

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIENCIAS E TECNOLOGIA
CURSOS DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL
E DA EROSAO DO SOLO EM MICROBACIAS

Campina Grande

Setembro 1990

CARLOS DE OLIVEIRA GALVAO

MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL
E DA EROSAO DO SOLO EM MICROBACIAS

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.

AREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HIDRICOS

VAJAPEYAM S. SRINIVASAN

Orientador

Campina Grande - PB

Setembro 1990



G182m Galvao, Carlos de Oliveira
Modelagem do escoamento superficial e da erosao do solo em microbacias / Carlos de Oliveira Galvao. - Campina Grande, 1990.
185 f. : il.

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

1. Solo - 2. Bacia Experimental de Sume - 3. Dissertacao I. Srinivasan, Vajapeyam S. II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) III. Titulo

CDU 631.459(043)

CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO

MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL
E DA EROSAO DO SOLO EM MICROBACIAS

Dissertação aprovada em 25/09/1990


AREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HIDRICOS


Ph.D. VAJAPEYAM S. SRINIVASAN

Orientador


Dr. Ing. UBALD KOCH

Componente da Banca


Ph.D. ROBERALDO CARVALHO DE SOUZA

Componente da Banca

Campina Grande - PB

Setembro 1990

R

Stênio e Ana Rita Galvão,

meus pais,

que desde o começo me disseram para

escolher sempre o que me fizesse

feliz.

AGRADECIMENTOS

A UFPB, através da Sub-unidade de Execução do Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico para o Nordeste (SUEP/UFPB), pela liberação em tempo parcial para realização deste Curso.

Ao Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico para o Nordeste, Convênio UFPB/CNPq/BID/PDCT/NE, pela utilização dos dados gerados pelo Projeto "Modelo de aproveitamento hidroagrícola em bacias experimentais na micro-região de Sumé-PB". Agradecimentos à SUDENE e ao ORSTOM pelo apoio prestado, como participantes desse Projeto.

O Programa Nacional de Irrigação (PRONI) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) forneceram apoio através de bolsa de estudo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Vajapeyam S. Srinivasan, pela eficiente e precisa orientação.

Devo expressar o grande apoio recebido, durante todo o período da pesquisa, em numerosas consultas e discussões, do pesquisador Michel Molinier, do ORSTOM.

As discussões com os pesquisadores do ORSTOM Pierre Chevallier, Eric Cadier, Pierre Audry e Jean-Claude Leprun, com os professores Antônio Eduardo Lanna, do IPH/UFRS, e José Nilson Campos, da UFC, foram bastante proveitosas. Ao Professor Lanna agradeço especialmente a cessão do modelo Modhac, do qual

foi extraído o algoritmo de otimização de parâmetros implementado no MODIBI.

Aos professores da Área de Engenharia de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil da UFPB (AERH/DEC), José do Patrocínio Tomás de Albuquerque, Eduardo Enéas de Figueiredo, Raimundo Sérgio Santos Góis, Janiro Costa Rego, Ubald Koch, Manoel Gilberto de Barros, Gledsneli Maria de Lima Lins, Héber Pimentel Gomes, e Bernadete Feitosa Cavalcante, meus agradecimentos pelos ensinamentos, colaboração e incentivo prestados durante o período de estudos.

Aos funcionários da AERH/DEC e da SUEP/UFPB meus sinceros agradecimentos por todo o apoio prestado, em especial ao técnico Ismael José Pereira pelo trabalho de análise granulométrica e sedimentométrica realizado no Laboratório de Hidráulica da UFPB.

Magna Coeli Bezerra e Hélio Francisco Bezerra deram importante colaboração na solução de problemas de implementação computacional de alguns programas.

Aos técnicos e funcionários do Grupo de Trabalho em Hidrometeorologia da SUDENE, agradeço o atendimento às consultas realizadas sobre os dados básicos utilizados.

Ao técnico Ednaldo Pereira da Silva que, no campo, obstinadamente, garantiu a qualidade dos dados utilizados no trabalho.

Aos colegas de Curso, que sempre contribuíram para

v

o aprofundamento das questões ligadas a este trabalho.

Agradeço também a Maria Clarete Nunes Costa, Silvana Nunes da Costa, Carlos Spartacus da Silva Oliveira, Soênia Marques Timóteo de Sousa, Alberto Sálvio V. Lira e Gibson Rocha Meira, estagiários, cujo trabalho foi muito importante à consecução da pesquisa.

O amigo José Nivaldo Ribeiro Filho prestou grande apoio na preparação final das ilustrações.

Minha família, pelo constante e permanente incentivo, foi o grande suporte que permitiu o engajamento neste trabalho. Meu agradecimento também a Maria das Neves Anacleto, pela colaboração durante a permanência em Campina Grande.

Finalmente, meus amigos de turma, Cleuda Custódio Freire, Márcia Maria Rios Ribeiro e Flávio Alves da Silva. Foram os que compartilharam todos os momentos destes dois anos. A Flávio, que deixou-nos prematuramente, minha especial homenagem.

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Relação precipitação-escoamento para a microbacia 3 tendo o índice de precipitação antecedente IH como parâmetro (Gomes et alii 1987, Srinivasan et alii 1988).	21
2.2	Relação erosão-erosividade EI_{30} para a microbacia 3 tendo o índice de precipitação antecedente IH como parâmetro (Gomes et alii 1987, Srinivasan et alii 1988).	21
2.3	Representação do escoamento superficial direto pelo modelo BAC400 (Cavalcante et alii 1990).	23
3.1	Localização da Bacia Experimental de Sumé e das zonas hidrologicamente semelhantes (Cadier et alii 1983).	32
3.2	Repartição dos solos na Bacia Experimental de Sumé (Molinier et alii 1989a, b).	36
3.3	Esquema de circulação na Bacia Experimental de Sumé (Molinier et alii 1989a, b).	39
3.4	Croqui de localização das instalações (Cadier et alii 1983).	39
3.5	Levantamento topográfico da microbacia 1 (Cadier et alii 1983).	43
3.6	Levantamento topográfico da microbacia 2 (Cadier et alii 1983).	44
3.7	Levantamento topográfico da microbacia 3 (Cadier et alii 1983).	45
3.8	Levantamento topográfico da microbacia 4 (Cadier et alii 1983).	46
3.9	Dispositivo de medição das microbacias (Cadier et alii 1983).	48
3.10	Dispositivo de medição das parcelas de 100 m ² (Cadier et alii 1983).	50
4.1	Diagrama esquemático do modelo MODIBI modificado	58
4.2	Representação do princípio de funcionamento do MODIBI (Ibiza 1985).	59

4.3	Funcionamento do reservatório horizontal vegetal no MODIBI original (adaptado de Servat 1986a).	59
4.4	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 3 no período 1982-1983.	83
4.5	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 3 no período 1984-1986.	84
4.6	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 3 no período 1987-1988.	85
4.7	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 4 no período 1982-1983 (a).	86
4.8	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 4 no período 1982-1983 (b).	87
4.9	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 4 no período 1984-1986 (a).	88
4.10	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 4 no período 1984-1986 (b).	89
4.11	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 4 no período 1987-1988.	90
4.12	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 1 no período 1982-1988.	94
4.13	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 2 no período 1982-1988 (a).	95
4.14	Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 2 no período 1982-1988 (b).	96
5.1	Delimitação geométrica da microbacia 4 sobre o levantamento topográfico.	125
5.2	Visualização tridimensional da microbacia 4.	126
5.3	Representação esquemática da microbacia 4 para o WESP.	128

5.4	Distribuição granulométrica do solo amostrado na microbacia 4.	132
5.5	Distribuição granulométrica do solo amostrado na parcela 4.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
2.1	Parâmetros das curvas hiperbólicas para as microbacias 1 e 2.	26
2.2	Parâmetros das curvas hiperbólicas para as microbacia 3.	27
2.3	Parâmetros das curvas hiperbólicas para as microbacia 4.	28
3.1	Características das microbacias estudadas (Cadier et alii 1983).	42
4.1	Resumo dos eventos verificados nas microbacias desmatadas.	79
4.2	Resultados da calibragem para a microbacia 3 (desmatada).	81
4.3	Resultados da calibragem para a microbacia 4 (desmatada).	82
4.4	Resumo dos eventos verificados nas microbacias protegidas com vegetação natural.	91
4.5	Resultados da calibragem para as microbacias protegidas.	93
5.1	Características físicas dos elementos da microbacia 4 para entrada no WESP.	129
5.2	Sequência de cálculo e posição relativa dos elementos da microbacia 4.	130
5.3	Estimativa dos parâmetros de infiltração e erosão para a parcela 4.	138
5.4	Estimativa dos parâmetros de infiltração e erosão para a microbacia 4.	139
5.5	Comparação entre a produção de sedimentos observada e a calculada utilizando o valor médio do parâmetro α para a microbacia 4.	140
A.1	Evaporação média mensal diária do tanque "Classe A".	165
A.2	Precipitação diária na Bacia Experimental de	166

Sumé.

