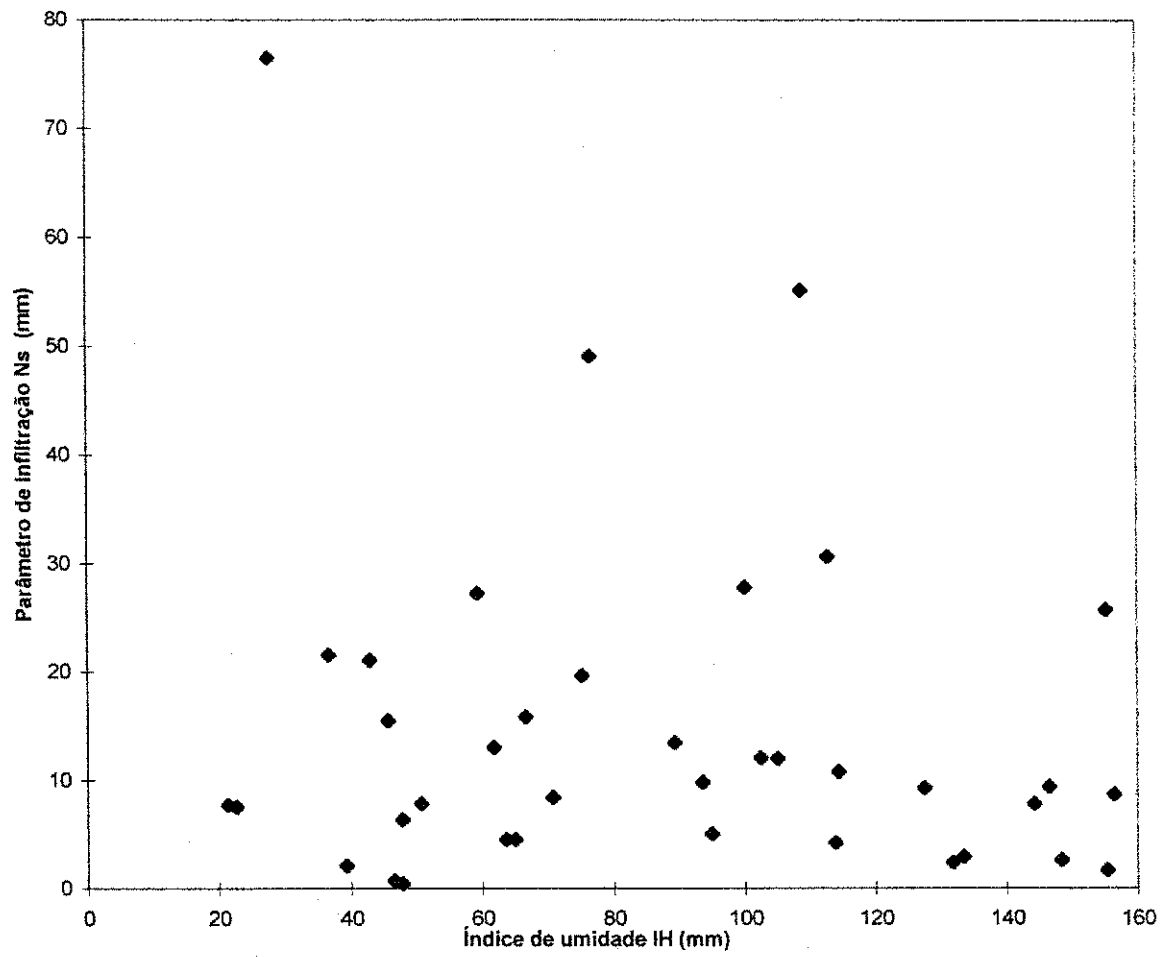


Figura 6.12 - Relação entre o parâmetro de infiltração N_s e o índice de umidade IH.

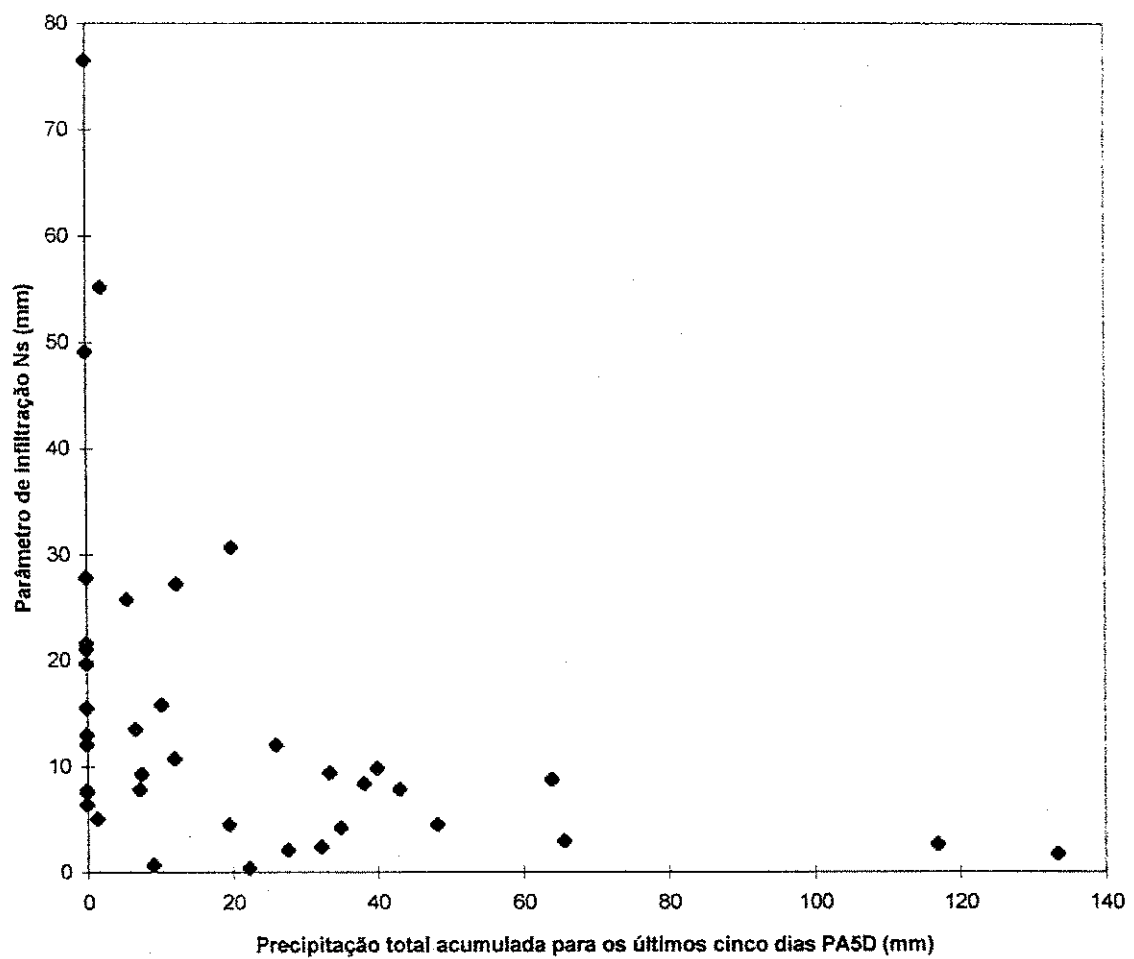


Figura 6.13 - Relação entre o parâmetro de infiltração N_s e a precipitação acumulada para os cinco dias anteriores ao evento.

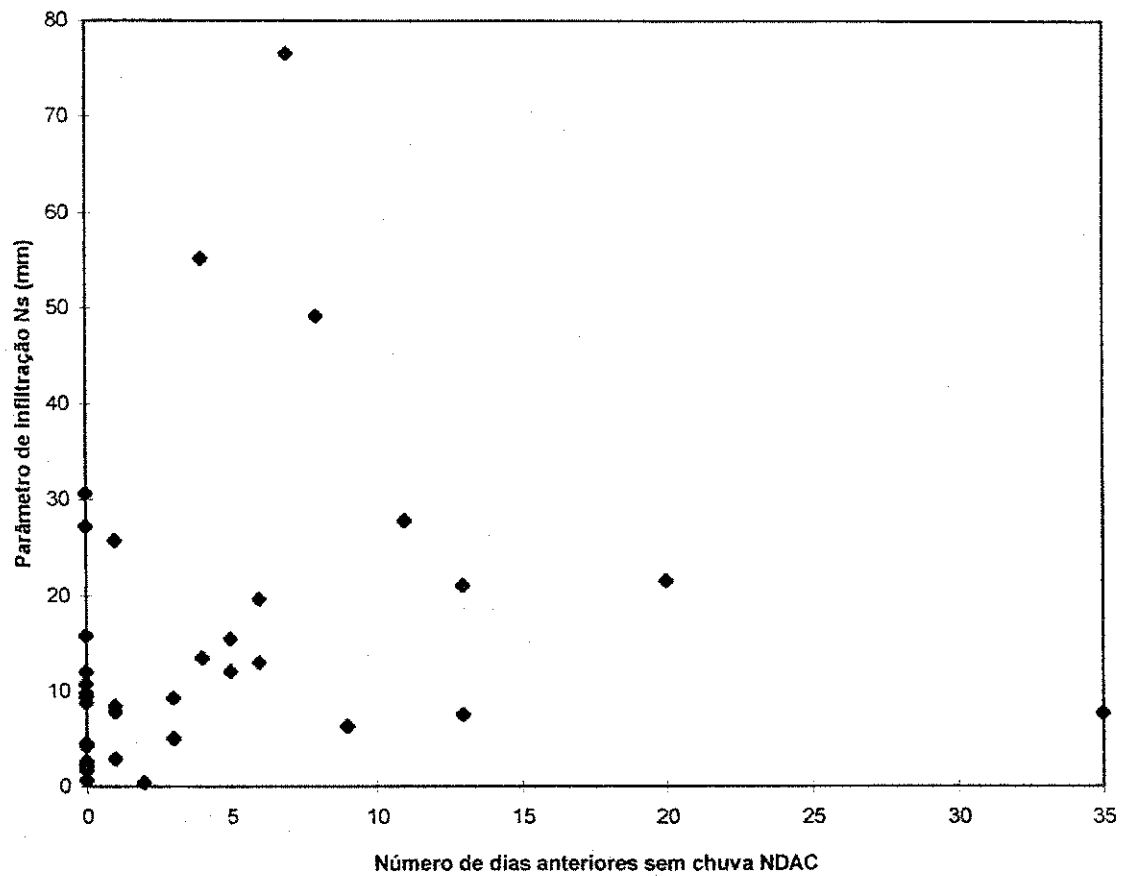


Figura 6.14 - Relação entre o parâmetro de infiltração N_s e número de dias anteriores ao evento sem ocorrência de chuva NDAC.

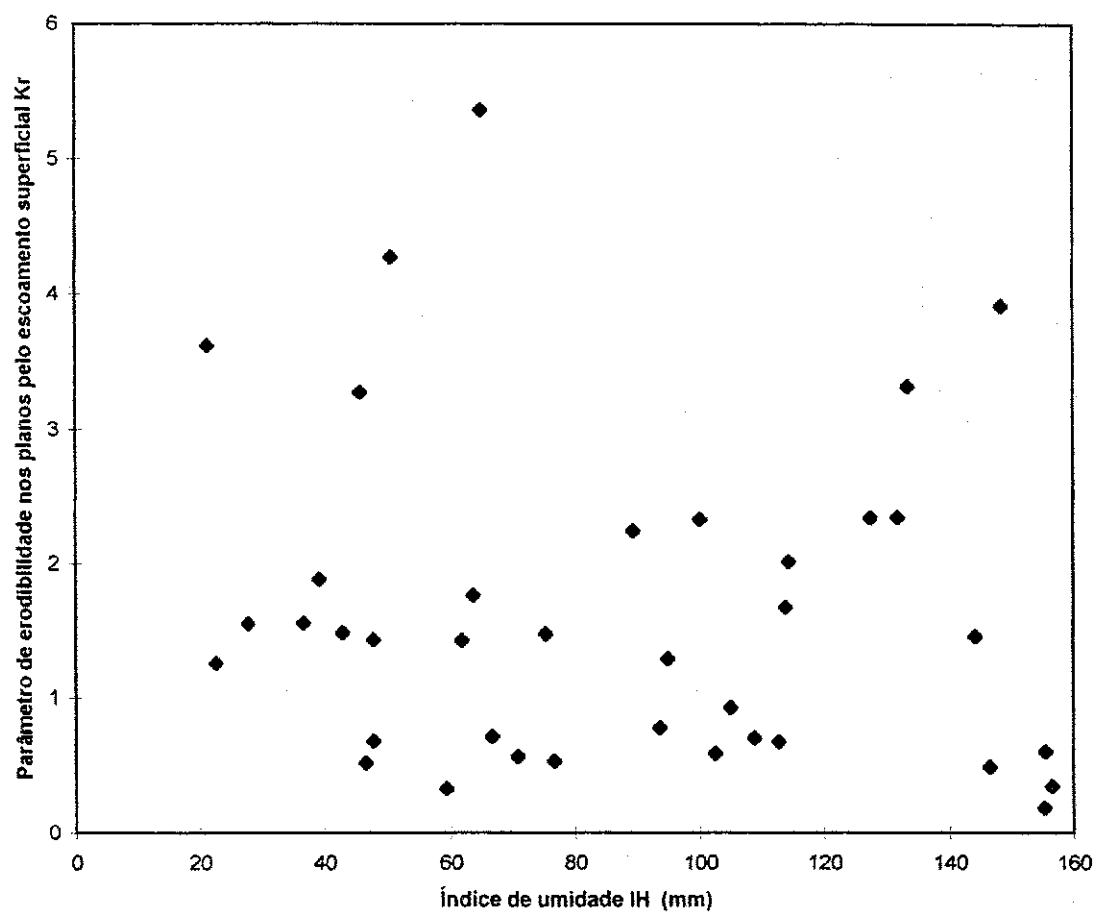


Figura 6.15 - Relação entre o parâmetro de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial K_r com o índice de umidade IH

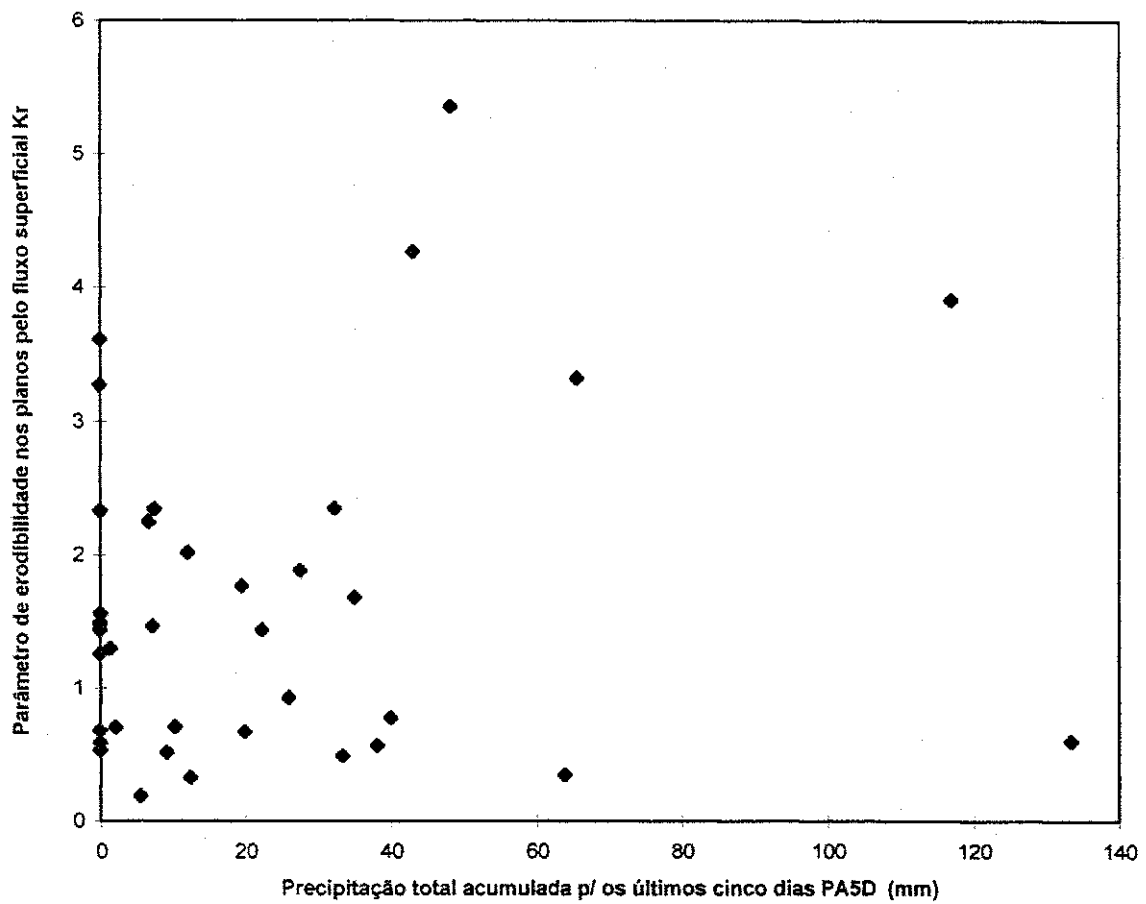


Figura 6.16 - Relação entre o parâmetro de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial K_r com a precipitação acumulada para os últimos cinco dias anteriores ao evento PA5D.

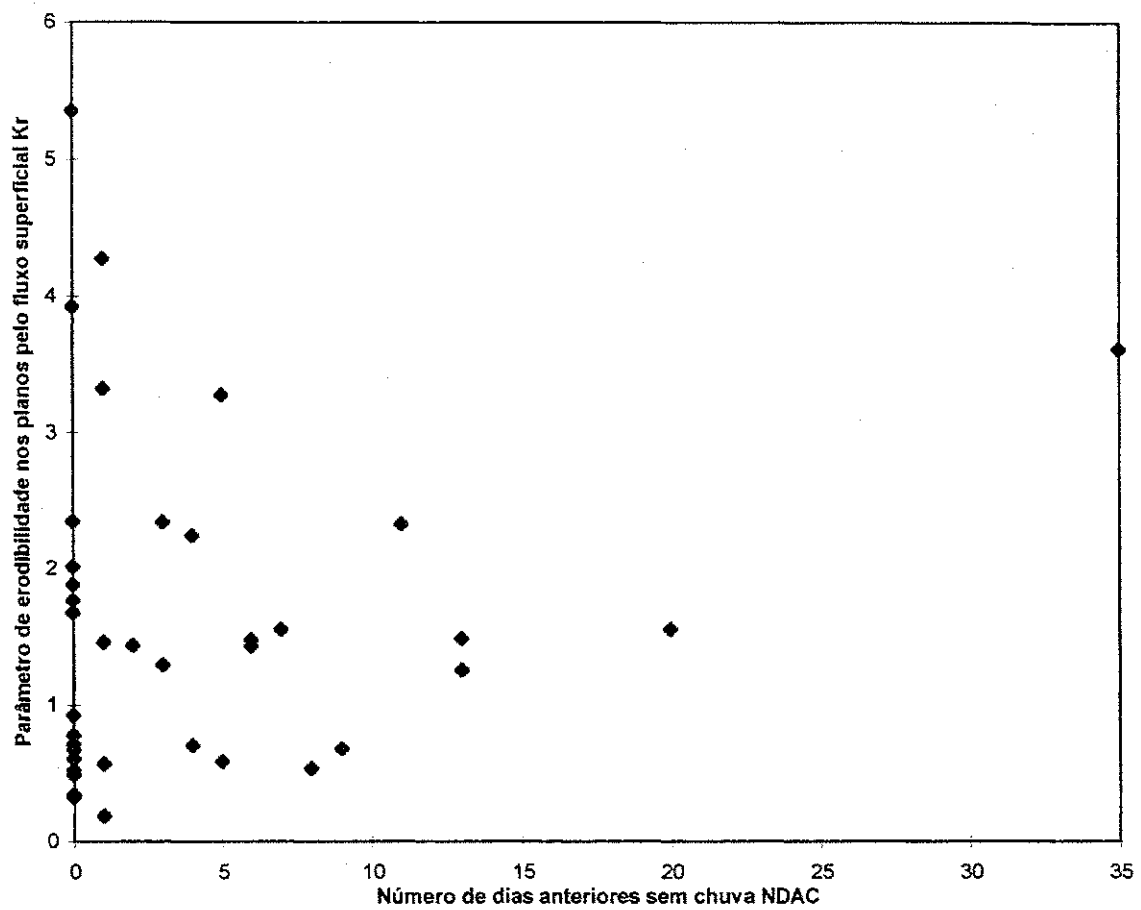


Figura 6.17 - Relação entre o parâmetro de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial K_r com o número de dias anteriores sem chuva NDAC.

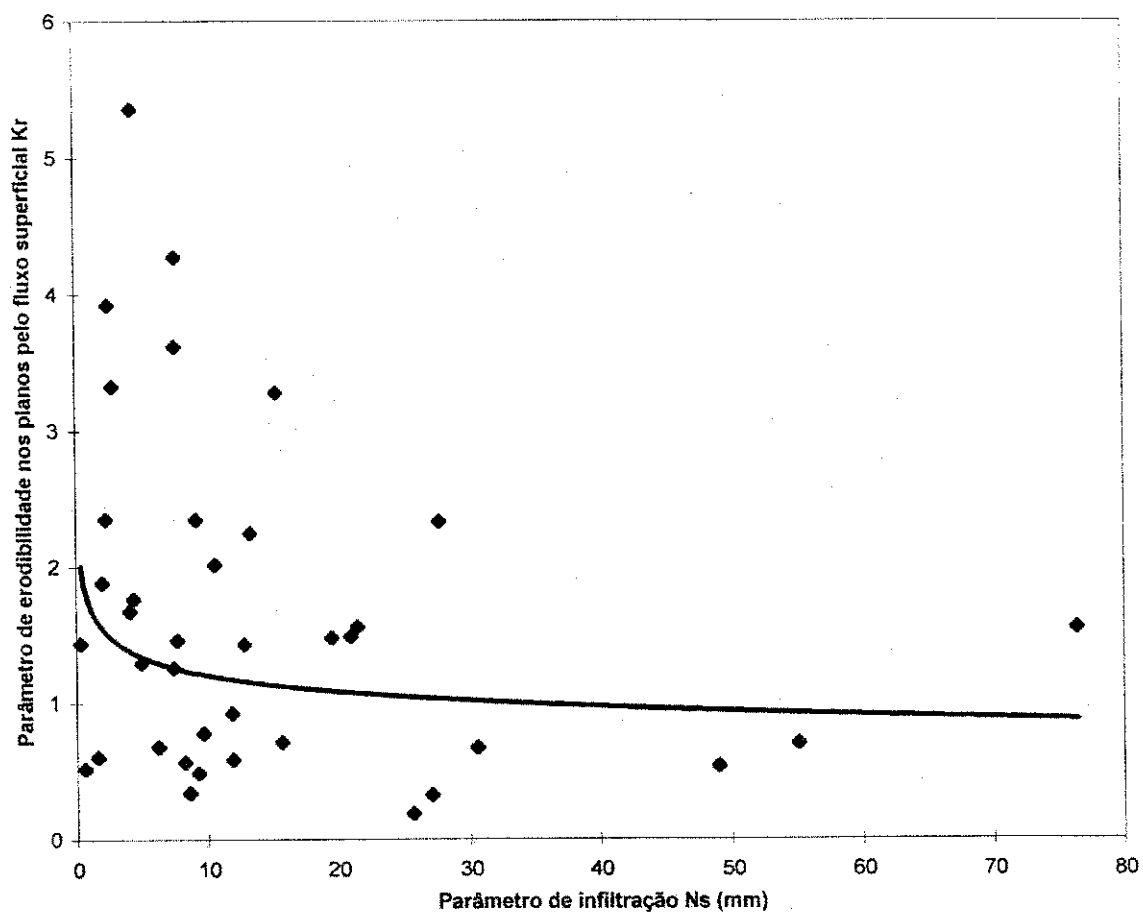


Figura 6.18 - Relação entre o parâmetro de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial K_r com o parâmetro de infiltração N_s .

Tabela 6.5 - Calibração dos parâmetros de infiltração e erosão nas parcelas 1 e 4.

DATA	K_{r1}	N_{S1}	L_{O1}	L_{C1}	E_{O1}	E_{C1}	K_{r4}	N_{S4}	L_{O4}	L_{C4}	E_{O4}	E_{C4}
12/02/87	7,9529	7,04	1,751	1,751	3,470	3,470	0,5892	8,530	1,344	1,344	2,92	2,92
3/03/87	0,6296	17,53	17,071	17,070	14,45	14,44	0,7964	14,095	18,143	18,143	30,18	30,18
9/03/87	1,0854	12,8	1,341	1,341	0,790	0,790	1,7834	13,13	1,300	1,300	2,28	2,28
12/03/87	1,4316	3,035	1,302	1,302	0,680	0,670	2,1022	5,92	0,636	0,636	0,49	0,49
28/03/87	0,3105	20,14	25,727	25,725	38,70	38,70	1,0979	90,17	14,777	14,776	72,11	72,11
2/05/87	4,4466	19,68	4,500	4,500	10,820	10,820	2,0986	11,25	6,429	6,429	15,83	15,84
29/06/87	2,3721	2,024	1,269	1,269	1,320	1,320	1,3974	2,109	1,203	1,203	1,29	1,29
20/01/88	1,6851	64,62	7,694	7,694	16,420	16,420	1,423	88,35	5,695	5,695	15,20	15,20
14/02/88	0,6011	42,688	44,829	44,829	69,050	69,051	0,4685	55,495	41,805	41,805	73,51	73,51
10/03/88	0,7749	15,188	3,984	3,985	4,510	4,510	0,4026	8,91	5,345	5,344	2,22	2,21
14/03/88	1,6667	2,091	7,092	7,092	27,230	27,230	1,3401	3,673	6,249	6,249	30,29	30,29
15/03/88	0,3734	8,514	21,841	21,840	36,38	36,38	0,3169	8,895	21,676	21,675	42,99	42,97
21/03/88	1,914	6,505	12,868	12,868	38,60	38,60	1,0126	9,09	11,825	11,825	32,33	32,33
24/03/88	0,3362	7,048	13,129	13,128	23,75	23,74	0,6454	11,72	11,933	11,932	43,00	43,00
5/04/88	3,1373	26,211	8,820	8,820	44,05	44,05	1,5242	29,4	8,292	8,292	35,68	35,67
8/04/88	0,7581	9,88	7,939	7,939	14,630	14,620	1,0929	14,12	7,012	7,013	25,15	25,13
13/04/88	0,6516	17,392	18,596	18,596	43,66	43,66	0,6962	43,89	13,871	13,871	42,14	42,14
19/04/88	2,1175	5,476	12,868	12,868	33,540	33,540	1,914	15,97	8,740	8,740	28,89	28,89
20/04/88	2,0004	3,809	1,464	1,464	1,350	1,350	1,3587	4,58	1,266	1,266	1,27	1,27
22/04/88	2,7437	0,763	13,782	13,782	21,690	21,690	1,9535	3,945	10,625	10,625	19,87	19,87
6/05/88	1,5728	5,193	8,042	8,042	16,240	16,240	1,0209	4,9	8,136	8,136	19,00	19,00
9/07/88	2,3373	12,414	29,390	29,390	33,700	33,700	0,6237	26,85	24,339	24,340	52,18	52,18
1/03/89	1,5124	7,25	8,102	8,107	17,104	17,104	1,0079	7,79	7,960	7,960	17,52	17,51
22/03/89	1,3447	17,73	17,203	17,203	42,216	42,216	1,7765	25,4	15,820	15,821	73,07	73,07
25/03/89	0,698	6,38	18,250	18,252	46,043	46,043	0,4356	10,335	16,790	16,790	41,48	41,48
29/03/89	0,0298	3,3	3,379	3,379	0,403	0,403	1,1778	0,06	5,444	5,445	14,03	14,03
2/04/89	0,2598	0,38	3,167	3,170	0,413	0,413	7,5743	4,85	0,929	0,927	2,00	2,00
16/04/89	0,1127	21,85	24,506	24,506	26,103	26,103	0,2592	29,63	23,088	23,088	41,38	41,38
27/04/89	3,4287	9,28	7,989	7,989	15,636	15,636	1,2602	9,27	7,969	7,965	9,75	9,75
9/05/89	3,4672	9,75	4,097	4,097	8,934	8,934	1,0284	17,2	2,430	2,427	1,84	1,84
11/06/89	1,0294	6,35	9,507	9,507	12,701	12,701	0,3316	6,3	9,535	9,535	7,57	7,57
4/07/89	0,7236	1,22	2,858	2,858	2,097	2,097	0,3176	0,14	3,967	3,965	2,34	2,34
6/07/89	1,0085	2,7	19,902	19,902	61,366	61,366	0,5517	16,9	14,853	14,852	36,47	36,48
20/09/89	1,9337	13,2	14,702	14,703	27,971	27,971	1,0445	28,93	10,580	10,580	16,60	16,60
9/02/90	0,3925	22,7	16,334	16,330	22,816	22,816	0,2602	31,69	14,356	14,356	21,65	21,65
10/02/90	7,7485	2,85	3,287	3,287	16,786	16,786	2,9627	6,074	1,950	1,950	6,05	6,05
7/04/90	5,656	10	3,230	3,230	9,955	9,955	1,5731	5,4	4,457	4,451	7,19	7,19
30/04/90	2,3835	0,325	7,896	7,896	11,515	11,515	0,4892	0,455	7,739	7,738	3,88	3,87

L_o é a lâmina observada no evento (mm)

L_c é a lâmina calculada pelo modelo, utilizando os parâmetros calibrados (mm)

E_o é a produção de sedimentos observada no evento (kg)

E_c é a produção de sedimentos calculada, utilizando os parâmetros calibrados (kg)

K_r é o parâmetro de erodibilidade nos planos pelo fluxo superficial ($kg \cdot m / N^{1,5} \cdot s$)

N_s é o parâmetro de infiltração (mm)

1 - refere-se a parcela 1

4 - refere-se a parcela 4

$K_{r1} = \bar{x} = 1,8034$
 $S = 1,8792$
 $S^2 = 3,5315$
 $MAX = 7,86$
 $MIN = 0,0298$

$K_{r4} = 1,255$
 $S = 1,227$
 $S^2 = 1,5066$
 $MAX = 7,87$
 $MIN = 0,2592$

Tabela 6.6 - Determinação dos valores de K_r médio e N_s médio obtidos através dos parâmetros N_s e K_r das parcelas 1 e 4 e os fatores físicos.

DATA	K_{r1}	N_{s1}	K_{r4}	N_{s4}	K_r médio	N_s médio	IH (mm)	NDAC	PA5D (mm)
12/02/87	7,9529	7,040	0,5892	8,530	4,2711	7,785	50,81	1	43,08
3/03/87	0,6296	17,530	0,7964	14,095	0,7130	15,813	66,76	0	10,32
10/03/87	1,0854	12,800	1,7834	13,130	1,4344	12,965	61,97	6	0
12/03/87	1,4316	3,035	2,1022	5,920	1,7669	4,478	63,75	0	19,56
28/03/87	0,3105	20,140	1,0979	90,170	0,7042	55,155	108,98	4	2,1
2/05/87	4,4466	19,680	2,0986	11,250	3,2726	15,465	45,85	5	0
29/06/87	2,3721	2,024	1,3974	2,109	1,8848	2,067	39,43	0	27,72
20/01/88	1,6851	64,620	1,423	88,350	1,5541	76,485	28,11	7	0
14/02/88	0,6011	42,688	0,4685	55,495	0,5348	49,092	76,81	8	0
10/03/88	0,7749	15,188	0,4026	8,910	0,5888	12,049	102,6	5	0
14/03/88	3,7901	2,091	2,8559	3,673	3,3230	2,882	133,57	1	65,66
15/03/88	0,3734	8,514	0,3169	8,895	0,3452	8,705	156,6	0	63,98
21/03/88	1,914	6,505	1,0126	9,090	1,4633	7,798	144,33	1	7,26
24/03/88	0,3362	7,048	0,6454	11,720	0,4908	9,384	146,6	0	33,48
5/04/88	3,1373	26,211	1,5242	29,400	2,3308	27,806	100,23	11	0
8/04/88	0,7581	9,880	1,0929	14,120	0,9255	12,000	105,16	0	26,12
13/04/88	0,6516	17,392	0,6962	43,890	0,6739	30,641	112,88	0	20,02
19/04/88	2,1175	5,476	1,914	15,970	2,0158	10,723	114,49	0	12,1
20/04/88	2,0004	3,809	1,3587	4,580	1,6796	4,195	114,01	0	35,06
22/04/88	2,7437	0,763	1,9535	3,945	2,3486	2,354	131,87	0	32,4
6/05/88	1,5728	5,193	1,0209	4,900	1,2969	5,047	95,05	3	1,44
9/07/88	2,3373	12,414	0,6237	26,850	1,4805	19,632	75,46	6	0
3/03/89	1,5124	7,250	1,0079	7,790	1,2602	7,520	22,86	13	0
22/03/89	1,3447	17,730	1,7765	25,400	1,5606	21,565	36,86	20	0
25/03/89	0,698	6,380	0,4356	10,335	0,5668	8,358	70,93	1	38,18
29/03/89	0,0298	3,300	1,1778	0,060	0,6038	1,680	155,51	0	133,48
2/04/89	0,2598	0,380	7,5743	4,850	3,9171	2,615	148,53	0	116,96
16/04/89	0,1127	21,850	0,2592	29,630	0,1860	25,740	155,38	1	5,56
27/04/89	3,4287	9,280	1,2602	9,270	2,3445	9,275	127,5	3	7,56
9/05/89	3,4672	9,750	1,0284	17,200	2,2478	13,475	89,46	4	6,76
11/06/89	1,0294	6,350	0,3316	6,300	0,6805	6,325	47,99	9	0
4/07/89	0,7236	1,220	0,3176	0,140	0,5206	0,680	46,68	0	9,16
6/07/89	1,0085	2,700	0,5517	16,900	0,7801	9,800	93,76	0	40
20/09/89	1,9337	13,200	1,0445	28,930	1,4891	21,065	43,05	13	0
9/02/90	0,3925	22,700	0,2602	31,690	0,3264	27,195	59,49	0	12,4
10/02/90	7,7485	2,850	2,9627	6,074	5,3556	4,462	65,14	0	48,2
7/04/90	5,656	10,000	1,5731	5,400	3,6146	7,700	21,52	35	0
30/04/90	2,3835	0,325	0,4892	0,455	1,4364	0,390	47,95	2	22,36

K_r médio é a média entre K_{r1} e K_{r4} em $(kg \cdot m/N^{1,5} \cdot s)$

N_s médio é a média entre N_{s1} e N_{s4}

IH é o índice de umidade em mm

NDAC é o número de dias anteriores ao evento sem ocorrência de chuva

PA5D é a precipitação total acumulada para os últimos cinco dias anteriores ao evento

6.3.2 - Calibragem dos Parâmetros N_s e "a" para Microbacia 4

No primeiro procedimento, em que se definiu um valor fixo de K_r para todos os eventos da microbacia, foram determinados os valores do parâmetro N_s pelo ajuste da lâmina total calculada à lâmina observada e depois o parâmetro de erosão nos canais "a" pelo ajuste da erosão total calculada à erosão observada, conforme tabela 6.7. A figura 6.19 mostra a relação entre os valores de lâmina e erosão calculados e observados.

No segundo procedimento, determinou-se o valor de K_r para cada evento, pela relação funcional empírica definida anteriormente, com a aplicação do valor de N_s já obtido no procedimento anterior. Em seguida, calibrou-se o parâmetro "a" pelo o ajuste da erosão total calculada à erosão observada, como mostra a tabela 6.8. A figura 6.20 mostra a relação entre os valores de lâmina calculada e observada e as figuras 6.21 e 6.22 mostram as relações entre erosão calculada e observada para os dois procedimentos adotados para escolha do parâmetro K_r .