A.3	Pesos para o cálculo da precipitação média.	170
B.1	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 1 no período 1982-1988.	173
B.2	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 2 no período 1982-1988 (a).	174
B.3	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 2 no período 1982-1988 (b).	175
B.4	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 3 no período 1982-1983.	176
B.5	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 3 no período 1984-1986.	177
B.6	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 3 no período 1987-1988.	179
B.7	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 4 no período 1982-1983 (a).	180
B.8	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 4 no período 1982-1983 (b).	180
B.9	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 4 no período 1984-1986 (a).	181
B.10	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 4 no período 1984-1986 (b).	183
B.11	Resultados (em mm) da simulação para a microba- cia 4 no período 1987-1988.	185

LISTA DE SIMBOLOS

a	Fator de erodibilidade do solo nos canais.
A	Area de seção transversal do fluxo.
c	Concentração de sedimentos.
d	Deposição de sedimentos.
ds	Tamanho característico dos sedimentos.
d_{50}	Diâmetro mediano dos sedimentos.
d_{75}	Diâmetro para o qual 75% da amostra de sedimentos possui diâmetro menor.
e_I	Erosão pelo impacto da chuva.
e_R	Erosão pelo arrastamento pelo fluxo.
E_c	Produção de sedimentos calculada.
E_o	Produção de sedimentos observada.
EI_{30}	Índice de erosividade de chuva da Eq. de Perda de Solo.
ETP	Evapotranspiração potencial média mensal diária no modelo MODIBI.
$f(t)$	Taxa de infiltração.
F	Função objetivo nos modelos BAC400 e MODIBI.
$F(t)$	Profundidade da frente de molhamento.
FO-1	Função objetivo número 1 do MODIBI.
FO-2	Função objetivo número 2 do MODIBI.
FO-3	Função objetivo número 3 do MODIBI.
FO-4	Função objetivo número 4 do MODIBI.
FO-5	Função objetivo número 5 do MODIBI.
FO-6	Função objetivo número 6 do MODIBI.
FO-7	Função objetivo número 7 do MODIBI.
FO-8	Função objetivo número 8 do MODIBI.
g	Aceleração da gravidade.

LISTA DE SIMBOLOS

a	Fator de erodibilidade do solo nos canais.
A	Area de seção transversal do fluxo.
c	Concentração de sedimentos.
d	Deposição de sedimentos.
ds	Tamanho característico dos sedimentos.
d ₅₀	Diâmetro mediano dos sedimentos.
d ₇₅	Diâmetro para o qual 75% da amostra de sedimentos possui diâmetro menor.
e _x	Erosão pelo impacto da chuva.
e _R	Erosão pelo arrastamento pelo fluxo.
E _c	Produção de sedimentos calculada.
E _o	Produção de sedimentos observada.
EI ₃₀	Índice de erosividade de chuva da Eq. de Perda de Solo.
ETP	Evapotranspiração potencial média mensal diária no modelo MODIBI.
f(t)	Taxa de infiltração.
F	Função objetivo nos modelos BAC400 e MODIBI.
F(t)	Profundidade da frente de molhamento.
FO-1	Função objetivo número 1 do MODIBI.
FO-2	Função objetivo número 2 do MODIBI.
FO-3	Função objetivo número 3 do MODIBI.
FO-4	Função objetivo número 4 do MODIBI.
FO-5	Função objetivo número 5 do MODIBI.
FO-6	Função objetivo número 6 do MODIBI.
FO-7	Função objetivo número 7 do MODIBI.
FO-8	Função objetivo número 8 do MODIBI.
g	Aceleração da gravidade.

Gn	Pluviógrafo número "n" na Figura 3.4.
h	Profundidade do fluxo.
i	Intensidade de precipitação.
I	Índice de ajustamento mensal do modelo BAC400.
IH	Índice de precipitação antecedente.
IH _{min}	Limite inferior do índice IH no modelo BAC400.
IH _{max}	Limite superior do índice IH no modelo BAC400.
K	Fator de redução da umidade do solo utilizado no cálculo do índice IH.
K _x	Erodibilidade do solo pelo impacto da chuva.
K _R	Erodibilidade do solo pelo fluxo superficial.
K _s	Condutividade hidráulica saturada saturada.
Lc	Lâmina calculada nos modelos BAC400, MODIBI e WESP.
Lm	Lâmina média observada no modelo MODIBI.
Lo	Lâmina observada nos modelos BAC400, MODIBI e WESP.
m	Parâmetro de geometria do plano ou do canal.
n _c	Coefficiente de Manning para os planos.
n _e	Coefficiente de Manning para os canais.
Ns	Potencial de capilaridade.
p	Porosidade efetiva do solo.
P	Precipitação diária nos modelos BAC400 e MODIBI.
P-nn	Pluviômetro número "nn" na Figura 3.4.
P(IH)/PD	Declividade da tangente ao trecho final das curvas do modelo BAC400.
P(t _{n-1})	Precipitação acumulada até o momento t _{n-1} .
q _A	Fluxo de entrada lateral por unidade de comprimento do canal.
q/Q	Vazão do fluxo.
qs	Entrada lateral de sedimentos no canal.

Q_0	Vazão de entrada a montante do canal.
r	Taxa de entrada do fluxo superficial no plano.
R^2	Coefficiente de determinação.
$R(t_{n-1})$	Escoamento acumulado até o momento t_{n-1} .
R_w	Raio hidráulico.
S	Sucção média da frente de molhamento.
S_e	Saturação efetiva relativa do solo.
S_f	Declividade da linha de energia.
S_0	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.
W_n	Parcela de 100 m ² número "n" na Figura 3.4.
WP	Perímetro molhado.
x	Distância na direção do fluxo.
X_0	Valor da precipitação na origem das curvas do modelo BAC400.
X_1	Valor da precipitação no ponto em que o prolongamento da tangente à curva corta o eixo horizontal no modelo BAC400.
Y_1	Valor da ordenada da curva no ponto X_1 no modelo BAC400.
α	Parâmetro de rugosidade superficial.
δ	Coefficiente para tensão de cisalhamento crítica.
Δt	Incremento de tempo.
Δx	Incremento de distância.
ec	Coefficiente de deposição nos canais.

ϵ_p	Coeficiente de deposição nos planos.
θ	Taxa de sedimento saindo para o fluxo.
δ	Peso específico da água.
δ_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.

SUMARIO

Dedicatória	ii
Agradecimentos	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	ix
Lista de Símbolos	xi
Sumário	xv
Resumo	xx
Abstract	xxi
1 - Introdução	1
1.1 - Bacias representativas e experimentais	3
1.2 - Escopo do trabalho	4
2 - Modelagem do escoamento superficial e da erosão	6
2.1 - Considerações gerais	6
2.2 - Classificação e terminologia	7
2.3 - Modelos precipitação-vazão	8
2.3.1 - Modelos conceituais	8
2.3.2 - Modelos fundamentais	10
2.4 - Modelos de produção de sedimentos	12
2.4.1 - Modelos empíricos	12
2.4.1.1 - A equação universal de perdas de solo	12
2.4.1.2 - Modelos baseados na USLE	15
2.4.2 - Modelos fundamentais	16
2.5 - Estudos anteriores na Bacia Experimental de Sumé .	20

2.5.1 -	Relações básicas do escoamento e da erosão	20
2.5.2 -	Modelagem do escoamento superficial	22
2.5.2.1 -	O modelo	22
2.5.2.2 -	Calibragem do modelo	25
2.5.3 -	O efeito de escala	25
2.6 -	Considerações finais	29
3 -	A Bacia Experimental de Sumé	30
3.1 -	Considerações gerais	30
3.2 -	Descrição da bacia	31
3.2.1 -	Localização	31
3.2.2 -	Características físico-climáticas	31
3.2.2.1 -	Clima	33
3.2.2.2 -	Relevo, solos e geologia	33
3.2.2.3 -	Vegetação	34
3.2.3 -	Caracterização hidrodinâmica dos solos	35
3.2.3.1 -	Os solos	35
3.2.3.2 -	Circulação da água no solo	37
3.2.4 -	Dispositivo experimental	40
3.2.4.1 -	Microbacias e parcelas experimentais	42
3.2.4.2 -	Observações meteorológicas	49
3.3 -	Manejo do solo e vegetação	51
3.4 -	Considerações finais	52
4 -	O modelo MODIBI	54
4.1 -	Descrição do modelo	54
4.1.1 -	Apresentação	54
4.1.2 -	Estrutura e funcionamento	55
4.1.2.1 -	Dados de entrada	55

4.1.2.2 - Parâmetros	56
4.1.2.3 - Funcionamento	57
4.1.3 - Calibragem do modelo	65
4.1.3.1 - Considerações gerais	65
4.1.3.2 - Otimização automática de parâmetros	66
4.1.3.3 - Critérios de ajuste	68
4.1.3.4 - Comportamento dos parâmetros do MODIBI	71
4.2 - Aplicação do modelo às microbacias de Sumé	72
4.2.1 - Dados utilizados	72
4.2.2 - Resultados da calibragem	73
4.2.2.1 - Estimativa dos parâmetros	75
4.2.2.1.1 - Parâmetros definidos "a priori"	75
4.2.2.1.2 - Parâmetros otimizados	76
4.2.3 - Calibragem para as microbacias desmatadas	77
4.2.4 - Calibragem para as microbacias protegidas	80
4.2.5 - Verificação da calibragem	97
4.3 - Discussão dos resultados	99
4.3.1 - O processo de calibragem	99
4.3.2 - Adequação do modelo ao sistema físico	101
5 - O modelo WESP	106
5.1 - Generalidades	106
5.2 - Concepção e formulação do WESP	106
5.2.1 - Dados e parâmetros de entrada	107
5.2.2 - A infiltração	108