Tabela 6.7 - Calibração dos parâmetros de infiltração " N_s " e de erosão nos canais

"a" para microbacia 4, utilizando um valor representativo para K_r

EVENTO	DATA	N_s (mm)	K_r , r (Kg.m/N ^{1,5} .s)	a (Kg.m ² /N ^{1,5} .s)	Lo (mm)	Lc (mm)	Eo (Kg)	Ec (Kg)
1	28/03/87	55,050	1,6313	0,0087	19,161	19,161	2.989,46	2.981,10
2	2/05/87	42,700	1,6313	0,0170	1,073	1,073	154,65	154,20
3	20/01/88	87,600	1,6313	0,0086	5,436	5,437	574,76	574,07
4	9/03/88	5,850	1,6313	0,0020	5,994	5,993	191,40	189,05
5	14/03/88	3,200	1,6313	0,0272	6,140	6,140	1.967,82	1.965,10
6	24/03/88	27,000	1,6313	0,0201	8,775	8,777	2.716,36	2.717,75
7	5/04/88	13,890	1,6313	0,0234	10,468	10,467	3.299,76	3.297,31
8	8/04/88	25,300	1,6313	0,0206	5,017	5,018	1.340,66	1.339,32
9	13/04/88	41,000	1,6313	0,0191	13,510	13,510	3.924,69	3.922,23
10	19/04/88	14,560	1,6313	0,0319	8,642	8,642	3.195,93	3.199,83
11	20/04/88	3,020	1,6313	0,0353	1,609	1,609	556,52	556,32
12	22/04/88	2,122	1,6313	0,0141	12,138	12,138	1.730,71	1.726,82
13	6/05/88	8,730	1,6313	0,0077	6,660	6,661	646,82	645,94
14	1/03/89	9,530	1,6313	0,0119	6,974	6,973	1.104,30	1.100,61
15	22/03/89	7,642	1,6313	0,0100	18,529	18,528	2.797,23	2.793,46
16	25/03/89	14,420	1,6313	0,0149	15,543	15,543	3.736,89	3.768,07
17	6/04/89	0,270	1,6313	0,0233	1,577	1,578	292,79	292,17
18	16/04/89	8,450	1,6313	0,0118	26,721	26,721	5.680,49	5.678,64
19	27/04/89	6,200	1,6313	0,0231	9,357	9,356	2.311,51	2.313,98
20	9/05/89	4,730	1,6313	0,0120	5,769	5,769	787,27	786,34
21	11/06/89	7,035	1,6313	0,0026	9,191	9,191	353,67	353,28
22	4/07/89	0,700	1,6313	0,0103	3,102	3,120	358,53	356,57
23	6/07/89	0,749	1,6313	0,0077	21,837	21,836	3.096,85	3.091,35
24	9/02/90	5,820	1,6313	0,0042	20,787	20,786	1.664,46	1.658,59
25	10/02/90	2,100	1,6313	0,0664	3,534	3,535	2.487,20	2.485,73
26	7/04/90	10,240	1,6313	0,0047	3,142	3,142	145,49	143,27
27	30/04/90	1,470	1,6313	0,0073	6,745	6,745	519,01	519,36

Lo é a lâmina observada no evento (mm)

Lc é a lâmina calculada pelo modelo, utilizando os parâmetros calibrados (mm)

Eo é a erosão observada no evento (kg)

Ec é a erosão calculada pelo modelo, utilizando os parâmetros calibrados (kg)

N_s é o potencial de capilaridade (mm)

a é o fator de erodibilidade por arrastamento nos canais (kg.m²/N^{1,5}.s)

K_r é o fator de erodibilidade pelo fluxo superficial nos planos (kg.m/N^{1,5}.s)

Tabela 6.8 - Calibração dos parâmetros de infiltração " N_s " e de erosão nos canais " a " para microbacia 4, utilizando a função encontrada para determinação de K_r .

EVENTO	DATA	N_s (mm)	Lo (mm)	Lc (mm)	K_r (Kg.m/N ^{1.5} .s)	a (Kg.m ² /N ^{1.5} s)	Eo (Kg)	Ec (Kg)
1	28/03/87	55,050	19,161	19,161	0,9264	0,0095	2.989,46	2.973,04
2	2/05/87	42,700	1,073	1,073	0,9638	0,0171	154,65	154,78
3	20/01/88	87,600	5,436	5,437	0,8617	0,0088	574,76	571,62
4	9/03/88	5,850	5,994	5,993	1,3139	0,0021	191,40	193,27
5	14/03/88	3,200	6,140	6,140	1,4435	0,0274	1.967,82	1.969,22
6	24/03/88	27,000	8,775	8,777	1,0352	0,0207	2.716,36	2.711,37
7	5/04/88	13,890	10,468	10,467	1,1482	0,0235	3.299,76	3.303,55
8	8/04/88	25,300	5,017	5,018	1,0457	0,0209	1.340,66	1.338,10
9	13/04/88	41,000	13,510	13,510	0,9699	0,0198	3.924,69	3.931,52
10	19/04/88	14,560	8,642	8,642	1,1398	0,0320	3.195,93	3.167,67
11	20/04/88	3,020	1,609	1,609	1,4566	0,0354	556,52	557,58
12	22/04/88	2,122	12,138	12,138	1,5390	0,0141	1.730,71	1.725,23
13	6/05/88	8,730	6,660	6,661	1,2344	0,0078	646,82	643,63
14	1/03/89	9,530	6,974	6,973	1,2177	0,0121	1.104,30	1.104,32
15	22/03/89	7,642	18,529	18,528	1,2603	0,0103	2.797,23	2.807,28
16	25/03/89	14,420	15,543	15,543	1,1415	0,0153	3.736,89	3.733,38
17	6/04/89	0,270	1,577	1,578	2,1224	0,0232	292,79	291,21
18	16/04/89	8,450	26,721	26,721	1,2407	0,0123	5.680,49	5.666,47
19	27/04/89	6,200	9,357	9,356	1,3021	0,0231	2.311,51	2.309,54
20	9/05/89	4,730	5,769	5,769	1,3582	0,0121	787,27	788,90
21	11/06/89	7,035	9,191	9,191	1,2767	0,0027	353,67	352,61
22	4/07/89	0,700	3,102	3,102	1,8294	0,0103	358,53	358,31
23	6/07/89	0,749	21,837	21,836	1,8103	0,0075	3.096,85	3.093,66
24	9/02/90	5,820	20,787	20,786	1,3150	0,0042	1.664,46	1.661,96
25	10/02/90	2,100	3,534	3,535	1,5415	0,0665	2.487,20	2.488,85
26	7/04/90	10,240	3,142	3,142	1,2041	0,0048	145,49	144,45
27	30/04/90	1,470	6,745	6,745	1,6296	0,0073	519,01	519,35

Lo é a lâmina observada no evento (mm)

Lc é a lâmina calculada pelo modelo, utilizando os parâmetros calibrados (mm)

Eo é a erosão observada no evento (kg)

Ec é a erosão calculada pelo modelo, utilizando os parâmetros calibrados (kg)

N_s é o potencial de capilaridade (mm)

a é o fator de erodibilidade por arrastamento nos canais (kg.m²/N^{1.5}s)

K_r é o fator de erodibilidade pelo fluxo superficial nos planos (kg.m/N^{1.5} s)

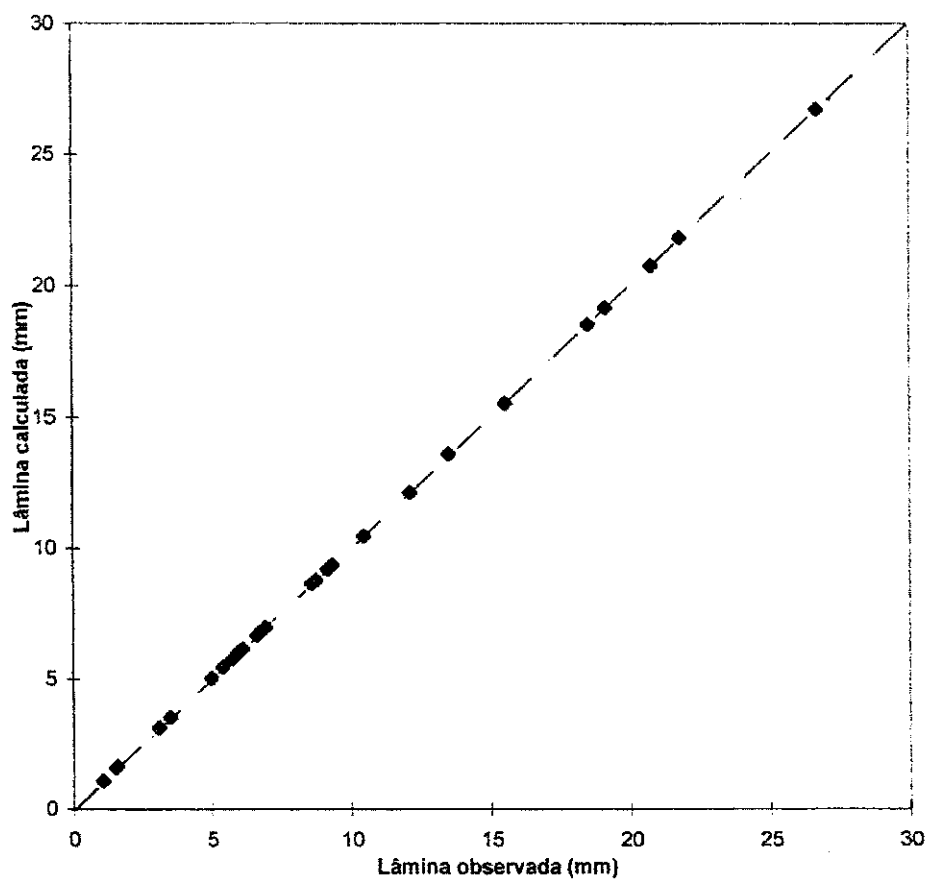


Figura 6.19 - Relação entre a lâmina calculada e a lâmina observada para microbacia 4, utilizando um valor de K_r representativo para todos os eventos.

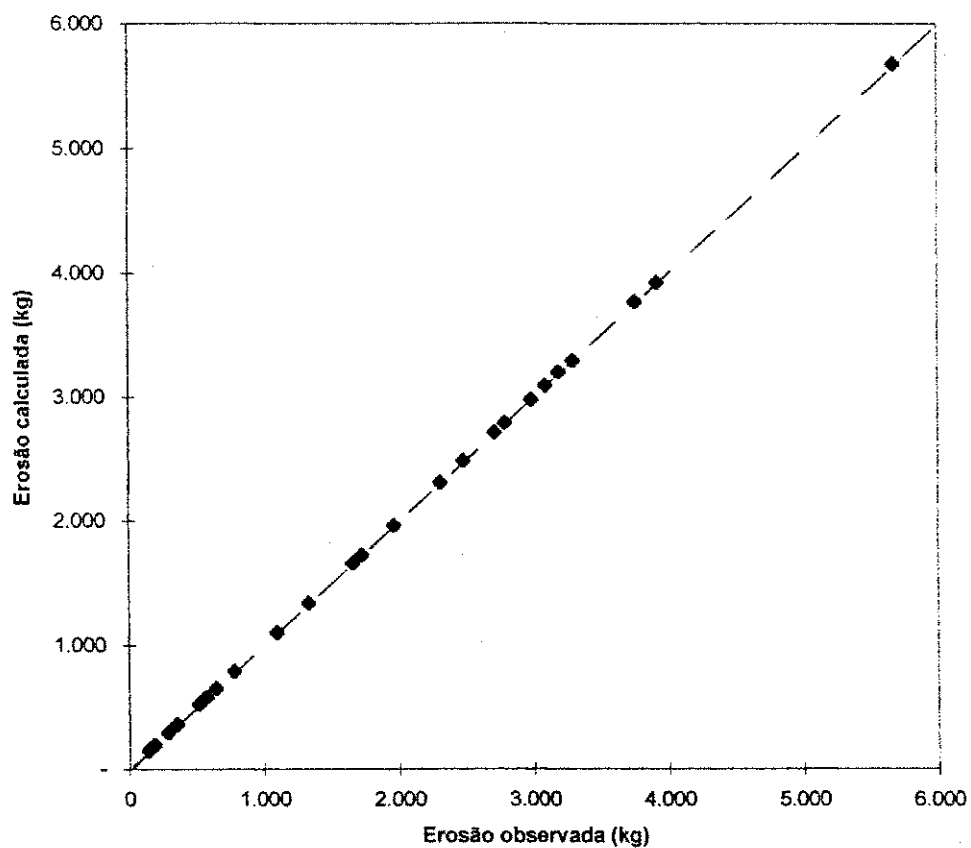


Figura 6.20 - Relação entre a erosão calculada e a erosão observada para microbacia 4, utilizando um valor de K_r representativo para todos os eventos.

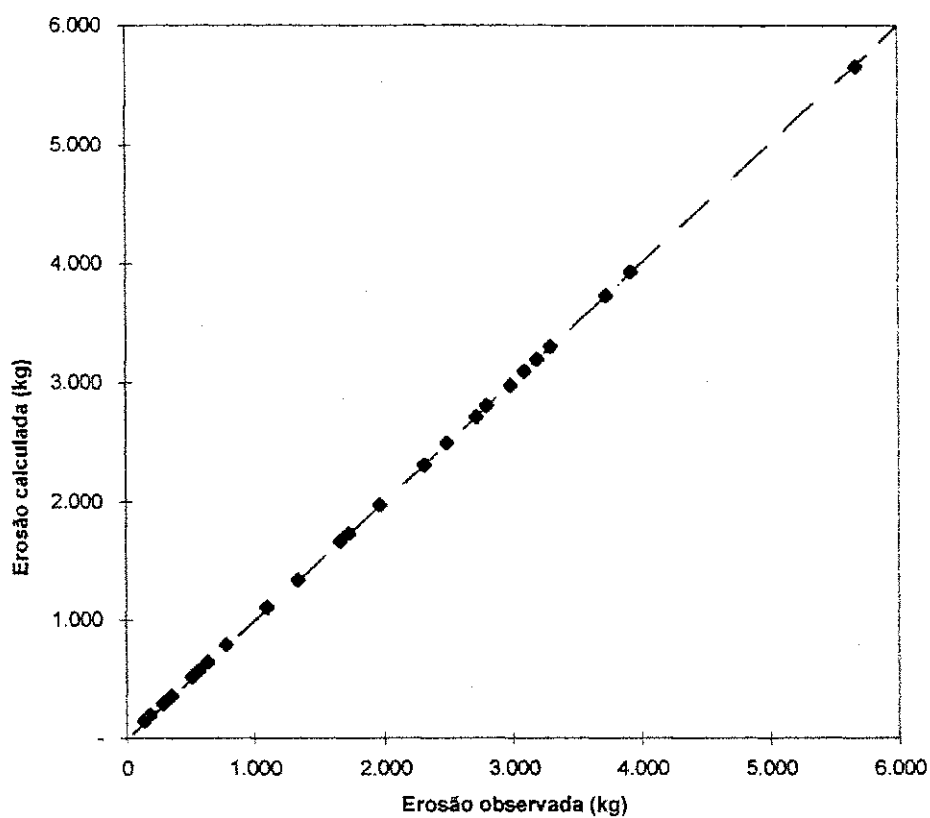


Figura 6.21 - Relação entre a erosão calculada e a erosão observada para microbacia 4, utilizando o valor de K_r determinado pela relação funcional $K_r = 1,7305(N_s)^{-0.1559}$

6.3.3- Extrapolação dos Parâmetros Calibrados na Microbacia 4 para Microbacia 3

Um dos principais objetivos dos estudos de modelagem de processos hidro-sedimentológicos é a extrapolação dos valores de parâmetros do modelo para previsão de escoamento superficial e produção de sedimentos de uma área onde não há dados de escoamento superficial e erosão. A microbacia 3, com algumas características semelhantes à microbacia 4, na Bacia Experimental de Sumé, proporcionou condições adequadas para a verificação da possibilidade da extrapolação do modelo calibrado.

A calibração dos parâmetros foi efetuada com os dados da microbacia 4. Os valores dos parâmetros assim encontrados foram utilizados na microbacia 3 para simular cada evento. Os parâmetros calibrados na microbacia 4, nos dois procedimentos para determinação de K_r foram aplicados aos mesmos eventos, cujos resultados na forma de lâminas e erosão calculados são mostrados nas tabelas 6.9 e 6.10.

A figura 6.22 mostra a relação entre os valores das lâminas calculadas e as observadas para a microbacia 3 com a extrapolação do parâmetro de infiltração N_s para cada evento.

As figuras 6.23 e 6.24 mostram a relação entre os valores de erosão calculadas e observadas na microbacia 3 com a extrapolação dos parâmetros de erodibilidade nos planos e canais obtidos para cada evento.

Tabela 6.9 - Comparação entre a lâmina e erosão observadas e as calculadas na microbacia 3, utilizando os parâmetros otimizados na microbacia 4 com a determinação de um valor único para K_r

EVENTO	DATA	N_s (mm)	L_o (mm)	L_c (mm)	K_r (Kg.m/N ^{1.5} .s)	a (Kg.m ² /N ^{1.5} .s)	E_o (Kg)	E_c (Kg)	Erro ¹ (%)
1	28/03/87	55,050	27,650	18,945	1,6313	0,0087	4.800,68	3960,34	17,50
2	2/05/87	42,700	2,313	1,075	1,6313	0,0170	1.214,52	108,79	91,04
3	20/01/88	87,600	5,712	5,414	1,6313	0,0086	2.061,86	639,25	69,00
4	9/03/88	5,850	3,391	5,961	1,6313	0,0020	448,01	276,54	38,27
5	14/03/88	3,200	5,669	6,105	1,6313	0,0272	1.875,53	1991,83	-6,20
6	24/03/88	27,000	13,521	8,731	1,6313	0,0201	4.019,04	3311,18	17,61
7	5/04/88	13,890	10,600	10,400	1,6313	0,0234	3.615,40	3734,91	-3,31
8	8/04/88	25,300	7,231	4,988	1,6313	0,0206	1.286,65	1517,10	-17,91
10	19/04/88	14,560	9,633	8,598	1,6313	0,0319	3.504,55	3247,47	7,34
11	20/04/88	3,020	1,810	1,603	1,6313	0,0353	441,75	505,59	-14,45
12	22/04/88	2,122	12,981	12,010	1,6313	0,0141	2.694,00	1543,48	42,71
13	6/05/88	8,730	7,819	6,645	1,6313	0,0077	898,47	732,63	18,46
14	1/03/89	9,530	6,748	6,736	1,6313	0,0119	918,5	1235,97	-34,56
15	22/03/89	7,642	20,599	18,428	1,6313	0,0100	2.676,42	3370,89	-25,95
16	25/03/89	14,420	14,849	15,364	1,6313	0,0149	3.867,76	4694,20	-21,37
17	6/04/89	0,270	3,313	1,572	1,6313	0,0233	190,68	197,16	-3,40
18	16/04/89	8,450	27,967	26,570	1,6313	0,0118	4.370,29	7484,56	-71,26
19	27/04/89	6,200	16,756	9,244	1,6313	0,0231	3.074,86	2200,87	28,42
20	9/05/89	4,730	4,782	5,701	1,6313	0,0120	1.186,17	793,67	33,09
22	4/07/89	0,700	3,470	3,068	1,6313	0,0103	443,25	365,93	17,44
23	6/07/89	0,749	21,771	21,592	1,6313	0,0077	3.637,45	4139,28	-13,80
25	10/02/90	2,100	5,092	3,512	1,6313	0,0664	404,36	2224,00	-450,00
26	7/04/90	10,240	2,090	3,105	1,6313	0,0047	124,04	132,37	-6,72
27	30/04/90	1,470	8,277	6,706	1,6313	0,0073	567,56	490,60	13,56

L_o é a lâmina observada no evento (mm)

L_c é a lâmina calculada pelo modelo utilizando os parâmetros calibrados (mm)

E_o é a erosão observada no evento (kg)

E_c é a erosão calculada utilizando os parâmetros calibrados (kg)

N_s é o potencial de capilaridade (mm)

a é o fator de erodibilidade por arrastamento nos canais (kg.m²/N^{1.5}.s)

K_r é o fator de erodibilidade pelo fluxo superficial nos planos (kg.m/N^{1.5}.s)

¹ é o erro comparativo entre a erosão observada e a calculada (%)

Tabela 6.10 - Comparação entre a lâmina observada e a calculada, e entre a erosão observada e a calculada na microbacia 3, utilizando os parâmetros otimizados da microbacia 4, com o valor de K_r definido pela função.

EVENTO	DATA	N_c (mm)	L_o (mm)	L_c (mm)	K_r (Kg.m/N ^{1.5} .s)	a (Kg.m ² /N ^{1.5} .s)	E_o (Kg)	E_c (Kg)	Erro ¹ (%)
1	28/03/87	55,050	27,650	18,846	0,9264	0,0095	4.800,68	3.669,62	23,56
2	2/05/87	42,700	2,313	1,053	0,9638	0,0171	1.214,52	109,07	91,02
3	20/01/88	87,600	5,712	5,432	0,8617	0,0088	2.061,86	615,66	70,14
4	9/03/88	5,850	3,391	5,962	1,3139	0,0021	448,01	253,20	43,48
5	14/03/88	3,200	5,669	6,105	1,4435	0,0274	1.875,53	1.995,84	-6,41
6	24/03/88	27,000	13,521	8,731	1,0352	0,0207	4.019,04	3.201,32	20,35
7	5/04/88	13,890	10,600	10,442	1,1482	0,0235	3.615,40	3.636,39	-0,58
8	8/04/88	25,300	7,231	4,988	1,0457	0,0209	1.286,65	1.485,82	-15,48
10	19/04/88	14,560	9,633	8,599	1,1398	0,032	3.504,55	3.219,57	8,13
11	20/04/88	3,020	1,810	1,601	1,4566	0,0354	441,75	506,39	-14,63
12	22/04/88	2,122	12,981	12,012	1,539	0,0141	2.694,00	1.540,00	42,84
13	6/05/88	8,730	7,819	6,645	1,2344	0,0078	898,47	716,40	20,26
14	1/03/89	9,530	6,748	7,022	1,2177	0,0121	918,50	1.224,03	-33,26
15	22/03/89	7,642	20,599	18,417	1,2603	0,0103	2.676,42	3.313,70	-23,81
16	25/03/89	14,420	14,849	15,364	1,1415	0,0153	3.867,76	4.503,11	-16,43
17	6/04/89	0,270	3,313	1,560	2,1224	0,0232	190,68	196,61	-3,11
18	16/04/89	8,450	27,967	26,733	1,2407	0,0123	4.370,29	7.223,09	-65,28
19	27/04/89	6,200	16,756	9,240	1,3021	0,0231	3.074,86	2.191,07	28,74
20	9/05/89	4,730	4,782	5,693	1,3582	0,0121	1.186,17	790,52	33,36
22	4/07/89	0,700	3,470	3,107	1,8294	0,0103	443,25	370,38	16,44
23	6/07/89	0,749	21,771	21,590	1,8103	0,0075	3.637,45	4.219,83	-16,01
25	10/02/90	2,100	5,092	3,427	1,5415	0,0665	404,36	2.226,13	-450,53
26	7/04/90	10,240	2,090	3,105	1,2041	0,0048	124,04	130,40	-5,13
27	30/04/90	1,470	8,277	6,707	1,6296	0,0073	567,56	490,57	13,57

L_o é a lâmina observada no evento (mm)

L_c é a lâmina calculada pelo modelo utilizando os parâmetros calibrados (mm)

E_o é a erosão observada no evento (Kg)

E_c é a erosão calculada utilizando os parâmetros calibrados (Kg)

N_c é o potencial de capilaridade (mm)

a é o fator de erodibilidade por arrastamento nos canais (Kg.m²/N^{1.5}.s)

K_r é o fator de erodibilidade pelo fluxo superficial nos planos (Kg.m/N^{1.5}.s)

¹ é o erro comparativo entre a erosão observada e a calculada (%)

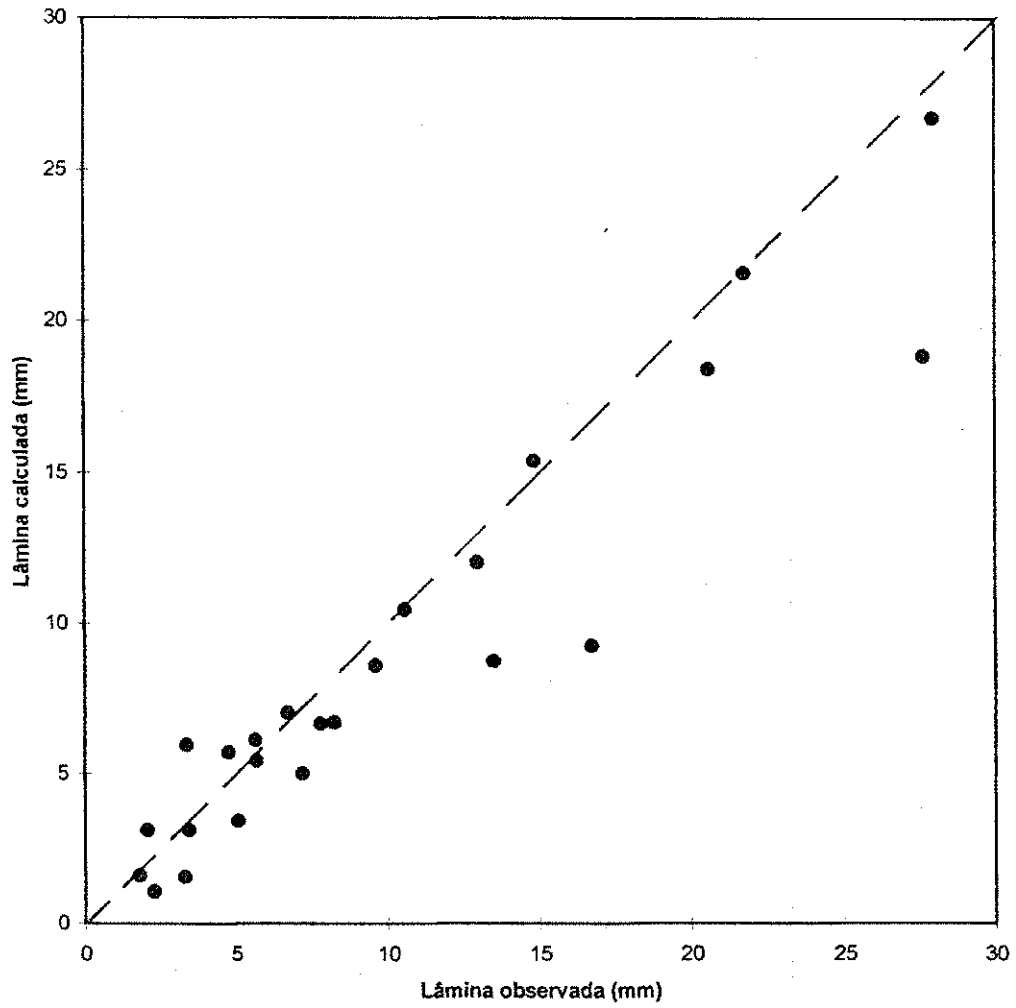


Figura 6.22 - Relação entre a lâmina observada e a lâmina calculada para microbacilia 3

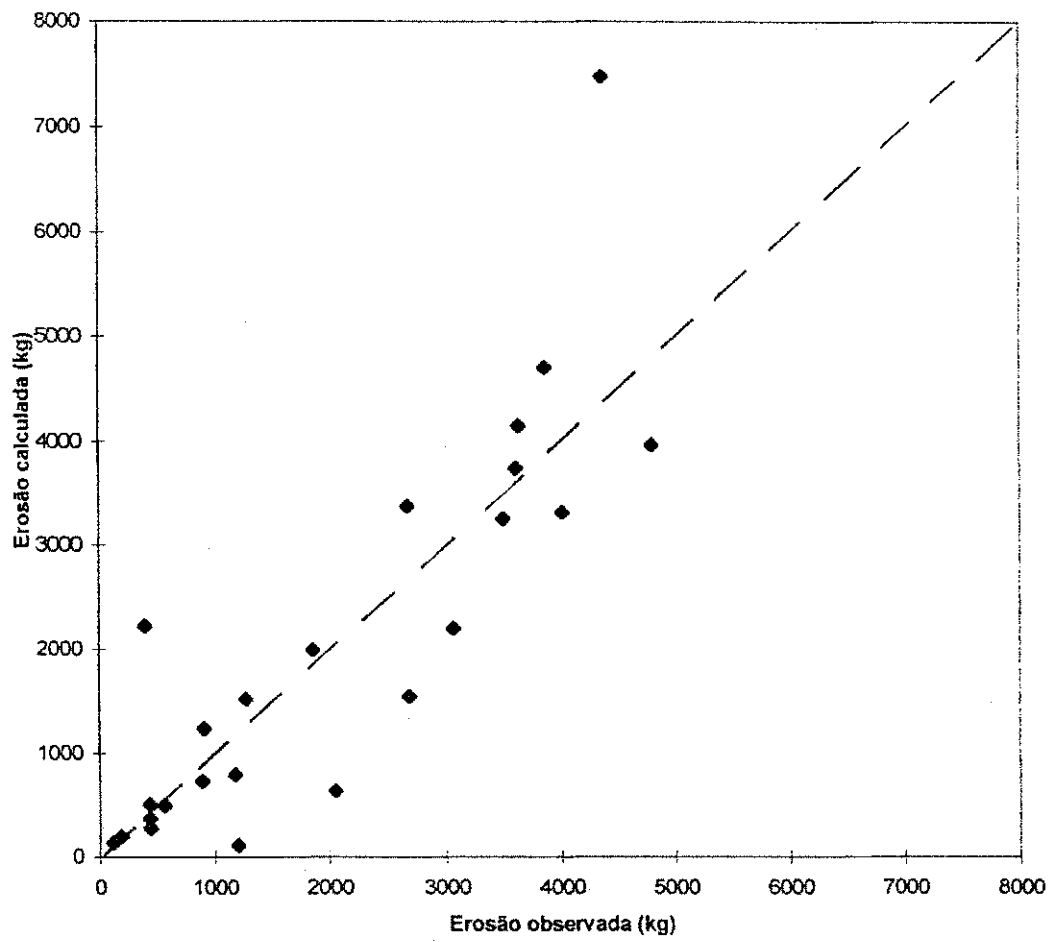


Figura 6.23 - Relação entre a erosão observada e calculada na microbacia 3, obtidas com um valor de K_r representativo para todos os eventos.

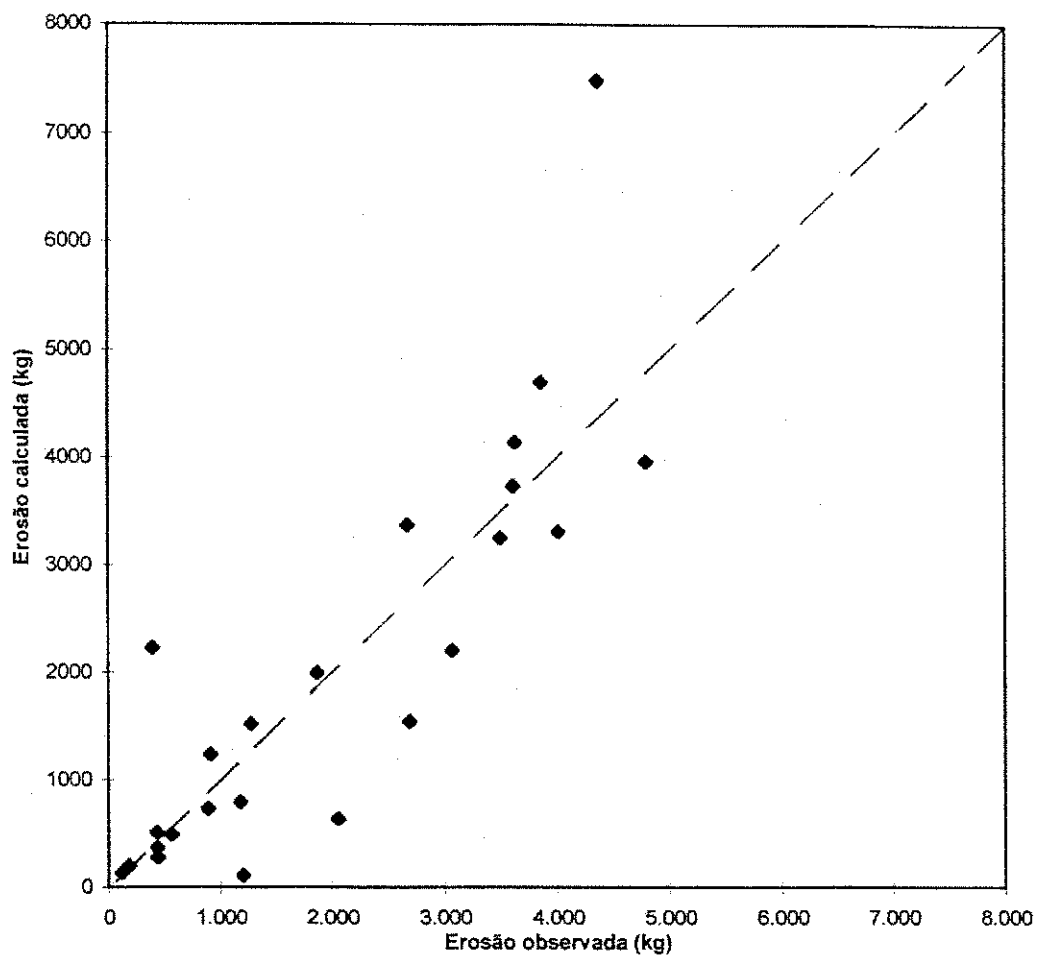


Figura 6.24 - Relação entre a erosão observada e calculada na microbacia 3, obtidas com o valor de K_r determinado pela função matemática definida.

7 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 - Considerações Gerais

Neste trabalho, procurou-se avaliar a natureza dos parâmetros do modelo WESP, principalmente o de infiltração N_s e de erodibilidade nos planos K_r , para fins de extrapolação destes parâmetros para outras bacias.

A variação destes parâmetros observados na calibragem por evento com outros fatores físicos que estão associados às condições de umidade do solo como: i) índice de umidade (IH), precipitação acumulada para os cinco dias anteriores ao evento (PA5D) e o número de dias anteriores sem ocorrência de chuva (NDAC) foi verificada. É apresentada neste capítulo uma discussão dos resultados obtidos na fase de calibragem dos parâmetros nas parcelas 1 e 4 e na microbacia 4 e a aplicação do modelo para a microbacia 3.

7.2 - Calibragem dos Parâmetros N_s e K_r nas Parcelas 1 e 4

Na aplicação de um modelo hidrodinâmico de base física, os processos físicos são representados de uma forma simplificada na estrutura do modelo e um dos desafios está na adoção ou obtenção de valores dos parâmetros efetivos que possam permitir a simulação dos processos nas condições de campo.

Na Bacia Experimental de Sumé, com exceção dos parâmetros N_s , K_i , K_r e "a", os outros foram fixados ou adotados com base nas informações bibliográficas sobre o assunto. Uma estimativa inadequada desses parâmetros podem influenciar nos valores dos parâmetros a serem calibrados.

Dos parâmetros calibrados a nível de cada evento, o parâmetro de erodibilidade K_i foi fixado em $5 \times 10^8 \text{ kg.s/m}^4$, por apresentar uma insensibilidade na quantificação do total de sedimentos produzidos pelo modelo. Srinivasan e Galvão (1995) constataram que o parâmetro K_i pode variar entre (10^5 a 10^9) kg.s/m^4 sem afetar significativamente o valor da erosão calculada.