5.2.3 - O escoamento superficial	111
5.2.4 - O componente erosão-deposição	115
5.3 - Calibração do modelo	119
5.3.1 - Estudos sob chuva simulada	120
5.3.2 - Estudos em pequenas bacias	121
5.4 - Aplicação do modelo às microbacias de Sumé	123
5.4.1 - Considerações gerais	123
5.4.2 - Dados utilizados	123
5.4.3 - Discretização espacial da microbacia	124
5.5 - Estimativa dos parâmetros	127
5.5.1 - Parâmetros definidos "a priori"	127
5.5.2 - Parâmetros otimizados	137
5.6 - Resultados	138
6 - Discussão dos resultados	143
6.1 - Considerações gerais	143
6.2 - O modelo BAC400	143
6.3 - O modelo MODIBI	145
6.4 - O modelo WESP	146
6.5 - A questão do melhor modelo	147
7 - Conclusões e recomendações	150
7.1 - Conclusões	150
7.2 - Recomendações	151
8 - Referências	153
Anexo A - Evaporação e precipitação	164
A.1 - Evaporação	165
A.2 - Precipitação	165
Anexo B - Resultados da modelagem do MODIBI	171
B.1 - Microbacia 1	173

B.2 - Microbacia 2	174
B.3 - Microbacia 3	176
B.4 - Microbacia 4	180

RESUMO

Para a modelagem hidro-sedimentológica na Bacia Experimental de Sumé, na região semi-árida do nordeste brasileiro, aplicou-se dois modelos de diferentes complexidades em quatro microbacias de superfícies em torno de 1 ha, com cobertura vegetal nativa ou desmatadas. O primeiro, o MODIBI, é um modelo precipitação-vazão do tipo conceitual determinístico global a nível diário, tem como entrada a precipitação e a evapotranspiração, e representa o balanço hídrico através de um sistema de reservatórios. O segundo, o modelo WESP, simula o escoamento superficial e a produção de sedimentos, e tem como base os processos de infiltração, a hidráulica do escoamento superficial e a mecânica dos processos de erosão e deposição. O modelo usa parâmetros distribuídos e produz simulações por evento. Os resultados mostraram um ajuste satisfatório aos dados observados e coerência com as hipóteses levantadas em estudos anteriores sobre o funcionamento hidrológico das microbacias. Os parâmetros de erosão estimados pelo WESP apresentaram razoável dispersão. Os modelos aplicados podem ser considerados promissores para estudos em microbacias.

ABSTRACT

In order to model the runoff-erosion process in the Experimental Basin of Sumé, located in the semi-arid region of the northeast of Brazil, two different models were tested in four micro-basins having natural vegetation or cleared bare. The first one, MODIBI, is a deterministic conceptual rainfall-runoff model for one day intervals and has the input of precipitation and evapotranspiration. The water balance is carried out with a system of reservoirs. The second model, WESP, simulates the surface runoff and the sediment production and is based on the processes of infiltration, the hydraulics of surface and channel flow as well as the mechanics of sediment transport. The model uses distributed parameters and simulates each event separately. The results show that the agreement between the simulated and observed values is satisfactory and are consistent with the earlier studies in the micro-basins regarding its hydrologic characteristics. The erosion parameters estimated during simulation with WESP show a certain level of dispersion but is considered quite reasonable. The model tested may be considered promising for the runoff and erosion studies.

1 - INTRODUÇÃO

"Temos pensado sempre como se a Terra Seca fosse igual, homogênea, em toda a sua extensão, nas suas necessidades e características [...] as investigações das regiões, descendo ao detalhe, se impõem com premência absoluta. [...] Chegou o momento dos casos particularizados, da análise minuciosa com dados objetivos." (Duque 1951).

Essa afirmação do Engenheiro Guimarães Duque data da primeira edição do "Solo e água no polígono das secas", de 1949. Nestes quarenta anos muitos estudos e projetos foram levados a cabo na tentativa de melhorar a "convivência com a seca" na região Nordeste do Brasil. A criação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), no final dos anos 50, proporcionou recursos e estrutura para a consecução de numerosos estudos e levantamentos dos recursos naturais da Região, que vieram somar-se aos já realizados desde o fim do século passado pela Inspeção de Obras Contra as Secas e depois pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS).

Na linha dos estudos hidrológicos, um dos mais importantes programas tem sido o das Bacias Representativas e Experimentais do Nordeste Brasileiro, executado pela SUDENE, com a assessoria do Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM). Este programa tem como alvo as pequenas bacias hidrográficas do Nordeste, que são a fonte de água para os pequenos aproveitamentos hídricos. Os pequenos aproveitamentos parecem ser a alternativa para áreas não providas por grandes mananciais. Numa região com as características do Nordeste, um programa de estudos de longo prazo sobre bacias representativas representa uma contribuição fundamental para a compreensão dos diversos regimes hidrológicos presentes e para o estabelecimento de métodos adequados de estimativa de disponibilidade hídrica.

Vários trabalhos foram já realizados no âmbito deste programa. Uma primeira síntese global dos resultados das bacias estudadas no Nordeste com vistas à utilização prática em áreas com ausência de estudos hidrológicos é o trabalho de Cadier (1984), que vem sendo gradualmente aperfeiçoado pelo Grupo de Trabalho em Hidrometeorologia da SUDENE (Barreto et alii 1989).

A implantação das Bacias Experimentais de Sumé (1981/82) e Tauá (1985/86) agregou estudos de erosão aos estudos hidrológicos já realizados.

1.1 - BACIAS REPRESENTATIVAS E EXPERIMENTAIS

A UNESCO (1970), no seu "Guia internacional para pesquisa e prática em bacias representativas e experimentais", define estas bacias como sendo aquelas representativas de uma região hidrológica, ou seja, de uma região onde se supõe que haja uma certa homogeneidade do ponto de vista hidrológico. As bacias experimentais, segundo este Guia, são bacias onde o solo e a vegetação são relativamente homogêneos e possuem características físicas semelhantes; estas características são modificadas propositalmente para se estudar seus efeitos sobre o comportamento hidrológico da bacia. O Guia cita como principais objetivos do estudo em bacias experimentais, aqueles ligados à pesquisa fundamental, ao estudo dos efeitos de mudanças artificiais, à previsão hidrológica e extensão de dados.

A partir da Década Hidrológica Internacional (IHD), 1965/75, a implantação de bacias representativas e experimentais foi difundida em todo o mundo. No Brasil, experiências têm sido relatadas por Lanna (1983), Vieira et alii (1983), Sanchez et alii (1983), Bordas et alii (1983), Roma e Mattos (1983) e Semmelmann et alii (1985), entre outros.

Dubreuil (1982) considera a estimativa e caracterização dos recursos hídricos de uma dada região hidrológica como o primeiro objetivo do estudo de bacias representativas e experimentais. Cita três níveis de ferramentas metodológicas para análise e interpretação dos dados coletados. As de primeiro nível são aquelas da hidrologia clássica e estão descritas no Guia da

UNESCO supracitado, e servem para uma caracterização mais simples dos recursos hídricos. As ferramentas de segundo nível incluem a modelagem matemática mais moderna, onde se sobressaem os modelos conceituais, que permitem ao pesquisador uma inferência maior sobre os processos físicos. As do terceiro nível são derivadas dos outros dois, mas têm como característica principal permitir extrapolações de resultados para outras áreas hidrologicamente semelhantes que não possuam dados medidos. A UNESCO (1982) e os trabalhos já citados aqui, entre outros, apresentam tentativas diversas de modelar os processos hidrológicos a partir do estudo em bacias representativas e experimentais.

1.2 - ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho insere-se no conjunto daqueles gerados a partir da implantação das bacias representativas e experimentais no Nordeste.

Pretende-se caracterizar o regime hidro-sedimentológico de uma das áreas representativas, Sumé, situada na região dos Cariris Velhos, Estado da Paraíba, verificando os efeitos do desmatamento da vegetação nativa sobre o escoamento superficial e a erosão dos solos.

O trabalho vem permeado da filosofia preconizada por Dubreuil (1982): conhecer o funcionamento dos processos hidro-sedimentológicos para fornecer indicações de melhor manejo dos recursos naturais da região específica e, como meta final, permitir a extrapolação destes resultados para áreas não instrumentadas.

Escolheu-se como ferramentas para auxílio no estudo dois modelos matemáticos distintos. O primeiro, o MODIBI, do tipo conceitual determinístico, trata apenas do escoamento superficial. O segundo, o WESP, mais complexo, usa conceitos fundamentais que teoricamente regem os processos de escoamento e erosão hídrica. São duas abordagens diferentes que permitirão, além da caracterização da Bacia de Sumé, uma avaliação metodológica desses instrumentos, visando a continuidade de sua aplicação em estudos semelhantes.

2 - MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DA EROSAO

2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A modelagem dos processos hidrológicos que ocorrem numa bacia hidrográfica parte normalmente de hipóteses sobre o comportamento físico do sistema. Os modelos desenvolvidos e aplicados na bacia pretendem reproduzir sua resposta às entradas hidrológicas no sistema (precipitação, temperatura, vento, etc). Tais instrumentos, após calibragem, permitem explorar as implicações de fazer certas hipóteses sobre a natureza do sistema real, e prever o seu comportamento sob circunstâncias que realmente poderiam ocorrer (Beven 1989).

Este capítulo trata dessas ferramentas matemáticas e computacionais, meio escolhido neste trabalho para a caracterização das relações hidro-sedimentológicas das microbacias estudadas.

Apresenta-se a classificação e algumas definições consideradas básicas e, em seguida, uma breve revisão dos tipos

de modelos de produção de água (precipitação-vazão) e de produção de sedimentos. Esta divisão é meramente esquemática.

2.2 - CLASSIFICAÇÃO E TERMINOLOGIA

Os modelos matemáticos de simulação hidrológica podem ser basicamente classificados em duas vertentes (Fleming 1977): os determinísticos e os estocásticos. Os últimos incorporam conceitos probabilísticos e as variáveis hidrológicas são consideradas como aleatórias. A maioria dos primeiros, em geral, tentam representar as leis que regem a física dos processos. Nosso interesse no presente trabalho está relacionado aos modelos determinísticos, sejam os de produção de água apenas, ou os que simulem também a erosão e produção de sedimentos.

Os modelos hidro-sedimentológicos são caracterizados pelos seguintes critérios:

a) Contínuo ou eventual. "Um sistema pode modificar-se continuamente, mas para efeito de projeto os registros são efetuados em intervalos de tempo. A escolha deste intervalo é função da economia desejada e da precisão dos resultados, que são conflitantes, já que, à medida que o intervalo diminui, o custo para medir os dados e computá-los aumenta em favor da melhoria da precisão dos resultados." (Tucci 1987). Um modelo é dito contínuo quando simula continuamente uma série hidrológica, em contraposição aos modelos que realizam a simulação por evento (Lopes 1987). No primeiro caso, apesar de os intervalos de tempos serem discretos, considera-se que o modelo simula um fenômeno contínuo. No segundo, o modelo simula apenas um evento discreto.

b) Concentrado (global) ou distribuído. "Um sistema é concentrado quando seus parâmetros e variáveis variam somente em função do tempo; quando esses componentes variam também segundo o espaço, o sistema é dito distribuído" (Tucci 1987).

c) Empírico, ou conceitual, ou fundamental. Os modelos conceituais são um meio termo entre os modelos baseados nas equações que descrevem o processo físico (modelos fundamentais, hidrodinâmicos ou "baseados no processo") e os modelos empíricos, do tipo "caixa preta" (métodos de correlação, regressão e teoria das probabilidades, por exemplo), nos quais o conhecimento sobre o processo físico é ignorado, ao menos inicialmente (Dooge 1979).

Classificações e conceituações sobre modelos matemáticos para hidrologia são exaustivamente encontradas na bibliografia (Clarke 1973, Overton e Meadows 1976, Fleming 1977, Fleming 1979, Dooge 1979, Branson et alii 1981, Haan et alii 1982, Tucci 1987, Todini 1988, Magalhães 1989).

2.3 - MODELOS PRECIPITAÇÃO-VAZÃO

2.3.1 - MODELOS CONCEITUAIS

Entre os modelos precipitação-vazão, os mais difundidos e utilizados são os conceituais determinísticos, pela facilidade de construção e porque podem incorporar conceitos ligados diretamente aos processos físicos; desde o modelo Stanford, muitos hidrólogos têm desenvolvido e utilizado cada vez mais ferramentas deste tipo (Dubreuil 1982). O termo "conceitual"

estaria ligado ao fato de que a forma de cada modelo dependeria da concepção do seu construtor sobre cada fase do ciclo hidrológico (Ibbitt e O'Donnell 1971).

Entre os modelos conceituais extensivamente utilizados estão o SSARR, do US Army Corps of Engineers, o Stanford Watershed Model, da Universidade de Stanford, o de Boughton, Austrália, o Mero, de Israel, o Institute of Hydrology Model, da Grã-Bretanha, entre outros (Clarke 1973, Fleming 1977). No Brasil, são bastante utilizados os modelos: SMAP (Lopes et alii 1981), o IPH II (Tucci et alii 1981, Tucci 1987), o MOHTSAR (Marwell Filho e Lanna 1986) e o MODHAC (Lanna e Schwarzbach 1989).

O ORSTOM desenvolveu, entre outros, o modelo MODIBI (Ibiza 1983, 1985, 1988), para utilização nos estudos de bacias representativas na África, com o objetivo de quantificação do escoamento e de classificação hidrológica das bacias. É um modelo do tipo conceitual global, e representa o balanço hídrico através de um sistema de reservatórios.

No uso dos modelos conceituais deve ser levado em conta o seguinte (Beven 1989):

a) As equações de um modelo global são apenas uma representação aproximada do mundo real e introduzem erros provenientes da estrutura do modelo;

b) As heterogeneidades espaciais não são bem reproduzidas pelos parâmetros médios estimados;

c) A precisão com que o modelo pode ser calibrado ou validado é muito dependente de erros nos dados observados de

entrada ou saída;

d) Há o perigo de incorporar um grande número de parâmetros à estrutura do modelo quando se tenta simular todos os processos hidrológicos que se imagina relevantes.

e) Os parâmetros calibrados de tais modelos mostram um certo grau de interdependência, de modo que bons resultados podem ser obtidos com diferentes conjuntos de parâmetros.

2.3.2 - MODELOS FUNDAMENTAIS

Estes modelos têm sido muito divulgados recentemente (Haan et alii 1982, Kirkby 1988), principalmente pelo desenvolvimento dos computadores e das técnicas de sensoriamento remoto, que permitiram o processamento mais rápido e uma mais fácil estimativa inicial dos parâmetros físicos envolvidos. Porém, o grande número de parâmetros, às vezes de difícil determinação, tem limitado uma aplicação operacional mais ampla destes modelos (Beven 1989, Yevjevich 1989).

Neles o fluxo da água sobre a superfície do solo ou nos cursos d'água é descrito através das equações de Saint Venant ou uma de suas simplificações.

Um exemplo significativo é o "Sistema Hidrológico Europeu" (SHE), desenvolvido (Abbott et alii 1986a,b) num trabalho conjunto de grupos de vários países europeus. Propõe-se a ser um "sistema de apoio à decisão" nas questões de avaliação de impacto hidrológico por mudanças no meio ambiente. É um modelo de base física, distribuído. Calcula os principais componentes do ciclo hidrológico através de equações e métodos fundamentados na

física dos processos, como a equação de Richards para o fluxo na zona não saturada, a equação de Penman-Monteith para a evapotranspiração e simplificações das equações de Saint Venant para o fluxo superficial e concentrado, por exemplo.

As equações da onda cinemática, uma das simplificações das equações de Saint Venant, têm sido utilizadas com muita frequência, para descrever o fluxo tanto em planos como em canais, desde a década de 1950. E assumido, nas equações de Saint Venant, que a declividade da linha de energia é igual à declividade da superfície do plano ou do fundo do canal, e também à declividade da superfície da água. Em outras palavras, supõe-se que os componentes devido à gravidade e ao atrito dominam os outros termos da equação da quantidade de movimento. Apesar desta abordagem estar cada vez mais difundida em pesquisa e também nas aplicações de projeto, advertências têm sido feitas no sentido de que mais testes deste método, tanto de campo quanto de cálculo computacional, sejam levados a cabo antes de recomendá-lo como ferramenta de projeto (Pilgrim 1986, Hromadka II e DeVries 1988). Pilgrim (1986) comenta que as condições de campo diferem em muito das condições teóricas, que assume o fluxo em lâmina ("sheet-type"). Segundo este autor, as eventuais discrepâncias são normalmente levadas em conta na estimativa do fator de rugosidade, o que é questionável. Boas discussões do uso da onda cinemática podem ser encontradas em Kibler e Woolhiser (1970), Dawdy (1990), Goldman (1990), Merkel (1990), Unkrich e Woolhiser (1990), Woolhiser e Goodrich (1990) e Hromadka II e DeVries (1990).

2.4 - MODELOS DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Bennett (1974) os define como representações hipotéticas ou estilizadas dos processos físicos que ocorrem durante a erosão e o transporte de sedimentos de uma bacia. Incluem modelos tão simples como uma regressão entre a carga suspensa e a vazão hídrica até modelos complexos contendo componentes para calcular o fluxo superficial e o fluxo em canais, para estimar a produção de sedimentos das encostas e do curso d'água.

2.4.1 - MODELOS EMPIRICOS

Os modelos empíricos têm sido extensivamente usados para previsão de erosão em bacias. Baseiam-se em dados medidos e normalmente são obtidos através de técnicas de análise de regressão ou relações gráficas (Lopes 1980). Por isso, sua utilização fica restrita às regiões onde foram desenvolvidos. Extrapolações para outras regiões devem ser realizadas com bastante cautela.

Um modelo empírico simples para estimativa da produção de sedimentos a longo prazo é o método da curva de descarga de sedimentos versus descarga de água de um rio (ASCE 1975, Brakensiek et alii 1979). Este método consiste em construir uma curva, para uma determinada seção do curso d'água, da descarga de sedimento em função da descarga líquida.

2.4.1.1 - A Equação Universal de Perdas de Solo

Estudos utilizando medições de perdas de solo em pequenas parcelas experimentais, publicados desde a década de

1940, difundiram-se muito, principalmente nos Estados Unidos. Foram estabelecidas equações empíricas para diversas regiões e condições de solo, topografia e manejo do terreno (ASCE 1975).