As parcelas 1 e 4, que foram utilizadas para a calibração dos parâmetros N_s e K_r , apresentam declividades de 3,8 e 7,0%, e diâmetros médios das partículas de solo correspondentes a 0,50 e 0,60 mm, respectivamente, conforme a tabela 5.1 e as figuras 6.7 e 6.8. Comparando os dados correspondentes às duas parcelas, mostrados na tabela 6.5, pode-se verificar que os valores de lâmina e erosão observados na parcela 1 são na maioria dos eventos superiores aos valores observados na parcela 4. Em condições iguais, é de se esperar que a parcela de maior declividade produziria maior escoamento e maior erosão do que a outra. Uma análise qualitativa foi apresentada por Gomes et al., (1987), em que, para uma série de eventos observados para as duas parcelas, foi verificado uma pequena diferença entre os valores do escoamento, mas, em se tratando de erosão, a parcela 4 com maior declividade produziu maiores quantidades, evidenciando a forte influência da declividade sobre a erosão. Para Justificar o fato de que a maioria dos valores de lâmina e erosão observados na parcela 1 serem superiores aos observados na parcela 4, deve-se considerar que, para a parcela 1, com diâmetro médio e declividade menor, as partículas finas do solo preenchem os vazios da superfície do terreno, o que dificulta o processo de infiltração e possibilita um maior escoamento, que, por sua vez, proporciona uma maior produção de sedimento. No caso da parcela 4, a erosão acentuada pela declividade pode ter, ao longo do tempo, tornado a sua superfície mais grossa, resultando num aumento da resistência ao fluxo com a diminuição da velocidade, e, conseqüentemente, uma maior infiltração com a diminuição do escoamento.

O parâmetro N_s é um dos fatores determinantes do processo de infiltração e representa o potencial de capilaridade do solo, ou seja, quanto maior o valor de N_s , tanto maior será a infiltração do solo, o que acarretará numa diminuição do volume escoado. Portanto, no processo de calibragem do parâmetro pelo modelo WESP, ocorre que o valor da lâmina calculada é inversamente proporcional ao valor do parâmetro. Portanto, é de se esperar que a maioria dos valores de N_s sejam superiores na parcela 4.

O parâmetro K_r está diretamente relacionado à tensão de cisalhamento na superfície do solo provocado pelo fluxo superficial, de modo que uma maior erosão implica num maior valor para K_r . No caso da parcela 1, a erosão foi maior do que na parcela 4, apesar de a declividade ser menor, e em conseqüência, provocar uma tensão

de cisalhamento menor. Por esta razão, os valores de K_r na parcela, teriam que ser superiores aos da parcela 4.

Na utilização de um modelo que execute o processo de calibragem dos parâmetros por evento, é de se esperar que os parâmetros calibrados para um certo evento possam sofrer influências dos eventos anteriores. Como no caso do parâmetro de infiltração N_s , que é afetado pela umidade do solo provocada pelo evento anterior. A influência dos eventos anteriores poderia também alterar o parâmetro K_r , pelo fato de a erosão estar relacionada às condições de umidade do solo, ou seja, a produção de sedimentos observada para um determinado evento pode ter sofrido influência significativa do evento anterior. Desta maneira a variação observada dos parâmetros N_s e K_r podem ser consideradas como consistentes com os processos físicos modelados.

Na tabela 6.5, observa-se que o parâmetro N_s , teve uma variação entre 0,325 e 64,62 mm para parcela 1 e uma variação de 0,14 a 90,17 mm para parcela 4. É de se esperar uma certa variação do parâmetro N_s quando calibrado evento a evento pelo modelo WESP, pois o parâmetro está relacionado ao processo de infiltração, que pode ser afetado por alguns fatores como grau de saturação do solo, umidade inicial, a sucção na frente de molhamento e a estruturação das subcamadas. Segundo Lopes (1987), a equação de Green e Ampt assume que existe uma frente de molhamento distinta e precisamente definível; na qual a sucção permanece constante, independente do tempo ou posição. O perfil do solo é homogêneo e a distribuição da umidade antecedente no solo é uniforme em todo o perfil. Em estudos desenvolvidos em áreas da Bacia Experimental de Sumé, Molinier et al., (1989) verificaram uma heterogeneidade do solo, com a presença de fendas e caminhos preferenciais. Isso talvez justifica a causa da grande variação do parâmetro N_s , observado neste trabalho.

O parâmetro K_r apresentou uma variação entre 0,1127 a 7,9529 $\text{kg.m/N}^{1.5}.\text{s}$ na parcela 1, e 0,2592 a 7,5743 $\text{kg.m/N}^{1.5}.\text{s}$ na parcela 4, como mostra a tabela 6.5. Essas variações podem ser consideradas moderadas, se comparadas à variação do parâmetro N_s .

De acordo com a tabela 6.6, os valores dos parâmetros N_s e K_r das parcelas 1 e 4 são bastante próximos comparados evento a evento, sendo a diferença menor que 50% do valor médio. Por isso, foram utilizados os valores de $N_{s\text{médio}}$ e $K_{r\text{médio}}$ como valores

representativos para fins de verificação das variações desses parâmetros com os índices físicos relacionados aos eventos como IH, PA5D e NDAC.

As figuras 6.12, 6.13 e 6.14 mostram o gráfico de dispersão quando plotado o parâmetro de infiltração N_s com os fatores IH, PA5D e NDAC, respectivamente. Fica evidente que não há uma tendência clara do parâmetro N_s com nenhum desses fatores físicos. Santos (1994) determinou uma relação entre N_s e o número de dias anteriores sem ocorrência de chuva. Portanto, esperava-se que fosse determinada, através dos dados utilizados neste estudo, tendências que pudessem determinar o comportamento da variação do parâmetro N_s , quando relacionado aos fatores físicos que estão diretamente associados às condições de umidade do solo, o que não ocorreu.

Tentou-se também estabelecer uma relação entre o parâmetro K_r com os mesmos índices, conforme as figuras 6.15, 6.16 e 6.17, mas também não foi verificada nenhuma relação satisfatória que determinasse uma tendência para o parâmetro.

Isso mostra que os dados selecionados e utilizados neste trabalho não foram suficientes para a verificação das variações dos parâmetros N_s e K_r , e uma análise com um maior número de eventos, poderá, estabelecer relações confiáveis que determinem o comportamento das variações dos parâmetros, quando relacionados com esses fatores físicos.

7.3 - Calibração dos Parâmetros de Infiltração e Erosão na Microbacia 4

Observou-se uma grande variação do parâmetro de infiltração N_s para os eventos simulados pelo modelo WESP na microbacia 4 que variaram entre 0,27 a 55,05 mm, mantendo uma faixa de variação próxima à das parcelas, conforme indicado nas tabelas 6.7 ou 6.8. Os valores das lâminas calculadas e observadas foram plotados no gráfico, como mostra a figura 6.19, em que se observa um excelente ajuste entre os valores calculados e os observados, que assegura uma ótima calibração para os eventos.

A relação funcional estabelecida para obter K_r em função de N_s , conforme a figura 6.18, é apenas uma relação razoável entre os dois parâmetros; a situação não é desejável para fins de estimativa do parâmetro K_r . Apesar disto, como a primeira tentativa, esta relação foi utilizada para se obter o valor de K_r , para que os resultados obtidos com o valor único (médio) de K_r possam ser comparados.

Os valores do parâmetro K_r , determinados pela relação funcional com N_s , tiveram uma variação entre 0,8617 a 2,1224 $\text{kg.m/N}^{1.5}$.s, variação bem menor do que foi encontrado nas parcelas, como mostra a tabela 6.8.

A variação do parâmetro de erodibilidade nos canais "a", observada a partir da calibração por evento deste parâmetro, foi de 0,0020 a 0,0353 $\text{kg.m}^2/\text{N}^{1.5}$.s, quando K_r foi adotado como um valor médio, único para todos os eventos, conforme tabela 6.9. A variação do mesmo foi de 0,0021 a 0,0354 $\text{kg.m}^2/\text{N}^{1.5}$.s, quando o valor de K_r foi determinado através de uma relação funcional com o valor de N_s para cada evento, como mostra a tabela 6.10. Foi verificado no caso do evento 25, conforme tabelas 6.7 e 6.8, que os valores do parâmetro "a" foram excepcionalmente elevados nos dois procedimentos, sendo, portanto, desconsiderado. Verifica-se também nas tabelas 6.7 ou 6.8, que o evento 25, apesar de ter gerado um escoamento superficial aproximadamente seis vezes menor que o evento 24, resultou numa erosão bem superior. Segundo Galvão (1990), foram observados que, para alguns eventos na Bacia Experimental de Sumé, parte do material erodido ficava depositado no trecho final das microbacias, próximo à fossa coletora ou na entrada da calha de coleta das parcelas, e, em eventos subsequentes, às vezes, com o escoamento superficial bem menor estes sedimentos eram carregados produzindo uma erosão bem maior. Por isso, no processo de calibragem do parâmetro de erodibilidade nos canais "a", na simulação do evento 25, teve de ser utilizado um valor relativamente elevado do parâmetro, para que o modelo pudesse ajustar o valor da erosão calculada à observada.

Nas figuras 6.20 e 6.21 são apresentadas as relações entre a erosão calculada e a observada para os dois procedimentos utilizados na calibragem dos parâmetros de erosão na microbacia 4, onde se verificam um bom ajuste entre os valores calculados e observados.

7.4 - Extrapolação dos Parâmetros Calibrados na Microbacia 4 para a Microbacia 3

Neste trabalho utilizaram-se os dados coletados na microbacia 3 para verificação da extrapolação dos parâmetros obtidos na microbacia 4. As tabelas 6.9 e 6.8 mostram os dados de lâmina e erosão observados nas microbacias 3 e 4, respectivamente, nos quais se verifica que, na maioria dos casos, os valores observados de lâmina e erosão na microbacia 3 são superiores aos observados na microbacia 4 para os mesmos eventos. A microbacia 3 apresenta uma rede de drenagem mais bem definida e declividades um pouco mais acentuadas que as da microbacia 4. Portanto, em função dessas diferenças entre as microbacias, é de se esperar que os valores observados de lâmina e erosão na microbacia 3 sejam superiores para os mesmos eventos.

A extrapolação do parâmetro N_s da microbacia 4 para microbacia 3 mostra que a maioria dos valores das lâminas calculadas pelo modelo foi inferior às observadas, sendo que para os eventos 1, 6 e 19, a diferença da lâmina observada em relação à lâmina calculada foi superior a 5 mm. Segundo Srinivasan e Galvão (1995), isto talvez indique a existência da aflúncia hipodérmica da bacia à montante em pelo menos alguns eventos.

Utilizando os parâmetros de erodibilidade nos planos e canais calibrados na microbacia 4 para verificação na microbacia 3, conforme as tabelas 6.9 e 6.10, observa-se uma discrepância bem maior entre os valores calculados e observados de erosão em relação às lâminas. Verifica-se que o evento 25 apresenta uma estimativa de erro entre os valores calculado e observado acima de 450%, os eventos 2, 3, e 18 acima de 50%, e os outros eventos apresentaram estimativas inferiores a 50%. O processo de medição da produção de sedimentos, baseado na determinação da concentração média do sedimento no fluxo externo, através da coleta de várias amostras, é susceptível à ocorrência de erros na quantificação total de sedimentos produzidos. Simanton et al., citados por Srinivasan e Galvão (1995) encontraram diferenças muito grandes nos valores medidos de perda de erosão entre três diferentes equipamentos e métodos de medição. Van Rijn, (1984) mostrou que, mesmo para o caso relativamente simples de calhas e canais, os melhores métodos para estimativa do transporte total de sedimentos resultaram para mais de 24% das estimativas, em valores que se situam além da faixa de 0,5 - 2,0 vezes os valores medidos. Portanto, pode se considerar que os procedimentos analíticos para o

cálculo do transporte de sedimentos são muito complicados e menos precisos do que os procedimentos para calcular o escoamento.

Os valores de erosão calculados pelo modelo podem ser considerados bastante satisfatórios, em se tratando de uma extrapolação de parâmetros e levando-se em conta os erros provocados pelos métodos de medição utilizados para coleta dos dados de produção de sedimentos.

8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 - Conclusões

O modelo WESP simula satisfatoriamente os processos de escoamento superficial e erosão nos planos e canais, desde que os parâmetros sejam calibrados a nível de cada evento.

Verificou-se uma variação grande nos valores dos parâmetros principais entre os eventos. Isto significa que a utilização de um único valor como representativo em uma parcela ou microbacia para todos os eventos não será realista.

A grande variação dos parâmetros é causada essencialmente pela variação da condição de umidade e outros aspectos físicos da superfície no início de um evento.

Não foi possível com os dados utilizados neste trabalho encontrar uma relação convincente que explique a grande variação do parâmetro de infiltração N_e e do parâmetro de erosão K_r do modelo WESP. Espera-se que, com uma maior série de dados, talvez seja possível uma melhor compreensão das variações desses parâmetros, pois na série analisada os dados não estão uniformemente distribuídos dentro dos valores extremos.

Foi observada uma tendência contrária à que foi constatada por Gomes et al., (1987) no que diz respeito à declividade das parcelas. O menor escoamento e a menor erosão observada na parcela 4 (declividade de 7%), em comparação com a parcela 1 (declividade de 3,8%), podem ser atribuídos ao engrossamento da superfície ao longo do tempo.

A verificação feita com a extrapolação dos parâmetros calibrados na microbacia 4 à microbacia 3 mostra que o modelo pode ser utilizado como uma boa ferramenta nos estudos sobre os problemas de produção de água e sedimentos em regiões hidrologicamente semelhantes à Bacia Experimental de Sumé.

8.2- Recomendações

Baseado nos diversos aspectos deste estudo, algumas recomendações são feitas com a finalidade de estimar os parâmetros de maneira adequada para a região semi-árida semelhantes à de Sumé.

- Avaliar a influência da granulometria das camadas superficiais do solo nos processos de escoamento superficial e erosão ao longo do tempo, em parcelas desmatadas.
- Avaliar a variação do parâmetro de infiltração N_s com os índices relacionados com a umidade do solo, utilizando um número maior de eventos.
- Aplicar o modelo WESP a outras bacias experimentais com características físico-climáticas diferentes da Bacia Experimental de Sumé.

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackers, P. & White, W. R. (1973) Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 99(HY11):1211-1220-2060.
- Albuquerque, J. do P. T. de. (1970) Inventário hidrogeológico do Nordeste; folha 15 - Jaguaribe-SE. Recife, SUDENE. 187 p. Série Brasil. SUDENE. Hidrogeologia, 32.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (1975) Sedimentation engineering. New York, Vanoni, V. A. editor, 745 p.
- Audry, P. ; Cadier, E. & Leprun, J. C. Molinier, M. (1987) Projeto: "Dinâmica da água e das matérias em um ecossistema representativo do Nordeste Brasileiro. Condições de extrapolação espacial na escala regional". Recife, ATP-PIREN, ORSTOM, 78 p.
- Beasley, D. B. (1977) ANSWERS: A mathematical model the effects of land use and management on water quality. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, 266p. Apud Foster (1982).
- Bennett, J. P. (1974) Concepts of mathematical modeling of sediment yield. *Water Resources Research*, 10(3): 485-492.
- Bertoni, J. & Lombardi Neto, F. (1985) Conservação do solo. Piracicaba, Livroceres, 368p.
- Cadier, E. & Freitas, B. J. (1982) Bacia Representativa de Sumé; primeira estimativa dos recursos de água. Recife, SUDENE. 195p.
- Cadier, E.; Freitas, B. J. de & Leprun J. C. (1983) Bacia Experimental de Sumé-PB; Instalação e primeiros resultados. In: *Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, Blumenau, ABRH. Vol. 1, p. 69-90.
- Cadier, E.; Lanna, A. E.; Menezes, M. & Campello, M. S.. (1987). Avaliação dos estudos referentes aos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste Brasileiro. *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Salvador, ABRH. Vol. 2, p. 225-239.
- Chow, V. T. (1959) *Open-channel hydraulics*. Tokyo, McGraw-Hill / Kogakusha, 680p. Apud Galvão (1990).
- Chu, S. T. (1978) Infiltration during ana unsteady rain. *Water Resources Research*, 14(3): 461-466.
- Cook, H. L. (1936). The nature and controlling variables of the water erosion process. *Soil science society american proc.* 1: 487-494.

- Croley, T. E., II. (1982) Unsteady overland sedimentation. *Journal of hydrology*, 56:325-346. Apud Lopes (1987).
- Curtis, D. C. (1976) A deterministic urban storm water and discharge model. In: Proc. Of National Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics, and Sediment Control. University of Kentucky. Lexington, KY. P. 151-162. Apud Foster (1982).
- Davis, S. S. (1978) Deposition on nonuniform sediment by overland flow on concave slopes. West Lafayette, Purdue University, 137p. M. Sc. Thesis. Apud Lopes (1987).
- Einstein, H. A. (1968) Deposition of suspended particles in a gravel bed. *Journal of the Hydraulics, Proc. ASCE*, 94(HY5):1197-1205. Apud Lopes (1987).
- Ellison, W. D. (1947) Soil erosion studies. *Agricultural Engineering*, Vol. 28. Apud Foster (1982).
- Engelund, F. & Hansen, E. (1967) A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, 62p. Apud Lopes (1995).
- Fleming, G. & Al Kadhim, A. (1982) Sediment modelling and data sources: a compromise in assessment. In: Walling, D. E. Recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield. Exeter, IAHS, p. 251-259. IAHS publication 137.
- Foster, G. R. (1982) Modeling the erosion process. In: Haan, C. T. ; Johnson, H. P. & Brakensiek, D. L., Ed. *Hydrologic modeling of small watersheds*, St. Joseph, American Society Agricultural Engineers, p. 297-380.
- Fotius, G. (1983) Bacia Experimental de Sumé; estratificação e composição da vegetação. In: Cadier, E.; Freitas, B. J. de & Leprun J. C. *Bacia Experimental de Sumé; instalação e primeiros resultados*. Recife, SUDENE, p. 46-53.
- Galvão, C. de O. (1990). Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo em microbacias. Campina Grande. 185p. Dissertação de Mestrado.
- Góes, C. C. F. 1993. A Influência das características da chuva e da cobertura vegetal sobre o escoamento e a erosão do solo. Campina Grande. 109p. Dissertação de Mestrado.
- Gomes, H. P., Srinivasan, V. S.; Cadier, E. & Galvão, C. de O (1987a) Um estudo experimental do escoamento superficial e erosão na região semi-árida paraibana. In: *Anais VII Simpósio brasileiro de hidrologia e recursos hídricos*. Salvador, ABRH, vol. 3, p. 322-337.
- Green, W. H. & Ampt, G. A (1911) Studies on soil physics, I. The flow of air and water through soils. *Journal Agr. Sci.*, 4(1) : 1-24. Apud Mein & Larson (1973).