Musgrave (1947), citado por ASCE (1975), estabeleceu uma equação muito citada na literatura, consolidando vários estudos anteriores, onde a perda de solo é expressa como uma função de um fator de erodibilidade do solo, de um fator de cobertura, da declividade, do comprimento da parcela, e da chuva de 30 min com frequência de dois anos.

Wischmeier e Smith apresentaram em 1960 a chamada Equação Universal de Perdas de Solo (USLE - Universal Soil Loss Equation), derivada a partir de 10000 parcelas-ano de dados, e eliminando algumas deficiências de equações anteriores, como a falta de um fator de erosividade de chuva (Leprun 1981, Bertoni e Lombardi Neto 1985). Esta equação é descrita detalhadamente nas publicações "Agriculture Handbook" números 282 e 537 (Wischmeier e Smith 1965, 1978, citados por Leprun 1981). A USLE é, sem dúvida, o modelo de previsão de perdas de solo mais usado no mundo. No Brasil os trabalhos iniciais foram desenvolvidos por Bertoni et alii (1975), em São Paulo (Bertoni e Lombardi Neto 1985). A partir daí vários pesquisadores vêm realizando trabalhos para estimar seus fatores para várias regiões. Segundo Leprun (1981), até esse ano todos os trabalhos de conservação de solo no Nordeste haviam usado a USLE como instrumento.

A Equação de perdas de solo exprime a ação dos principais fatores que influenciam a erosão pela chuva, e é ex-

pressa por:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (\text{eq. 2.1})$$

onde, A é a perda de solo calculada por unidade de área, em t/ha; R é o fator de erosividade de chuva; K é o fator erodibilidade do solo; L é o fator comprimento de rampa; S é o fator de declividade; C é o fator de uso e manejo; e P é o fator prática conservacionista.

Leprun (1981 e 1983) e Bertoni e 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. Arnoldus (1977) e Bertoni e Lombardi Neto (1985) apresentam exemplos de aplicação da equação universal.

A USLE mostra-se limitada em sua aplicação por conta da grande quantidade de informações requeridas para seu uso (um problema sério nos países subdesenvolvidos) (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 cuidado (Leprun 1981).

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

Williams (1975), citado por Foster (1982), modificou a USLE para estimar a produção de sedimentos de eventos individuais, propondo um novo fator de erosividade de chuvas, aplicável para cada evento. A USLE usada com este fator é chamada de USLE modificada, ou MUSLE (Modified USLE). Vários outros autores sugeriram modificações na USLE, nos seus vários parâmetros, para adaptá-la a uma ou outra situação. Com isso, aproveita-se das suas vantagens, principalmente nas condições dos Estados Unidos, onde ocorrem mais experimentações envolvendo a equação. Foster (1982) apresenta várias destas modificações.

2.4.1.2 - Modelos baseados na USLE

Usando a USLE ou suas modificações como o componente de geração de sedimentos, foram desenvolvidos modelos para bacias. Foster (1982) cita o ANSWERS (Beasley 1977) e o CREAMS (Foster et alii 1980). Estes modelos representam a bacia como um conjunto de canais e planos e calculam a erosão e a produção de sedimentos para cada elemento. O ANSWERS é bem adequado para aplicações com sensoriamento remoto, podendo representar variações de uso da terra, solos e topografia, mas não calcula erosão em canais. O CREAMS não é tão poderoso quanto o ANSWERS, mas representa áreas complexas com poucos dados de entrada. Como usam parâmetros da USLE estes modelos quase não precisam de calibragem.

O SWRRB (Williams et alii 1985, Arnold e Williams 1987) é um aprimoramento do CREAMS para aplicação em grandes bacias rurais, com fins de planejamento para uso em áreas não

instrumentadas. Também não necessita de calibragem: possui gerador de dados climatológicos, usa curvas do SCS para previsão do escoamento e a MUSLE para a produção de sedimentos.

2.4.2 - MODELOS FUNDAMENTAIS

Estes modelos são baseados em conceitos e teorias sobre a dinâmica do processo de erosão e fornecem maiores informações sobre a variabilidade da erosão e da carga de sedimentos, no espaço e no tempo, durante um evento, em relação aos outros tipos de modelos (Foster 1982).

Desde a década de 1930 já se considerava importante o conhecimento dos princípios fundamentais dos processos de erosão. Em 1947, Ellison apresentou uma análise de vários subprocessos da erosão que foi importante para estudos posteriores de modelagem (Foster 1982).

Meyer e Wischmeier (1969), citados por Bennett (1974), elaboraram um modelo baseado nos conceitos de Ellison e de outros pesquisadores. Foi um dos primeiros modelos formulados com base em conceitos fundamentais de erosão. Ele divide a área em um número finito de elementos e para cada um calcula as capacidades de desprendimento e transporte pela precipitação e pelo escoamento, propagando ou não a carga de sedimento para o próximo elemento. Negev (1967), citado por Bennett (1974), acrescentou um componente de modelagem de erosão ao modelo hidrológico Stanford. O fluxo é considerado como permanente a cada hora e a produção de sedimentos, calculada nas encostas e nos canais, é função do

fluxo e da erosão no intervalo de tempo anterior. Foi o primeiro modelo de produção de sedimentos desenvolvido num computador digital. Estes dois modelos demonstraram o potencial dos modelos fundamentais na compreensão e previsão do comportamento da erosão dos solos (Foster 1982).

Vários outros modelos têm sido citados na literatura recentemente.

O Strathclyde Sediment Erosion Model é um outro modelo conjugado ao Stanford Watershed Model. Simula a erosão do solo por impacto das gotas de chuva e pelo fluxo superficial, mas não considera erosão por desmoronamento, erosão das margens dos canais ou erosão pela ação do gelo, nem considera o transporte pelos cursos de água e deposição em reservatórios e áreas deltaicas (Fleming 1979).

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

O CSU (Li 1977), citado por Foster (1982), usa um sistema de canais e planos para 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 CSU pode representar grandes e complexas áreas, necessita de calibragem para alguns parâmetros e produz distor-

ções caso a representação da bacia não seja adequada.

O KINEROS (Smith 1981, citado por Lopes 1987) incorporou ao modelo hidrológico de Rovey et alii (1977) componentes de erosão, transporte e deposição. É um modelo distribuído e representa a bacia por planos, canais e elementos de armazenamento. Usa a equação de continuidade de sedimentos de Bennett (1974) e calcula o desprendimento das partículas pelo impacto da chuva através da equação de Meyer e Wischmeier (1969). A taxa de erosão nos canais é tida como proporcional ao déficit da capacidade de transporte, e a deposição é considerada como o seu excesso.

O componente hidráulico do KINEROS foi utilizado no modelo WESP (Watershed Erosion Simulation Program), desenvolvido por Lopes (1987), no âmbito do Projeto WEPP (Water Erosion Prediction Project) do 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 que utiliza funções de transporte de sedimentos para fluxo permanente.

Os modelos fundamentais têm muitas vantagens sobre as equações empíricas: eles têm geralmente como base a física do processo e conseqüentemente podem ser extrapolados com maior segurança; podem representar o processo com fidelidade; são mais precisos para eventos individuais; podem considerar áreas mais complexas; podem considerar o processo de deposição diretamente;

e podem considerar erosão e deposição em cursos d'água (Foster 1982).

Por outro lado seu uso fica restrito a condições que permitam o controle da maioria das variáveis (Lopes 1980) e, em geral, necessitam de calibragem 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). Apesar disto, Foster (1982) vê estes modelos como ferramentas cada vez mais importantes, à medida que pesquisas forem fornecendo valores desses parâmetros para regiões diferentes.

Foster (1982) e Bennett (1974) apresentam revisões sobre as mais importantes relações que descrevem os processos de erosão-sedimentação: desprendimento, erosão laminar e em sulcos, erosão em cursos d'água e processos de sedimentação. Propõem que as relações apresentadas sejam usadas como base na descrição de cada processo pelo modelador, adaptando-as a cada caso.

Um modelo de erosão-sedimentação exige um modelo hidrológico para fornecer as entradas de escoamento gerado pela precipitação. As soluções numéricas são normalmente baseadas nos métodos das diferenças finitas, das características ou de elementos finitos. Na calibragem dos parâmetros podem ser usados algoritmos de otimização, mas os resultados destes ajustes devem ser checados para verificar sua consistência (Foster 1982).

2.5 - ESTUDOS ANTERIORES NA BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ

2.5.1 - RELAÇÕES BÁSICAS DO ESCOAMENTO E DA EROSAO

A caracterização das mudanças no regime de escoamento superficial e erosão do solo na Bacia Experimental de Sumé foi apresentada inicialmente por Cadier et alii (1983), onde os eventos do primeiro ano de estudos foram analisados. Foram realizadas análises descritivas qualitativas dos resultados, evidenciando tendências e principais variáveis intervenientes nos processos de escoamento superficial e erosão dos solos. O prosseguimento dos estudos incorporou novos dados e uma análise mais ampla foi realizada por Gomes et alii (1987a) e Srinivasan et alii (1988).

Para o escoamento superficial, um índice representativo das condições de umedecimento do solo decorrentes das chuvas antecedentes (IH) permitiu estabelecer tendências entre os pontos dispersos num gráfico de escoamento contra a precipitação (Figura 2.1, Gomes et alii 1987a, Srinivasan et alii 1988). Este índice é expresso para o dia i por $IH_i = K.(IH_{i-1} + P_{i-1})$; onde o índice $i - 1$ refere-se ao dia anterior, P é a precipitação em mm, e K é um fator de redução da umidade do solo. O valor de K mais satisfatório foi de 0,95, encontrado em vários testes realizados.