- Holeman, J. N. (1968). The sediment yield of major rivers of the world, *Water resources research* 4(4): 737-747. Apud Foster (1982).
- Hutchinson, D. E.; Pritchard, H. W., and others. 1976. Resources Conservation glossary. In: *Journal of soil and water conservation* 31(4) p. 63. Apud Foster (1982).
- Kibler, D. F. & Woolhiser, D. A (1970) The kinematic cascade as a hydrologic model. Fort Collins, Colorado State University, 27p. Hydrologic Papers 39.
- Kilinc, M. & Richardson, E. V. (1973) Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. Hydrology Paper 63, Colorado State University, Fort Collins, CO., 54p. Apud Lopes (1995).
- Lane, L. J. & Shirley, E. D. (1985) Erosion and sediment yield equations: solutions for overland flow. West Lafayette, 22p. Apud Lopes (1987).
- Lanna, A E. & Schwarzbach, M. (1989) Modhac - modelo hidrológico auto calibrável. Porto Alegre, IPH/UFRS. Apud Galvão (1990).
- Leprun, J. C. (1981) A erosão, a conservação e manejo do solo no Nordeste Brasileiro; balanço, diagnóstico e novas linhas de pesquisa. Recife, SUDENE/ORSTOM, 107 p.
- Leprun, J. C. (1983) Relatório do fim do convênio de conservação e manejo de solo no Nordeste Brasileiro (1982-1983). Recife, SUDENE/ORSTOM, 290 p.
- Liong, S. Y.; Selvalingam, S. & Brady, D. K. (1989) Roughness values. For overland flow in subcatchments. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 115(2) : 203-214. Apud Galvão (1990).
- Lopes, V. L. (1995) CHDM: Catchment Hydrology Distributed Model. Version 3.0. Computer Freeware and Documentation. School of Renewable Natural Resources. University of Arizona; Tucson, AZ..
- Lopes V. L. (1980) Um estudo da erosão e da produção de sedimentos pelas chuvas. Campina Grande, 70 p. Dissertação de Mestrado.
- Lopes, J. E. G. ; Braga Jr., B. P. F. & Conejo, J. G. L. (1981) SMAP, a simplified hydrologic model. International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling, Mississippi. State University.
- Lopes, V. L. (1987) Anumerical model of watershed erosion and sediment yield. Tucson, 148 p. PH.D. Dissertation, University of Arizona.
- Lopes, V. L. & Lane, L. J. (1987) Um modelo computacional de simulação hidrológica. In: *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos*, Salvador, ABRH, Vol. 2, p. 481-494.

- Lopes, V. L.; Nearing, M. A.; Foster, G. R.; Finker, S. C. and Gilley J. E.. (1989) The water Erosion Prediction Project: Model Overview. In: Proc. ASCE National Water Conf., Irrigation and Drain. And Water resources planning and Mgmt. Divs. Newark, DE, p.503-510.
- Lopes, V. L.; Lane, V. L. & Nearing, M. A..(1994) Modeling soil erosion. In: Soil erosion research methods (R Lal, ed.), soil and water conservation society, p. 127-156.
- MacCuen, R. H. (1989). Hydrologic analysis and design, New Jersey, Chapter 15. Apud Santos (1994).
- Mehta, A. J. (1983) Characterization tests for cohesive sediments. In: Shen, H. W. Frontiers in hydraulic Engineering, Cambridge, Mass., ASCE/MIT, p. 79-84. Apud Lopes (1987).
- Mein, R. G. & Larson, C. L. (1973). Modeling infiltration during a steady rain. Water resouces Research, 9(2):384-394.
- Meyer L. D. and Wischmeier. (1969) Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. TRANSACTIONS of the ASAE 12(6):754-758, 762. Apud Foster (1982).
- Molinier, M.; Audry, P.; Desconnets, J. C. & Leprun, J. C. (1988) Projeto: "Dinâmica da água e das matérias em um ecossistema representativo do Nordeste brasileiro. Condições de extrapolação espacial na escala regional" Relatório de andamento dos trabalhos. Recife, ATP-PIREN, ORSTOM, 15p.
- Molinier, M.; Audry, P. & Leprun, J. C. (1989) Modelagem do escoamento superficial e da infiltração de um solo bruno do Nordeste semi-árido. In: Anais VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, ABRH Vol. 1, p. 432-443.
- Molinier, M; Galvão, C. de O. & Gomes, H. P. (1987) Determinação do escoamento de uma bacia hidrográfica através das téscnicas de simulação de chuva. In: Anais VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador, ABRH, Vol. 2, p. 530-544.
- Montenegro, J. P. B. & Silans, A. M. B. P. (1991) .IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - Rio de Janeiro - Anais Vol. 1 p. 233-243.
- Morris, E. M.. (1981) Models of surface water flow. Tropical Agricultural Hydrology. Edited by R.Lal and E. W. Russell. p. 421-431.
- Negev, M. (1967) A sediment model on a digital computer. Technical report 76. Stanford Univesity. Stanford, CA. 109 p. Apud Foster (1982).
- Onstad, C. A. & Foster, G. R. (1975) Erosion modeling on a watershed. Trans. of the ASAE 18(2):288-292. Apud Foster (1982).

- Raudikivi, A. J. (1976) Loose boundary hydraulics. 2. Ed. Oxford, Pergamon Press, 397p. Apud Galvão (1990).
- Rijn, L. C. V. (1984) Sediment transport, part II: Suspended load transport. J. Hydraul. Engng, ASCE, 110(11), 1613-1641.
- Rovey, E. W.; Woolhiser, D. A. & Smith, R. E. (1977) A distributed kinematic model of upland watersheds. Fort Collins, Colorado State University, 52p. Hidrologic Papers 93.
- Santos, C. A. G.. (1994). Runoff-erosion process modeling and determination of model parameters. Ehime, 103p. Dissertation, Ehime University.
- Santos, C. A. G.; Srinivasan, V. S.; Suzuki K. & Watanabe M. (1995) Otimização dos parâmetros de um modelo hidrodinâmico de erosão pelo método de POWELL. In: Anais XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Recife, ABRH, Vol. 4, p. 167-172.
- Simons, D. B. & Sentürk, F. (1977) Sediment transport technology. Fort Collins, Water Resources Publications, 807p.
- Smith, R. E. (1977) Field test of a distributed watershed erosion/sedimentation model. In: Soil erosion: Prediction and control. Special publication 21. Conservation society of american. Ankeny, IA, p. 201-209. Apud Foster (1982).
- Smith, R. E. & Woolhiser, D. A.. (1981) A kinematic model for surface mine sediment yield. Trans. of Am. Soc. Agr. Eng., 24 (6): 1508-1514. Apud Lopes 1987.
- Srinivasan, V. S. & Galvão, C. de O. (1994) Previsão do escoamento superficial e da erosão do solo através do modelo hidrodinâmico WESP. In: Anais II Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza, ABRH, Vol 1. p. 231-240.
- Srinivasan, V. S. & Galvão, C. O. (1995) Evaluation of runoff and erosion loss in microbasins utilizing the hydrodynamic model WESP. Advances in Engineering Software. Elsevier Applied Science. Vol. 22 nº 2. P. 79-85. .
- Srinivasan, V. S.; Gomes, H. P.; Leprun, J. C. & Silva, I. G. (1988) Erosion studies in Sumé, a semi-arid region in northeast of Brazil. In: Sediment Budgets (Proceedings of the Porto Alegre Symposium), Porto Alegre, IAHS. P. 307-314. IAHS Publ. Nº 174.
- Srinivasan, V. S.; Galvão, C. O.. (1997) (No prelo - comunicação pessoal) Resenha dos dados obtidos na Bacia Experimental de Sumé.
- Streeter, V. L. & Wylie, E. B.. (1982) Mecânica dos fluidos. 7º ed. São Paulo, McGraw-Hill, 585p.
- Trimble, S. W.. (1975). Denudation studies: Can we assume stream steady state? Science 188: p. 1207-1208.

- Tucci, C. E. M. (1987) Modelos determinísticos. In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos, Nobel/ABRH, p. 211-324.
- Tucci, C. E. M. (1993) Hidrologia: ciência e aplicação/ organizado por Carlos E. M. Tucci. Porto Alegre: Ed.da UFRS:ABRH: EDUSP. p. 374 - 388.
- Wischmeier, W. H. (1976). Use and misuse of the Universal Soil-Loss Equation. Journal of soil and water conservation 31(1): 5-9. Apud Foster (1982).
- Woolhiser, D. A. (1975) Simulation of unsteady overland flow. In: Mahmood, K. & Yevjevich, V. Unsteady flow in open channels, Fort Collins, Water Resources Publications, Chapter 12. Apud Galvão (1990).
- Yalin, Y. S. (1963) Na expression for bed-load transportation. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 89(HY3):221-250. Apud Lopes (1995).
- Yang, C. T. (1973) Incipient motion and sediment transport. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 99(HY10):1679-1704. Apud Lopes (1995).

ANEXO 1

ROTEIRO PARA COLETA DE DADOS NAS PARCELAS E MICROBACIAS

Roteiro para coleta de amostra nas fossas das microbacias

1º) Se a água na fossa supera em mais de 5 cm o tubo de descarga mais baixo:

- Anotar cota da fossa
- Sifonar a água limpa, coletando uma amostra de 5 litros em 3 estágios durante a sifonagem. -AMOSTRA 1
- Anotar cota da fossa depois da sifonagem.
- Mexer vigorosamente o fundo do tanque e ao mesmo tempo encher dois depósitos de 800 cm³. - AMOSTRAS 2 e 3
- Esvaziar a fossa pela descarga de fundo e lavá-la.

2º) Se a água na fossa não supera os 5 cm do tubo de descarga mais baixo:

- Anotar a cota da fossa.
- Mexer vigorosamente o fundo do tanque e ao mesmo tempo encher 2 depósitos de 800 cm³. - AMOSTRAS 2 e 3
- Esvaziar a fossa pela descarga de fundo e lavá-la.

3º) Se o amostrador automático recebeu água, anotar os volumes, mexer e ao mesmo tempo coletar de cada depósito uma amostra de 5 litros. - AMOSTRAS 4 e 5

4º) Limpar todas as fossas e equipamentos

Roteiro para coleta de amostra nas parcelas

1º) O balde não transbordou:

- Anotar o volume do balde.
- Mexer vigorosamente até homogeneizar.
- Coletar 2 amostras de 800 cm^3 - AMOSTRAS 1 e 2

2º) O balde transbordou:

- Anotar cota do tanque nº 1.
- Se a água no tanque passa de 10 cm, fazer uma sifonagem da água limpa, coletando uma amostra de 5 litros em 3 estágios ao longo da sifonagem. - AMOSTRA 3.
- Tirar o balde do tanque.
- Sifonar ou derramar a água limpa do balde jogando-a dentro do tanque.
- Anotar o volume do balde.
- Mexer o material do balde vigorosamente até homogeneizar.
- Coletar 2 amostras de 800 cm^3 . AMOSTRAS 1 e 2
- Anotar a cota do tanque (após a sifonagem).
- Mexer vigorosamente o material restante no fundo do tanque.
- Ao mesmo tempo encher 2 depósitos de 800 cm^3 . - AMOSTRAS 4 e 5

3º) O partidor transbordou:

- Anotar a cota no tanque nº 2.
- Mexer vigorosamente o material do fundo do tanque.
- Ao mesmo tempo encher 2 depósitos de 800 cm^3 . - AMOSTRAS 6 e 7

4º) Limpar todos os tanques, baldes e aparelhos para uma nova medição.

ANEXO 2

**DADOS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E EROSÃO NAS PARCELAS 1 E 4
CHEIAS 146 a 264**

Tabela 1 - Dados de escoamento superficial (lâmina) e erosão observados, referentes ao período de 1987 à 1991

Data	Cheia	Parcela 01		Parcela 04	
		Lâmina (mm)	Erosão (kg)	Lâmina (mm)	Erosão (kg)
12/02/87	146	1,751	3,473	1,344	2,923
13/02/87	147	0,120	0,082	0,000	0,000
2/03/87	148	0,140	0,060	-1,000	0,000
3/03/87	149	17,071	14,448	18,143	30,178
10/03/87	150	1,341	0,792	1,300	2,283
12/03/87	151	1,302	0,683	0,636	0,488
15/03/87	152	13,617	3,883	11,843	5,576
28/03/87	153	25,727	38,696	14,777	72,115
4/04/87	154	0,261	0,158	0,588	0,775
2/05/87	155	4,500	10,825	6,429	15,833
1/06/87	156	0,215	0,528	0,000	0,000
6/06/87	157	0,020	0,019	0,100	0,117
28/06/87	158	5,077	6,145	5,974	114,318
29/06/87	159	1,269	1,319	1,203	1,294
4/07/87	160	0,085	0,044	0,010	0,004
9/07/87	161	12,362	14,632	11,115	0,000
20/01/88	162	7,694	16,422	5,695	15,201
14/02/88	163	44,829	69,049	41,805	73,507
15/02/88	164	18,019	7,354	19,854	31,380
23/02/88	165	2,158	8,916	1,482	3,004
24/02/88	166	34,641	42,361	16,476	29,286
25/02/88	167	7,719	6,086	5,137	5,383
2/03/88	168	7,903	6,015	6,381	0,000
9/03/88	169	3,984	4,508	5,345	2,220
11/03/88	170	33,006	38,349	29,870	43,885
12/03/88	171	0,150	0,078	0,158	0,153
14/03/88	172	7,092	27,232	6,249	30,288
15/03/88	173	21,841	36,384	21,676	42,985

19/03/88	174	0,346	0,721	1,308	1,261
21/03/88	175	12,868	38,598	11,825	32,326
23/03/88	176	0,000	0,000	0,000	0,000
24/03/88	177	13,129	23,748	11,933	43,002
5/04/88	178	8,820	44,046	8,292	35,678
8/04/88	179	7,939	14,627	7,012	25,147
12/04/88	180	0,000	0,000	0,000	0,000
13/04/88	181	18,596	43,657	13,871	42,141
15/04/88	182	0,120	0,039	0,000	0,000
19/04/88	183	12,868	33,542	8,740	28,892
20/04/88	184	1,464	1,354	1,266	1,269
22/04/88	185	13,782	21,686	10,625	19,871
30/04/88	186	20,062	22,623	7,959	1,348
6/04/88	187	8,042	16,242	8,136	18,995
23/06/88	188	15,603	30,730	16,756	39,045
9/07/88	189	29,390	33,701	24,339	52,178
13/07/88	190	1,414	0,675	0,302	0,092
16/07/88	191	0,983	0,299	0,150	0,051
25/07/88	192	0,000	0,000	0,000	0,000
12/01/89	193	4,506	6,764	3,522	1,928
13/01/89	194	0,572	0,344	0,235	0,167
19/01/89	195	7,787	8,513	5,816	6,148
15/02/89	196	0,297	0,281	0,055	0,013
1/03/89	197	8,102	17,105	7,969	17,518
22/03/89	198	17,203	42,217	15,821	73,074
25/03/89	199	18,250	46,044	16,798	41,486
27/03/89	200	0,944	1,262	0,165	0,060
28/03/89	201	58,255	73,241	48,532	230,225
29/03/89	202	3,379	0,404	5,444	14,038
1/04/89	203	1,220	0,247	3,982	2,490
2/04/89	204	3,167	0,413	0,929	2,001
5/04/89	205	0,712	0,088	0,102	0,068
6/04/89	206	0,699	0,077	3,522	3,640

7/04/89	207	8,427	121,528	7,924	1,919
8/04/89	208	16,323	19,003	12,211	24,556
16/04/89	209	24,506	26,103	23,088	41,384
21/04/89	210	1,786	-0,010	2,410	1,768
23/04/89	211	1,034	1,422	3,117	2,694
27/04/89	212	7,989	15,636	7,969	9,752
4/05/89	214	0,684	0,344	0,410	0,179
9/05/89	215	4,097	8,935	2,430	1,841
11/05/89	216	0,336	0,971	0,235	0,507
12/05/89	217	1,258	1,583	2,603	3,701
11/06/89	218	9,507	12,702	9,535	7,573
12/06/89	219	19,123	18,666	0,000	0,000
13/06/89	220	2,608	0,596	12,403	7,843
18/06/89	221	0,000	0,000	0,000	0,000
30/06/89	222	0,000	0,000	0,000	0,000
3/07/89	223	0,572	0,241	0,816	0,117
4/07/89	224	2,858	2,097	3,967	2,346
5/07/89	225	17,310	15,913	11,301	-0,010
6/07/89	226	19,902	61,366	14,835	36,480
7/07/89	227	14,915	11,568	12,785	12,478
8/07/89	228	7,929	-0,010	5,495	1,574
20/09/89	229	14,702	27,972	10,581	16,607
7/12/89	230	7,963	27,692	7,782	4,515
8/12/89	231	7,853	10,727	7,747	7,672
16/12/89	232	17,330	12,218	14,946	19,614
22/12/89	233	1,898	3,898	1,039	0,717
23/12/89	234	6,387	2,305	3,795	0,195
24/12/89	235	48,235	43,425	37,707	230,615
27/12/89	236	0,170	0,133	0,150	0,062
8/02/90	237	0,000	0,000	0,000	0,000
9/02/90	238	16,334	22,816	14,356	21,654
10/02/90	239	3,287	16,787	1,967	6,053
25/02/90	240	2,729	27,913	1,336	0,564