No caso da erosão, o índice de erosividade de chuva da Equação Universal da Perda de Solo (Wischmeier e Smith 1958) foi o que permitiu uma melhor representação das tendências,

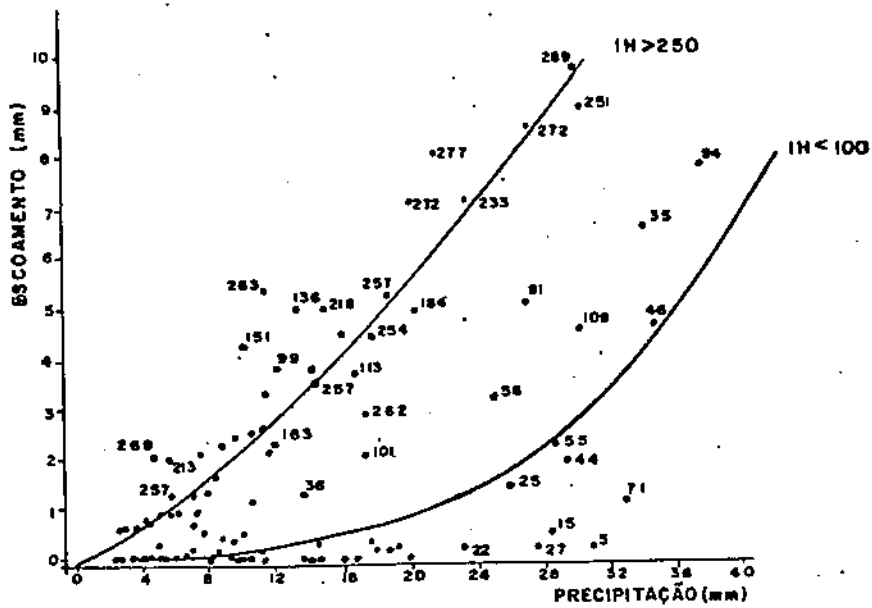


Figura 2.1 Relação precipitação - escoamento para a microbacia 3 tendo o índice de precipitação antecedente IH como parametro (Gomes et alii 1987, Srinivasan et alii 1988).

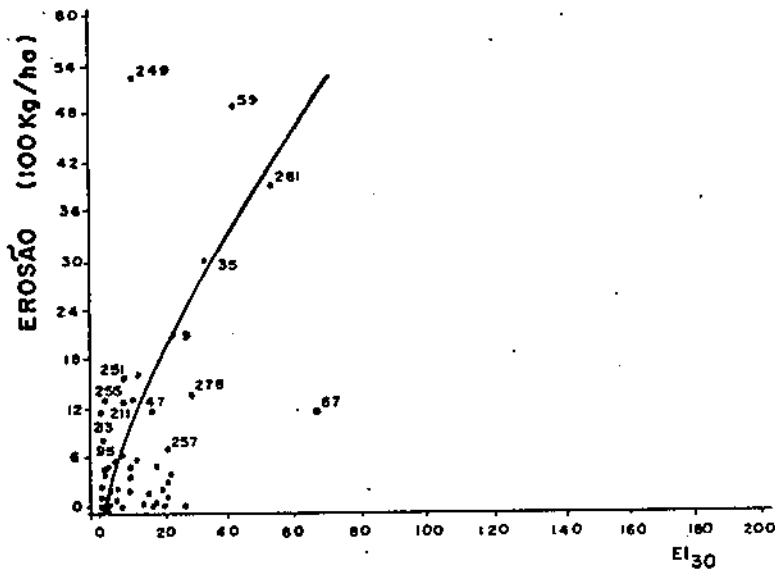


Figura 2.2 Relação erosão - erosividade EI₃₀ para a microbacia 3 tendo o índice de precipitação antecedente IH como parametro (Gomes et alii 1987, Srinivasan et alii 1988).

em vez da própria precipitação ou o escoamento superficial, conforme a Figura 2.2 (Gomes et alii 1987, Srinivasan et alii 1988).

2.5.2 - MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Um modelo, denominado como BAC400, desenvolvido por Eric Cadier, Hidrólogo do ORSTOM/SUDENE, e apresentado inicialmente por Cadier e Campello (1983), tem sido utilizado pela SUDENE nos estudos de bacias representativas no Nordeste brasileiro. O mesmo foi adaptado para as microbacias de Sumé e uma calibragem, ainda não publicada, foi realizada por Eric Cadier (Convênio SUDENE-ORSTOM), Paulo Frassinete de Araújo Filho (Convênio SUDENE-CISAGRO) e pelo autor.

2.5.2.1 - O modelo

O modelo já foi aplicado anteriormente às três sub-bacias da bacia representativa de Sumé (Cadier e Campello 1983), e calcula a lâmina escoada em intervalos diários. Utilizou-se sua versão mais recente, apresentada por Cavalcante et alii (1990) com sua aplicação às sub-bacias da Bacia Representativa de Tauá-CE.

A "função de produção" do modelo é obtida através do ajustamento de três hipérboles, que relacionam a lâmina escoada com a precipitação, tendo um índice de precipitação antecedente (IH) como parâmetro. A Figura 2.3 (Cavalcante et alii 1990) mostra os parâmetros que definem essas hipérboles: o valor do índice IH correspondente à curva; o valor da precipitação na origem da curva - X_0 - ou seja, altura da chuva para a qual a lâmina

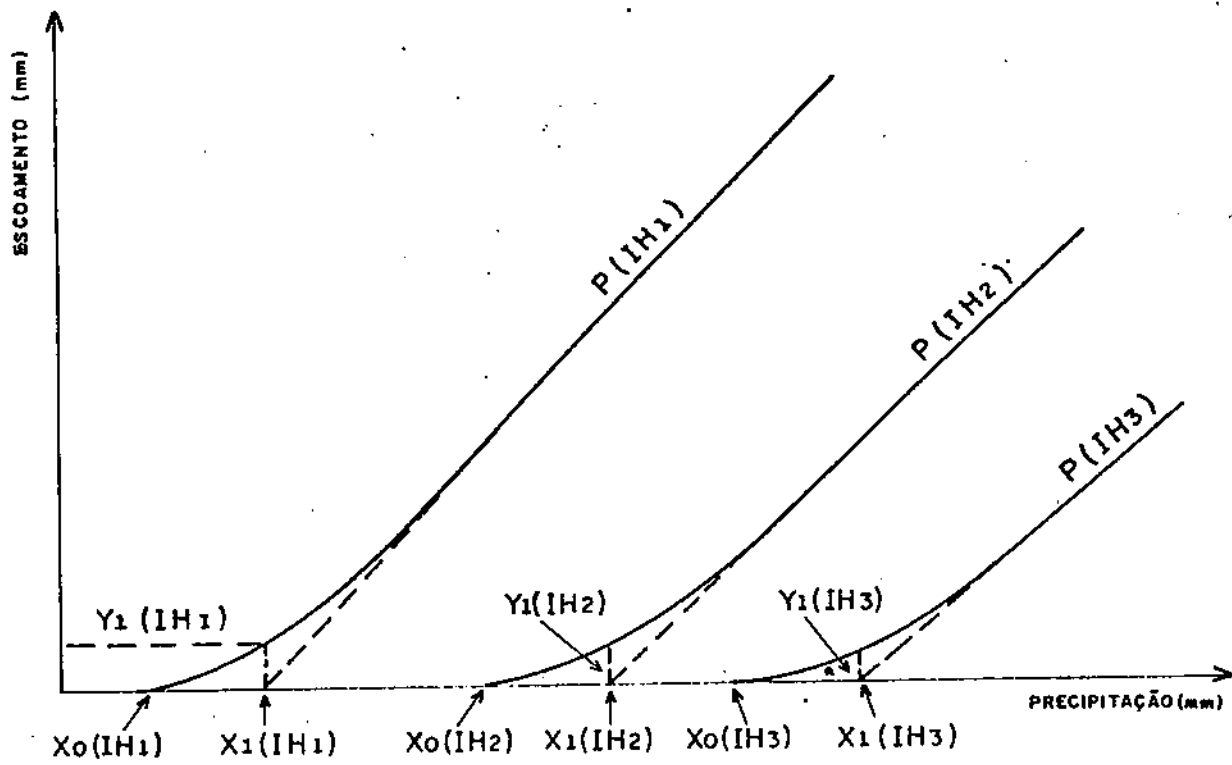


Figura 2.3 Representação do escoamento superficial direto pelo modelo BAC 400 (Cavalcante et alii 1990).

escoada é nula; a declividade da tangente ao trecho final da hipérbole - P; o valor da precipitação no ponto em que o prolongamento desta tangente corta o eixo horizontal - X_1 ; e o valor da ordenada da curva neste ponto - Y_1 . Além destes são estabelecidos dois valores limites do índice IH, IH_{max} e IH_{min} , para efeito do cálculo das lâminas. No caso em que o IH de um evento estiver além destes limites, o cálculo da lâmina correspondente é feito com a curva do valor limite. A partir das três curvas são determinadas outras curvas não representadas, através da interpolação linear entre os parâmetros das duas curvas mais próximas. O escoamento de base é representado através de dois "pseudo-reservatórios".