26/02/90	241	4,988	3,507	3,390	0,821
7/04/90	242	3,230	9,956	4,457	7,196
27/04/90	243	1,331	-0,010	1,252	0,189
28/04/90	244	0,095	0,074	0,035	0,008
30/04/90	245	7,896	11,515	7,739	3,882
18/05/90	246	7,840	5,648	15,146	-0,010
28/05/90	247	6,349	5,299	6,135	-0,010
2/05/90	248	0,100	0,012	0,040	0,002
2/07/90	249	0,452	0,218	-1,000	-0,010
6/07/90	250	0,075	0,010	0,030	0,003
13/07/90	251	0,090	0,014	0,190	0,082
24/08/90	252	0,110	0,233	0,349	0,152
19/10/90	253	2,808	-0,010	3,167	3,841
22/01/91	254	0,168	0,205	0,112	2,818
23/01/91	255	6,429	15,606	0,000	0,000
5/02/91	256	0,000	0,000	0,000	0,000
6/02/91	257	-1,000	-1,000	0,000	0,000
15/05/91	258	0,000	0,000	0,000	0,000
11/03/91	259	75,785	251,019	0,000	0,000
29/03/91	260	15,570	78,901	0,000	0,000
4/05/91	261	20,433	11,379	0,000	0,000
6/05/91	262	0,265	0,059	0,000	0,000
18/05/91	263	0,025	0,023	1,369	4,506
19/05/91	264	4,983	4,679	5,368	3,094

-1,000 - corresponde a dado inexistente

ANEXO 3

DADOS DE PRECIPITAÇÃO - PERÍODO DE 1987 a 1991

Tabela 2 - Dados observados de precipitação em mm - período de 1987 a 1991

DATA	P49 (mm)	P50 (mm)	P51 (mm)	P52 (mm)	P57 (mm)	Pmédio (mm)
5/01/87	11,8	13,4	13	15	13	13,24
8/01/87	1	1	1,2	1	1	1,04
6/02/87	9,6	10,8	10,4	11,2	9,8	10,36
8/02/87	11	11,6	11	12,4	11,4	11,48
9/02/87	32,8	28,6	28,6	27,2	33,8	30,2
11/02/87	1,2	1,2	1,2	1,8	1,6	1,4
13/02/87	9,8	11,2	8	7,8	10,2	9,4
14/02/87	3,4	2,2	3	3	3,4	3
3/03/87	8,4	10,8	10,6	12	9,8	10,32
4/03/87	41,2	41	39	36,8	42,8	40,16
11/03/87	14,8	16	16	17,2	16,8	16,16
12/03/87	2,4	3,2	3,4	5,2	2,8	3,4
13/03/87	4,6	4,8	4,6	6,4	4,6	5
14/03/87	3,4	3,6	3,6	3,4	3,6	3,52
16/03/87	24,6	25,8	26,2	32,8	26,4	27,16
17/03/87	1,2	1,6	1,2	1,4	1,2	1,32
22/03/87	5,1	5,7	5	5,3	5,5	5,32
24/03/87	2,2	1,9	2,2	2	2,2	2,1
29/03/87	62,2	62,8	63,4	64,6	64,8	63,56
30/03/87	1,7	1,6	1,8	1,5	1,9	1,7
1/04/87	0,5	0,8	0,5	0,6	0,9	0,66
2/04/87	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,18
3/04/87	1,6	1,6	1,2	1,4	1,8	1,52
4/04/87	1,2	1,2	1,4	1,3	1,5	1,32
5/04/87	3,9	5,7	3,8	4,6	4,6	4,52
6/04/87	2,2	2,4	2	2	2,1	2,14
9/04/87	1,9	1,6	1,8	0,7	1,8	1,56

10/04/87	2,1	1,8	1,9	1,8	2,4	2
11/04/87	1,6	1,6	1,6	1,8	1,7	1,66
13/04/87	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,28
27/04/87	6,2	7,2	7	7,5	7,2	7,02
3/05/87	19,4	19,2	19	19,4	21,2	19,64
15/05/87	0,5	0,7	0,6	0,3	0,6	0,54
2/06/87	5,4	2,5	4,5	3,6	4,5	4,1
5/06/87	3,6	3,1	2,9	1,8	4,1	3,1
6/06/87	3,9	3,9	3,8	4,5	4,6	4,14
7/06/87	3,7	4,7	4,2	4,6	3,2	4,08
10/06/87	1,2	1,5	1	0,8	1,3	1,16
18/06/87	0,6	0,6	0,5	1	0,5	0,64
23/06/87	3,8	3,6	3,6	3,2	3,9	3,62
28/06/87	2,8	2,8	2,6	3	3	2,84
29/06/87	24,8	23,6	24,6	24,8	26,6	24,88
30/06/87	4,1	5,5	5,5	5,6	5,3	5,2
3/07/87	1,7	1,6	1,8	1,5	1,9	1,7
5/07/87	4,6	5	5,2	5,2	5,2	5,04
8/07/87	1	0,8	0,8	0,7	0,9	0,84
10/04/87	23,6	26,2	27,6	27,8	26,6	26,36
12/07/87	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5
17/07/87	0,9	0,8	1	1,2	1,2	1,02
20/07/87	3,5	4	3,6	3,8	4	3,78
17/08/87	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3
23/08/87	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,32
25/08/87	3,5	3,8	3,6	3,4	3,6	3,58
2/10/87	1,2	1	1	0,8	1,2	1,04
13/01/88	7	7,8	7,6	7,4	7,4	7,44
21/01/88	24,2	21,8	21,6	30,4	25,2	24,64
26/01/88	1,6	1,8	2,2	2	1,6	1,84

6/02/88	1	1	1,2	1,2	1,2	1,12
15/02/88	72	67,2	69,6	74,8	72,8	71,28
16/02/88	30,6	32,8	31,2	35,2	30,6	32,08
17/02/88	0,6	0,8	0,6	1	0,6	0,72
24/02/88	11,8	12,2	12,6	12,6	11,8	12,2
25/02/88	49,4	49,8	50,8	56,2	52,4	51,72
26/02/88	15,6	16	16,4	20,6	16	16,92
3/03/88	20,2	22,8	19	19,6	21,6	20,64
4/03/88	-1	-1	-1	-1	1,4	1,4
10/03/88	16,4	15,6	14,4	15,2	15,6	15,44
12/03/88	44,2	49,2	45,2	42,2	47	45,56
13/03/88	4,2	5,4	4,7	4,6	4,4	4,66
15/03/88	13,6	14	13,8	14,2	13,2	13,76
16/03/88	30,2	32	30,4	31,6	32,2	31,28
20/03/88	6,6	8,2	7,3	7,2	7	7,26
22/03/88	24,4	24,6	22,6	24,4	25	24,2
24/03/88	2,3	1,8	2,2	1,8	2	2,02
25/03/88	20,9	22,2	22,2	23,4	22	22,14
6/04/88	22	24,8	23,4	16,6	23,8	22,12
8/04/88	-1	-1	-1	-1	4	4
9/04/88	17,8	18	15,4	16,8	14,2	16,44
13/04/88	4	3,5	2,8	3,5	4,1	3,58
14/04/88	30,4	27,4	31	30,4	29,6	29,76
16/04/88	6,8	7,4	6,9	6,8	7,6	7,1
17/04/88	2,5	2	2,2	2,2	2,5	2,28
18/04/88	2,1	2,2	2,4	2,4	2,6	2,34
19/04/88	0,3	0,4	0,5	0,4	0,3	0,38
20/04/88	22,6	23,2	23,2	22,8	23	22,96
21/04/88	4,6	5,6	6,2	6,2	5	5,52
22/04/88	1,3	1,4	1,5	1,6	0,2	1,2

23/04/88	29,4	31	29,6	25,8	31	29,36
25/04/88	2,4	2,4	2,6	2,2	2,7	2,46
28/04/88	0,5	0,6	0,4	0,4	0,6	0,5
30/04/88	3,8	3,8	3,5	3,6	3,9	3,72
1/05/88	16	14,8	13,8	13,6	16	14,84
3/05/88	1,4	1,2	1,4	1,6	1,6	1,44
7/05/88	15	16,4	16,4	17,6	14,8	16,04
22/05/88	4	3,5	4,2	3,4	3,9	3,8
9/06/88	3,5	3,2	2,7	2,5	4	3,18
10/06/88	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,22
18/06/88	1,6	1,8	1,6	2,2	2	1,84
24/06/88	32	34,6	31,6	39,6	33,8	34,32
25/06/88	4,7	4,6	4,6	4,8	5	4,74
29/06/88	1,1	1,3	1,2	1,2	1	1,16
3/07/88	1	1,2	1,3	1,2	0,9	1,12
10/07/88	55,2	57,2	54,4	53,4	55,4	55,12
14/07/88	10,2	10	9,4	11	11	10,32
15/07/88	0,8	1	1,2	1	1,2	1,04
16/07/88	9,4	9,6	9,2	9,5	10	9,54
17/07/88	5,6	5,8	5,5	5,6	6	5,7
18/07/88	1,5	1,8	1,8	1,6	2	1,74
19/07/88	0,2	0,4	0,4	0,5	0,3	0,36
25/07/88	1,6	1,5	1,6	1,6	2	1,66
26/07/88	4,2	4,4	4,2	4,3	4	4,22
7/09/88	2,2	2,3	2,2	2	2,2	2,18
8/09/88	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,46
13/09/88	1,3	1,2	1,2	1,4	1,2	1,26
2/10/88	0,4	0,5	0,5	0,5	0,8	0,54
20/11/88	2,5	2,4	2,3	2,8	2,4	2,48
5/12/88	2,4	2,2	2	1,8	2,8	2,24

7/12/88	0,6	0,4	0,6	0,5	0,5	0,52
8/12/88	3,4	3,4	3	3	3,2	3,2
18/12/88	1	0,8	1	1,3	1,2	1,06
19/12/88	0,4	0,6	0,5	0,8	0,5	0,56
13/01/89	22,2	20,6	24	28,6	21,6	23,4
14/01/89	4,9	5,3	4,3	5,5	5,3	5,06
20/01/89	15,4	12	13,2	15,2	16,2	14,4
26/01/89	1,4	1,6	1,4	1,5	1,5	1,48
15/02/89	1,8	1,5	1,6	1,6	1,6	1,62
16/02/89	4,5	3,8	4,2	4,8	4,7	4,4
2/03/89	15,8	16,4	16,2	16,8	16,6	16,36
23/03/89	30,4	32,4	30	28,2	32	30,6
24/03/89	6,6	8,2	7,7	8,2	7,2	7,58
26/03/89	31,4	36,2	34,2	36,2	34,8	34,56
28/03/89	5,6	5,4	6	7,2	6,2	6,08
29/03/89	89,6	93	88,2	99,4	94	92,84
30/03/89	7,2	9	9,8	12	8	9,2
2/04/89	11,2	17	15	18,2	13,2	14,92
3/04/89	8	9	9,6	9,2	8,4	8,84
6/04/89	7,2	7	6,6	5,2	7,6	6,72
7/04/89	4	8,6	6	8,6	4,6	6,36
8/04/89	25,2	26	24,6	25,8	25,4	25,4
9/04/89	27	28,6	22,2	28,4	28,6	26,96
11/04/89	1,9	2,2	2	2	2	2,02
12/04/89	3,8	3,6	3,5	3,5	3,9	3,66
15/04/89	2	2,4	2	0,9	2,2	1,9
17/04/89	39,6	40,2	39	40,4	39,6	39,76
22/04/89	9,4	11,2	10,8	13	9,6	10,8
24/04/89	6,2	9,8	8,2	7	6,6	7,56
28/04/89	24,6	25,4	28,2	31,2	26	27,08

30/04/89	0,8	0,8	0,9	1	0,8	0,86
4/05/89	4,3	5,1	2,6	2,6	4,6	3,84
5/05/89	6,6	6,6	6,3	7,2	7,1	6,76
10/05/89	11,3	12,5	13,4	16	12,2	13,08
12/05/89	5,2	6	5,6	5,8	5,6	5,64
13/05/89	9,2	12,6	12	11,6	10,6	11,2
14/05/89	0,5	0,6	0,4	0,2	0,5	0,44
16/05/89	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5
20/05/89	3	3,2	2,8	3,6	4,4	3,4
21/05/89	0,8	0,6	0,4	0,5	0,6	0,58
22/05/89	1,5	1,4	1,5	1,3	1,4	1,42
25/05/89	8,2	8,2	8,4	8,6	8	8,28
26/05/89	0,4	0,5	0,4	0,6	0,5	0,48
31/05/89	2,4	2,6	2,4	2,3	2,5	2,44
2/06/89	0,4	0,3	0,4	0,5	0,3	0,38
12/06/89	21,8	22,8	22,5	22,6	23,6	22,66
13/06/89	31,4	32,8	33	31,8	32,2	32,24
14/06/89	7,1	8	7,6	7,9	7,4	7,6
19/06/89	1,9	2,2	4,1	4,6	1,6	2,88
23/06/89	2,6	2,6	2,5	2,4	2,4	2,5
27/06/89	0,4	0,6	0,6	0,8	0,4	0,56
1/07/89	3,2	3,4	3,5	3,6	3,6	3,46
3/07/89	0,4	0,2	0,4	0,4	0,3	0,34
4/07/89	5,2	5,5	5,5	5	5,6	5,36
5/07/89	8,4	11,6	9,8	8,5	8,6	9,38
6/07/89	27	23	23,6	24,2	26,8	24,92
7/07/89	31,4	27,2	30,4	32,6	31,8	30,68
8/07/89	29	31,4	28,2	31,2	31	30,16
9/07/89	12	12,4	12,4	12,6	13,2	12,52
12/07/89	4,8	5,4	5	5,2	5,1	5,1

13/07/89	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7
17/07/89	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,42
22/07/89	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5
25/07/89	1,6	1,6	1,5	1,8	1,8	1,66
26/07/89	2,5	3,2	2,8	3	2,8	2,86
15/08/89	2,8	3,2	3	2,9	3	2,98
19/08/89	1,9	1,6	2	1,6	1,8	1,78
30/08/89	4,4	4	4,2	4,3	4,8	4,34
7/09/89	0,6	0,6	0,5	0,8	1	0,7
21/09/89	37,8	39,6	39	39,6	41,2	39,44
31/10/89	2	3	2,6	2,2	2,5	2,46
5/12/89	0,6	0,7	0,5	0,8	0,6	0,64
7/12/89	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,58
8/12/89	30,2	29,6	20,4	25,6	32	27,56
9/12/89	17,6	19,4	20	18,6	19,2	18,96
17/12/89	32,4	31,8	32	31,2	34	32,28
19/12/89	2,2	2	2,2	2,3	2	2,14
20/12/89	0,8	0,7	0,7	0,8	0,6	0,72
23/12/89	9,8	9,5	9,8	9,4	9,6	9,62
24/12/89	15,6	16,2	16,6	16,2	15,6	16,04
25/12/89	79,4	82	78,8	81,6	80,2	80,4
28/12/89	4	4,2	3,8	4,2	3,8	4
31/01/90	2	2,3	2,2	2	2,2	2,14
9/02/90	12,3	12,5	12,4	12,6	12,2	12,4
10/02/90	34,8	35,6	35,8	36,2	36,6	35,8
11/02/90	8,4	9,2	9,8	9,6	8,4	9,08
17/02/90	0,5	0,6	0,4	0,4	0,6	0,5
18/02/90	2,5	2,6	2,4	2,5	2,7	2,54
23/02/90	0,6	0,8	0,6	0,5	0,6	0,62
26/02/90	11	11	11,2	11,8	11,6	11,32

27/02/90	11,8	11,6	11,2	12	11,6	11,64
3/03/90	2	2,2	2,6	2,2	2	2,2
8/04/90	17	14,4	14,8	12,6	17,4	15,24
24/04/90	4	4,2	5	4,6	4,5	4,46
25/04/90	3,5	3,6	3,8	3,6	3,9	3,68
28/04/90	16,8	17,6	18,2	16,6	20	17,84
29/04/90	4,7	4,2	4,5	4,8	4,4	4,52
1/05/90	19,2	20	19,6	19,8	21	19,92
19/05/90	16	19,2	18,8	19,2	18,4	18,32
26/05/90	0,8	0,5	0,8	0,5	0,8	0,68
27/05/90	1,8	1,6	1,5	1,6	1,7	1,64
28/05/90	0,7	0,6	0,6	0,5	0,7	0,62
29/05/90	15,2	15,8	17,2	17	16	16,24
30/05/90	2,2	1,8	1,6	2	2	1,92
31/05/90	1,2	0,7	0,8	0,6	0,8	0,82
2/06/90	2,8	2,6	2,6	2,6	2,5	2,62
3/06/90	4,2	4,3	4,4	4	4,5	4,28
4/06/90	2,2	2,4	2,2	2,5	2,3	2,32
5/06/90	3	3,2	3	2,9	3,1	3,04
7/06/90	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5
8/06/90	3,2	3,2	3,2	3,4	3,8	3,36
9/06/90	1,5	1,5	1,3	1,4	1,5	1,44
26/06/90	1,1	1	0,9	1,2	0,6	0,96
30/06/90	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,56
2/07/90	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5
3/07/90	6,3	7	6,6	6,8	7,2	6,78
7/07/90	4,4	3	4,2	4,6	4,2	4,08
14/07/90	5,2	5,6	5,5	5	5,4	5,34
22/07/90	0,5	0,5	0,7	0,6	0,6	0,58
6/08/90	1,2	1,4	1,5	1,2	1	1,26