Para a calibragem, o modelo proporciona três diferentes critérios de ajuste, a nível mensal, diário e do evento. Os critérios são a minimização de:

$$1. \text{ Diferenças quadradas: } F = \sum (L_c - L_o)^2 \quad (\text{eq. 2.2})$$

$$2. \text{ Diferenças absolutas: } F = \sum |L_c - L_o| \quad (\text{eq. 2.3})$$

$$3. \text{ Diferenças relativas: } F = \sum (L_c - L_o) \quad (\text{eq. 2.4})$$

onde L_c e L_o são as lâminas calculadas e observadas.

O modelo também fornece um índice de ajustamento mensal igual a:

$$I = \frac{\sum (L_c - L_o)^2}{\sum L_c^2} \quad (\text{eq. 2.5})$$

2.5.2.2 - Calibragem do modelo

Como nas microbacias estudadas não foi observado escoamento básico, os parâmetros relacionados aos reservatórios que o representam foram anulados. O ajuste então restringiu-se as hipérbolas.

A rotina de otimização automática de parâmetros foi aplicada procurando minimizar o critério de diferenças quadradas a nível mensal. Foi introduzida mais uma condição: a de que o somatório das diferenças relativas durante a série simulada deve ser aproximadamente nulo, ou seja, no balanço interanual o somatório das lâminas calculadas pelo modelo deve aproximar-se do das observadas. Isto foi considerado importante tendo em vista a finalidade de aplicação do modelo calibrado na geração de séries sintéticas para incorporação ao método de Cadier (1984). Procurou-se simultaneamente os outros critérios de ajuste e o índice de ajustamento mensal.

As Tabelas 2.1 a 2.3 mostram os resultados da calibragem.

2.5.3 - O EFEITO DE ESCALA

A transferência dos resultados obtidos na escala de parcelas experimentais para a escala de bacias de interesse nos projetos de aproveitamento hídrico foi apresentada por Molinier et alii (1987) utilizando os dados da Bacia Experimental de Sumé. Foram apresentados métodos de transferência das relações para o escoamento superficial, das microparcels de 1 m², opera-

das sob chuva simulada, para as parcelas de 100 m², microbacias de 1 ha e a bacia de 10 km². O estudo representa um passo significativo na expansão de resultados experimentais obtidos numa escala menor para outras condições.

Tabela 2.1. Parâmetros das curvas hiperbólicas para as microbacias 1 e 2, para o período 1982/1988.

Parâmetro	Microbacia	
	1	2
IH máximo	250.0	250.0
IH mínimo	11.0	30.0
Hiperbole 1		
IH	250.0	250.0
X0	6.0	3.0
X1	37.5	16.8
Y1	1.60	1.20
P0	0.370	0.764
Hiperbole 2		
IH	140.2	134.0
X0	22.0	22.0
X1	40.0	50.0
Y1	0.80	1.80
P0	0.259	0.631
Hiperbole 3		
IH	55.1	83.0
X0	30.0	45.0
X1	70.0	67.0
Y1	0.40	1.22
P0	0.160	0.261
Ajuste mensal		
Dif. rel.	0.10	-0.15
Dif. quad.	129.87	66.31
Dif. abs.	24.63	19.32
Indice (%)	5.5	19.8

Tabela 2.2. Parâmetros das curvas hiperbólicas para a microbacia 3.

Parâmetro	Período		
	1982/83	1984/86	1987/88
IH máximo	246.3	131.6	93.8
IH mínimo	74.0	9.9	1.0
Hiperbole 1			
IH	236.7	118.3	76.3
X0	4.7	2.0	2.5
X1	14.3	14.3	11.0
Y1	1.83	1.83	1.83
P0	0.650	0.650	0.650
Hiperbole 2			
IH	99.1	25.1	8.0
X0	7.0	16.0	5.0
X1	22.0	30.0	18.0
Y1	2.17	2.17	3.75
P0	0.620	0.650	0.650
Hiperbole 3			
IH	92.7	10.1	2.5
X0	14.0	25.0	10.0
X1	27.0	38.0	22.0
Y1	2.09	2.09	2.09
P0	0.600	0.600	0.620
Ajuste mensal			
Dif. rel.	0.42	-0.85	-0.03
Dif. quad.	31.63	982.71	117.81
Dif. abs.	10.95	66.29	32.62
Índice (%)	11.1	0.4	14.5

Tabela 2.3. Parâmetros das curvas hiperbólicas para a microbacia 4.

Parâmetro	Período		
	1982/83	1984/86	1987/88
IH máximo	210.6	121.0	91.6
IH mínimo	67.5	2.3	1.1
Hipérbole 1			
IH	176.7	121.0	88.2
X0	4.7	2.0	2.5
X1	14.3	14.5	11.0
Y1	1.83	1.83	1.83
P0	0.650	0.650	0.650
Hipérbole 2			
IH	99.7	118.1	80.7
X0	7.0	19.0	5.0
X1	22.0	30.0	18.0
Y1	2.17	2.17	3.75
P0	0.620	0.650	0.650
Hipérbole 3			
IH	93.0	2.3	28.9
X0	14.0	25.0	10.0
X1	27.0	38.0	22.0
Y1	2.09	2.09	2.49
P0	0.600	0.600	0.620
Ajuste mensal			
Dif. rel.	-0.61	-0.27	-0.83
Dif. quad.	28.19	2034.54	173.21
Dif. abs.	9.66	112.13	31.05
Índice (%)	19.2	4.9	3.0

2.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dois modelos foram escolhidos para a caracterização dos processos de escoamento superficial e erosão na Bacia Experimental de Sumé, sendo eles típicos dos grupos a que pertencem. O primeiro, do tipo conceitual, é o modelo MODIBI (Ibiza 1983, 1985, 1988), trata apenas da simulação do escoamento superficial. O MODIBI, foi desenvolvido há poucos anos, testado na África, e sua concepção é adequada aos dados coletados. O segundo, do tipo fundamental, é o WESP, Watershed Erosion Simulation Program (Lopes 1987), "desenvolvido para simular a resposta hidrológica (hidrograma e sedigrama) de pequenas bacias hidrográficas sob diferentes condições de manejo" (Lopes e Lane 1987). É um modelo desenvolvido recentemente, que reflete as tendências atuais da pesquisa em erosão em pequenas bacias, já testado em região semi-árida (Arizona, EUA), e assim pode ser adequado aos dados coletados na Bacia Experimental de Sumé. Em ambos os casos os programas e a documentação estavam disponíveis, cedidos pelos técnicos do ORSTOM (MODIBI) e pelo próprio autor (WESP) ao Professor Srinivasan.

3 - A BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ

3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os dados utilizados no presente trabalho foram coletados na Bacia Experimental de Sumé, no Estado da Paraíba. A pesquisa nessa bacia é conduzida pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), através do Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico para o Nordeste (PDCT/NE), financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). A SUDENE e o ORSTOM são colaboradores.

A Bacia Experimental de Sumé está inserida na área da Bacia Representativa de mesmo nome, cujos estudos foram iniciados em 1972 (Cadier e Freitas 1982).

Em 1981, a SUDENE e ORSTOM iniciaram as instalações no campo, com o objetivo de evidenciar a influência da caatinga e do seu desmatamento sobre o escoamento e a erosão. A primeira campanha de medições foi a do inverno de 1982. A condução do Projeto passou à UFPB em 1984. Paralelamente aos trabalhos

na Bacia Experimental, a SUDENE continuou operando a Bacia Representativa de Sumé e, a partir de 1986, o ORSTOM implantou, na área da Bacia Experimental, o projeto "Influência das coberturas pedológicas e vegetais sobre os balanços hídricos e minerais do solo".

A Bacia de Sumé foi escolhida com base nos seguintes critérios (Cadier et alii 1983): era uma bacia já conhecida do ponto de vista hidrológico (Cadier e Freitas 1982); apresentava facilidades logísticas e de acesso; havia uma propriedade adequada aos estudos, com cessão do proprietário para tal fim.

3.2 - DESCRIÇÃO DA BACIA

3.2.1 - LOCALIZAÇÃO

A Bacia Experimental de Sumé está localizada na propriedade Fazenda Nova, no município de Sumé, Estado da Paraíba (Figura 3.1). Situa-se na altura do km 118 da BR-412, entre as cidades de Sumé e Monteiro. Faz parte da área superior da Bacia do Rio Paraíba, numa latitude de 7°40' Sul e longitude 37°00' Oeste (Cadier e Freitas 1982). Esta região, uma das mais secas do Nordeste do Brasil, é denominada Cariris Velhos, ou apenas Cariri.