25/08/90	10,4	10	10,2	10,8	10,6	10,4
27/08/90	0,6	0,6	0,8	0,5	0,7	0,64
28/09/90	2,8	2,5	2,6	2,5	2,6	2,6
2/10/90	3,5	3,4	3,6	3,8	3,4	3,54
20/10/90	16,6	11,8	17,8	17,6	15	15,76
10/12/90	5,5	5,2	5,4	4,8	5,7	5,32
23/01/91	10,5	10,2	10,8	10,6	10,4	10,5
24/01/91	13	13,4	12,6	13,8	13,6	13,28
3/02/91	0,4	0,5	0,4	0,6	0,5	0,48
5/02/91	3,2	3,6	3,8	3,6	3,4	3,52
6/02/91	22,6	24	25	26,2	23,6	24,28
7/02/91	1,9	1,8	2,2	2	2	1,98
15/02/91	31	31,6	32	31,8	32	31,68
19/02/91	23	23,6	24,6	25	24,2	24,08
20/02/91	1,2	1,4	1,2	1,4	1,3	1,3
3/03/91	8,5	8,2	8,8	8,4	8,6	8,5
10/03/91	4,5	4,6	4,6	4,6	4,3	4,52
13/03/91	19,2	19,6	19,8	20,2	19,4	19,64
14/03/91	43,6	46,2	44,8	46,8	45	45,28
15/03/91	63	65,5	66,8	66,4	64,2	65,18
17/03/91	29,2	30,2	30	29,8	29,4	29,72
18/03/91	36,8	38,6	37,8	38,2	37,6	37,8
19/03/91	0,8	0,7	0,8	1	0,8	0,82
25/03/91	0,4	0,4	0,8	0,6	0,5	0,54
29/03/91	2,5	2,4	2,6	2,7	2,5	2,54
30/03/91	33,4	34	33,6	34,2	33,6	33,76
1/04/91	1	1,4	1,6	1,6	1,2	1,36
3/04/91	3,2	3,4	3,3	3,2	3	3,22
17/04/91	21,8	22	23,8	21,6	22,4	22,32
18/04/91	6,8	7	7	7,2	7	7

19/04/91	3,2	3,4	3	3,4	3,3	3,26
22/04/91	11,4	18,8	11,6	11,8	11,4	13
30/04/91	26,2	26,4	26,3	26	26	26,18
1/05/91	1,7	1,6	1,4	1,8	1,6	1,62
2/05/91	13,2	13	12,8	12,9	13	12,98
6/05/91	8	8	8,2	8,2	9,7	8,42
7/05/91	5,2	5	5,3	5,4	4,4	5,06
10/05/91	5,1	5	5,2	5,2	5	5,1
14/05/91	5	5,2	4,8	5	5,2	5,04
15/05/91	7,6	7,8	7,6	7,6	8	7,72
19/05/91	11,8	12,4	12,2	12,8	11,6	12,16
20/05/91	12	12,4	12,5	12,2	12,6	12,34
23/05/91	1,6	1,4	1,5	1,4	1,6	1,5
1/06/91	0,6	0,5	0,6	0,8	0,7	0,64
6/06/91	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,52
8/06/91	3,2	3,2	3	3,6	3,4	3,28
28/06/91	2,4	2,8	2,6	2,5	2,6	2,58
2/07/91	1,2	1,4	1,4	1,2	1,2	1,28
4/07/91	0,6	0,6	0,6	0,4	0,5	0,54
27/07/91	5	5,2	5,5	5	5,2	5,18
1/08/91	1,2	1,2	1	1,4	1,3	1,22
16/08/91	2,5	2	2,2	2,6	2,4	2,34
18/08/91	6,4	6,2	6,5	6,8	6,4	6,46
27/08/91	6,5	6,7	6,8	6,8	6,6	6,68
19/11/91	9	9,2	9,6	8,8	9,4	9,2

-1,0 corresponde a dado inexistente; P49, P50, P51, P52, P53 e P57 são os pluviômetros da Bacia Experimental de Sumé e Pmédio é a precipitação média.

ANEXO 4

**DADOS DE PLUVIOGRAFIA DAS CHEIAS UTILIZADAS NAS
PARCELAS 1 E 4**

Tabela 4a - Dados de Pluviografia das cheias utilizadas nas parcelas 1 e 4

Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
146	12/02/87	1	6,0000
		5	25,2000
		15	16,8000
		25	2,4000
		30	3,0000
		34	18,0000
		35	1,0000
		47	1,2000
		62	0,8000
		77	0,8000
		93	1,1000
		104	0,1000
		145	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
149	3/03/87	1	33,0000
		3	18,0000
		8	63,0000
		10	11,1000
		17	20,6000
		24	2,0000
		39	4,8000
		44	3,6000
		49	3,6000
		54	2,4000
		59	1,2000
		69	1,6000
		84	0,9000
		98	6,0000
		99	0,1000
		151	0,2000
		222	0,1000
		290	30,0000
		302	48,0000
		313	47,0000
		319	17,6000
		333	5,1000
		346	3,3000

		357	6,0000
		369	1,6000
		384	0,2000
		411	0,8000
		419	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
150	10/03/87	1	1,3000
		19	84,0000
		21	30,0000
		25	10,0000
		31	2,4000
		91	0,6000
		101	0,6000
		111	1,3000
		139	3,3000
		161	2,4000
		181	0,6000
		191	0,3000
		211	0,6000
		231	3,0000
		241	1,2000
		251	0,7000
		311	1,0000
		341	2,1000
		361	1,2000
		371	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
151	12/03/87	1	31,5000
		5	20,0000
		8	8,4000
		13	1,2000
		18	6,0000
		20	0,8000
		36	0,0000
		50	6,0000
		51	0,4000
		68	0,0000

Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
153	28/03/87	1	24,0000
		4	13,1000
		21	9,0000
		31	8,4000
		41	2,6000
		48	32,0000
		51	60,0000
		60	152,0000
		63	60,0000
		72	27,0000
		86	12,9000
		93	9,0000
		101	2,0000
		116	12,0000
		121	9,8000
		129	2,7000
		156	5,4000
		166	1,7000
		191	5,5000
		202	1,8000
		212	12,0000
		213	0,9000
		226	7,8000
		236	4,8000
		241	4,3000
		273	1,6000
		311	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
155	2/05/87	1	0,6000
		11	9,6000
		21	9,0000
		25	18,0000
		32	31,7000
		50	18,0000
		59	5,3000
		68	9,0000
		74	0,4000

		89	2,2000
		122	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
159	29/06/87	1	24,0000
		3	27,0000
		7	12,0000
		9	1,1000
		20	1,2000
		25	0,1000
		79	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
162	20/01/88	1	78,0000
		3	3,0000
		5	54,0000
		10	64,0000
		19	34,5000
		23	8,0000
		29	76,0000
		32	4,0000
		38	9,0000
		42	0,0000
		63	12,0000
		64	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
163	14/02/88	1	4,0000
		4	66,0000
		11	95,0000
		17	94,0000
		23	57,0000
		33	80,6000
		40	43,0000
		46	51,0000
		52	47,5000
		64	43,7000
		71	18,0000
		76	2,0000

		82	3,4000
		89	12,0000
		90	0,6000
		111	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
169	9/03/88	1	26,4000
		6	30,0000
		9	18,0000
		13	48,0000
		15	66,0000
		16	39,0000
		18	90,0000
		19	7,5000
		27	2,0000
		33	0,8000
		41	4,0000
		44	2,0000
		47	6,0000
		53	3,0000
		61	2,0000
		64	1,2000
		69	2,0000
		72	13,5000
		76	12,0000
		81	8,0000
		84	3,0000
		92	2,0000
		98	0,3000
		121	0,6000
		131	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
172	14/03/88	1	42,0000
		2	4,5000
		6	1,5000
		10	12,0000
		12	2,0000
		15	18,0000
		21	41,3000

		30	15,0000
		32	7,2000
		42	12,0000
		47	3,0000
		55	2,6000
		62	1,2000
		72	0,1000
		112	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
173	15/03/88	1	81,0000
		5	81,0000
		9	115,0000
		14	43,5000
		22	15,0000
		26	4,5000
		30	13,2000
		35	24,0000
		37	5,0000
		43	0,4000
		57	1,2000
		62	0,2000
		95	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
175	21/03/88	1	6,0000
		3	42,0000
		5	28,8000
		10	36,0000
		12	72,0000
		13	30,0000
		15	19,5000
		19	52,0000
		22	28,8000
		27	114,0000
		28	63,0000
		30	54,0000
		32	16,0000
		35	15,0000
		37	4,3000

		44	3,0000
		50	3,8000
		58	1,5000
		62	1,2000
		72	3,7000
		85	3,0000
		95	4,8000
		100	3,0000
		104	0,4000
		120	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
177	24/03/88	1	1,2000
		6	0,0000
		12	120,0000
		14	115,0000
		19	33,0000
		25	54,0000
		26	1,2000
		31	12,0000
		35	9,0000
		37	0,7000
		46	0,5000
		58	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
178	5/04/88	1	40,0000
		4	84,0000
		5	21,6000
		10	90,0000
		11	57,0000
		13	108,0000
		14	108,0000
		15	48,0000
		16	21,6000
		21	96,0000
		22	48,0000
		23	19,2000
		28	7,2000
		33	2,6000

		40	4,0000
		43	6,0000
		44	0,0000
		90	1,3000
		99	39,0000
		101	12,0000
		105	3,0000
		109	1,2000
		114	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
179	8/04/88	1	96,0000
		2	96,0000
		3	108,0000
		4	96,0000
		5	33,0000
		7	36,0000
		9	45,0000
		11	33,0000
		13	6,0000
		19	0,0000
		21	3,0000
		25	0,0000
		51	3,0000
		55	10,0000
		61	1,2000
		71	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
181	13/04/88	1	144,0000
		2	120,0000
		3	120,0000
		4	144,0000
		5	90,0000
		6	60,0000
		8	108,0000
		9	96,0000
		10	96,0000
		11	84,0000
		12	78,0000

		13	13,0000
		19	16,5000
		23	3,0000
		29	1,5000
		33	1,2000
		43	0,0000
		102	24,0000
		103	1,5000
		107	10,5000
		111	12,0000
		113	30,0000
		114	16,5000
		118	30,0000
		122	30,0000
		125	6,0000
		130	0,3000
		153	0,7000
		171	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
183	19/04/88	1	42,0000
		3	90,0000
		4	54,0000
		6	45,0000
		8	75,0000
		10	18,0000
		16	33,0000
		20	72,0000
		21	42,0000
		22	4,0000
		25	1,2000
		30	3,0000
		32	9,0000
		34	28,0000
		37	20,0000
		40	18,0000
		42	15,0000
		50	18,0000
		52	3,4000
		59	10,5000
		63	4,5000

		67	2,4000
		72	1,0000
		78	0,4000
		92	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
184	20/04/88	1	28,0000
		4	27,6000
		9	6,0000
		12	1,2000
		17	6,0000
		19	2,0000
		22	0,9000
		29	0,2000
		59	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
185	22/04/88	1	21,0000
		3	6,0000
		5	16,0000
		11	1,5000
		19	0,0000
		30	12,0000
		31	42,0000
		33	28,0000
		36	4,8000
		41	2,0000
		44	2,4000
		49	0,0000
		56	1,5000
		60	0,0000
		141	0,2000
		212	3,0000
		214	0,0000
		218	4,0000
		221	0,0000
		231	26,4000
		236	4,5000
		240	0,7000
		249	15,0000

		251	1,5000
		255	0,0000
		259	4,3000
		266	18,0000
		270	36,0000
		272	10,3000
		279	6,0000
		283	0,8000
		291	0,6000
		301	0,0000
		393	9,0000
		401	9,0000
		405	14,4000
		410	36,0000
		412	24,0000
		416	14,4000
		421	8,0000
		430	18,0000
		431	3,0000
		441	1,2000
		451	3,0000
		459	1,2000
		474	4,0000
		480	3,0000
		482	3,0000
		488	0,6000
		507	0,9000
		520	12,0000
		521	9,0000
		525	6,0000
		531	8,6000
		538	1,2000
		548	0,5000
		571	0,4000
		588	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
187	6/05/88	1	4,8000
		6	90,0000
		8	8,0000
		11	0,3000

		33	50,2000
		41	24,0000
		43	9,0000
		45	60,0000
		46	2,4000
		51	1,0000
		63	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
189	9/07/88	1	12,0000
		5	12,0000
		8	3,6000
		13	21,0000
		15	2,4000
		20	14,0000
		26	4,5000
		30	4,0000
		33	3,0000
		35	6,0000
		40	1,2000
		45	0,6000
		55	0,0000
		98	6,0000
		100	32,0000
		103	24,0000
		105	4,5000
		109	9,0000
		113	2,0000
		116	0,0000
		128	6,0000
		129	2,0000
		132	3,6000
		137	34,0000
		140	16,5000
		144	17,0000
		150	42,0000
		152	42,0000
		154	84,0000
		155	96,0000
		156	126,0000
		157	22,8000

		162	66,0000
		164	72,0000
		166	84,0000
		167	51,0000
		169	24,0000
		174	144,0000
		175	33,0000
		179	32,0000
		182	39,0000
		184	45,0000
		186	42,0000
		188	16,8000
		193	33,0000
		195	13,2000
		200	7,2000
		205	10,7000
		214	3,4000
		228	0,9000
		235	4,0000
		238	3,0000
		242	0,0000
		253	6,0000
		257	3,0000
		271	0,7000
		280	3,0000
		284	1,2000
		299	0,8000
		315	1,2000
		325	3,0000
		335	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
197	1/03/97	0	0,9231
		13	0,0536
		125	7,5000
		141	48,0000
		153	34,5000
		157	11,1429
		164	0,0000

Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
198	22/03/89	0	6,0000
		8	0,2609
		31	15,1429
		52	3,4286
		59	37,5000
		63	58,2000
		73	44,7692
		86	114,0000
		87	4,0000
		93	0,6000
		113	0,6000
		133	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
199	25/03/89	0	6,0000
		6	118,8000
		11	82,2857
		18	9,0000
		26	0,0000
		40	0,2143
		68	14,4000
		73	20,0000
		79	1,2632
		98	0,1765
		132	1,2857
		146	0,0000
		186	0,3750
		266	0,0000
		389	1,2000
		394	0,0451
		527	19,2000
		532	7,2000
		537	12,0000
		540	2,0000
		546	2,4000
		551	0,0426
		833	1,8000
		843	7,2857
		857	0,0000

Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
202	29/03/89	0	44,0000
		6	24,8571
		13	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
204	2/04/89	0	3,0000
		10	0,2308
		36	2,0000
		45	19,0909
		56	0,6667
		65	3,0000
		79	11,3333
		88	1,7778
		115	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
205	16/04/89	0	0,4714
		140	0,7500
		276	1,9091
		298	9,0000
		306	6,7500
		314	2,5000
		326	1,2727
		359	0,0619
		456	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
212	27/04/89	0	132,0000
		1	20,1818
		12	25,7143
		19	25,7143
		26	6,0000
		31	32,0000
		34	22,8000
		39	4,0000
		42	0,4615

		55	1,8000
		65	0,1154
		117	1,2857
		131	0,0000
		149	2,7273
		171	3,7143
		192	0,6000
		202	20,5714
		209	6,7500
		217	3,0000
		227	0,9000
		247	2,0870
		270	0,3529
		321	1,2000
		331	2,7273
		342	0,0645
		435	0,8571
		442	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
215	9/05/89	0	63,0000
		2	63,0000
		4	8,0000
		7	28,0000
		10	34,0000
		13	17,2500
		21	2,0000
		27	48,0000
		28	0,0632
		123	0,0000
		210	0,0833
		282	0,7500
		290	1,09090
		301	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
218	11/06/89	0	0,0984
		61	3,3333
		70	8,40000
		80	24,0000

		85	42,0000
		88	120,0000
		89	19,2000
		94	1,7647
		111	0,2000
		141	1,5000
		169	0,2857
		190	0,3750
		206	0,4615
		258	0,5455
		269	6,6667
		278	18,0000
		284	22,8000
		289	44,0000
		292	14,2500
		300	13,5000
		304	0,0000
		315	0,8000
		330	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
224	4/07/89	0	21,0000
		6	84,0000
		7	14,2500
		15	4,8000
		25	3,2727
		36	0,0645
		129	7,0000
		135	0,0923
		200	1,3333
		218	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
226	6/07/89	0	16,5000
		4	72,7500
		12	95,0000
		18	24,7500
		26	4,4211
		45	6,8000
		60	15,4286

		67	6,5000
		79	0,0600
		179	0,0000
		364	5,4545
		375	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
229	20/09/89	0	25,2000
		5	66,0000
		7	30,0000
		11	40,0000
		14	4,2857
		21	14,6667
		30	10,8000
		40	6,0000
		51	12,0000
		56	10,8000
		66	7,5000
		74	8,1429
		88	60,0000
		90	25,2000
		95	44,0000
		98	19,2000
		103	31,5000
		107	34,8000
		112	31,5000
		116	10,4000
		131	4,2000
		141	0,2857
		162	2,0000
		174	1,5000
		190	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
238	9/02/90	0	19,2000
		5	63,0000
		7	19,0000
		13	34,0000
		16	28,5000
		20	16,5000

		24	22,0000
		27	28,5000
		31	39,0000
		33	156,0000
		34	42,0000
		37	66,0000
		38	60,0000
		39	138,0000
		40	55,2000
		45	126,0000
		46	15,0000
		52	4,6667
		61	2,0000
		79	1,5789
		98	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
239	10/02/90	0	42,0000
		2	21,0000
		8	40,0000
		11	13,5000
		19	0,0000
		64	1,7143
		71	0,4000
		86	2,3077
		99	3,0000
		103	0,5000
		115	0,0000
		146	0,0000
Cheia	Data	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
242	7/04/90	0	0,5000
		12	12,0000
		14	1,8000
		24	4,2857
		31	0,5714
		52	1,8000
		62	4,2000
		72	14,0000
		75	30,0000

	309	0,1000	
	369	0,0000	
	571	4,0000	
	577	4,6667	
	586	0,5000	
	610	0,0635	
	799	0,1081	
	910	0,0000	
	923	0,6667	
	932	0,8571	
	939	8,0000	
	945	1,0000	
	957	0,0000	