3.2.2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-CLIMÁTICAS

A Bacia de Sumé tem características físico-climáticas semelhantes a outras áreas do Nordeste semi-árido, sendo considerada representativa dessas regiões. Com base nos critérios

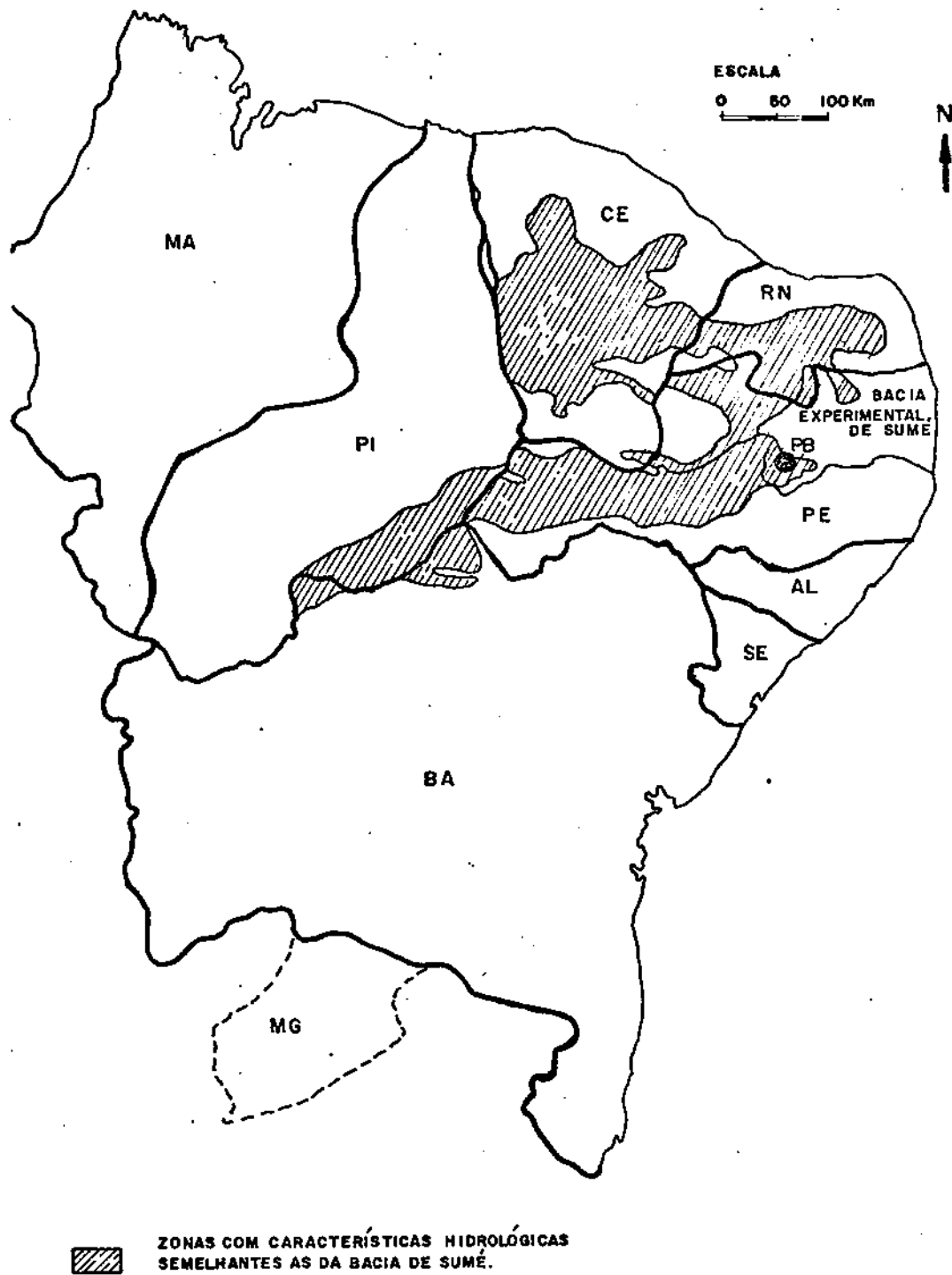


Figura 3.1 Localização da Bacia Experimental de Sumé e das zonas hidrologicamente semelhantes (Cadier et alii 1983).

de Nouvelot (1974), pode-se mapear estas regiões hidrologicamente semelhantes a Sumé conforme mostrado na Figura 3.1 (Cadier et alii 1983).

3.2.2.1 - Clima

Segundo Cadier et alii (1983), as principais características climáticas da bacia são:

Precipitação média anual entre 550 e 600 mm, distribuída entre janeiro e junho, com maior concentração entre fevereiro e abril. Os valores da precipitação diária com períodos de recorrência de 1, 10 e 100 anos são, respectivamente, 63, 106 e 152 mm.

Temperatura média anual de 24°C, com médias máxima e mínima diárias em torno de 33°C e 15°C, respectivamente nos meses de dezembro e julho.

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

3.2.2.2 - Relevo, solos e geologia

O relevo varia de ondulado a pouco ondulado. Nas parcelas e microbacias estudadas a declividade fica entre 4 e 9%.

Os solos são rasos, com espessura variando de alguns decímetros a pouco mais de um metro. O tipo dominante (85% da superfície) é o Bruno não Cálcico Vértico, de baixa permeabilidade. Verifica-se manchas de Bruno não Cálcicos Modais e Vertissolos. Outros detalhes sobre a caracterização pedológica da

Bacia são apresentados no item 3.2.3.

O subsolo influencia quase que totalmente a composição do solo (Molinier et alii 1989a). Como a vegetação é pouco luxuriante, à excessão dos fatores atmosféricos a composição petrográfica do subsolo é o fator determinante na formação dos solos (Siqueira 1964).

Na região do Cariri paraibano o subsolo é formado de rochas do complexo cristalino pré-cambriano, na maioria granitos (Albuquerque 1970). Siqueira (1964) constata a ocorrência de fendas e fissuras, mas na maioria não são interligadas em rede, impossibilitando o fluxo, e favorecendo a salinização das águas subterrâneas. No local da experimentação o embasamento cristalino é impermeável e os Gnaisses e Quartzitos são dominantes (Cadier et alii 1983).

3.2.2.3 - Vegetação

"A vegetação nativa 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 Quebra-faca (*Croton* sp.), o Marmeleiro (*Croton sonderianus*) e a Catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*) são as espécies dominantes, segundo o mesmo levantamento.

3.2.3 - CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DOS SOLOS

Molinier et alii (1989a, b) apresentam resultados dos estudos hidro-pedológicos detalhados realizados na Bacia Experimental de Sumé. Por ser de interesse direto deste trabalho, suas conclusões são resumidas a seguir.

Esses estudos foram realizados com simulação de chuvas em parcelas de 1 m², entre os anos de 1985 e 1989, comparados com as medições sob chuva natural nas outras áreas experimentais.

3.2.3.1 - Os solos

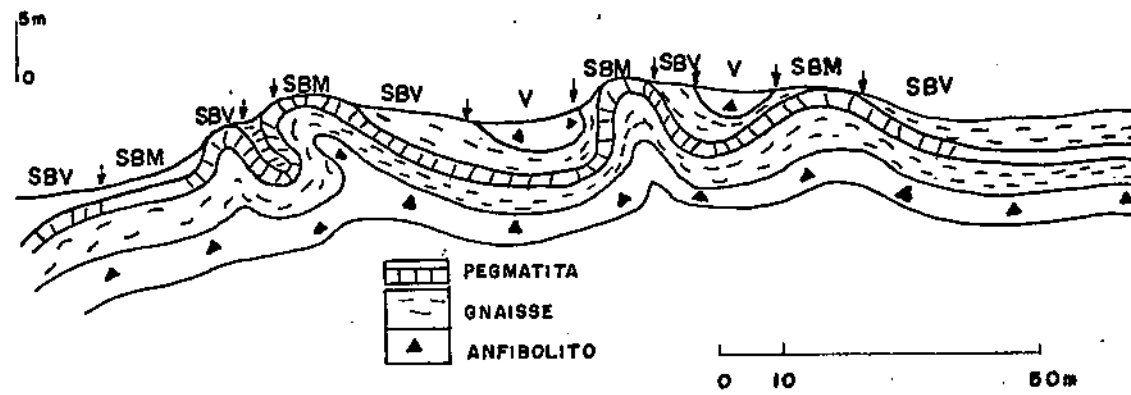
O solo dominante é o bruno não cálcico vértico. Um perfil médio é o seguinte:

a) Horizonte A de 20 cm de espessura, bruno acinzentado, textura franco-areno-argilosa, fase pedregosa com estrutura poliédrica a cúbica, porosidade média;

b) Horizonte B, de 20 a 70 cm de profundidade, bruno, textura franco-argilo-arenosa, estrutura cúbica a prismática até maciça, com uma porosidade muito fina;

c) Horizonte (B) C, de 70 a 90 cm de profundidade, textura areno-argilosa, oriundo de um gnaïsse 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, gnaïsse com anfibólio, anfibólito (Figura 3.2, Molinier et alii 1989b). Isto determina a distribuição espacial:



SBM: SOLO BRUNO MODAL
 SBV: SOLO BRUNO VÉRTICO
 V :VERTISSOL

Figura 3.2 Repartição dos solos na Bacia Experimental de Sumé
 (Molinier et alii 1989 a,b).

a) 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;

b) Acontece a mesma coisa 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.

3.2.3.2 - Circulação da água no solo

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 litólicos. 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. São os horizontes B vérticos. A densidade aparente aumenta com a profundidade, chegando a 1,8, ou seja, uma porosidade de 30 a 32%. A proporção importante de argila (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.

Combinando essas características com a distribuição espacial, tem-se o esquema de funcionamento da Figura 3.3 (Molinier et alii 1989b). Os únicos meios confinados são as micro-depressões de vertissolos.

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

a) 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.

b) As transferências de 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 vérticos, as transferências de A para B são muito lentas enquanto A não está próximo da saturação. A circulação dentro de B também. 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,

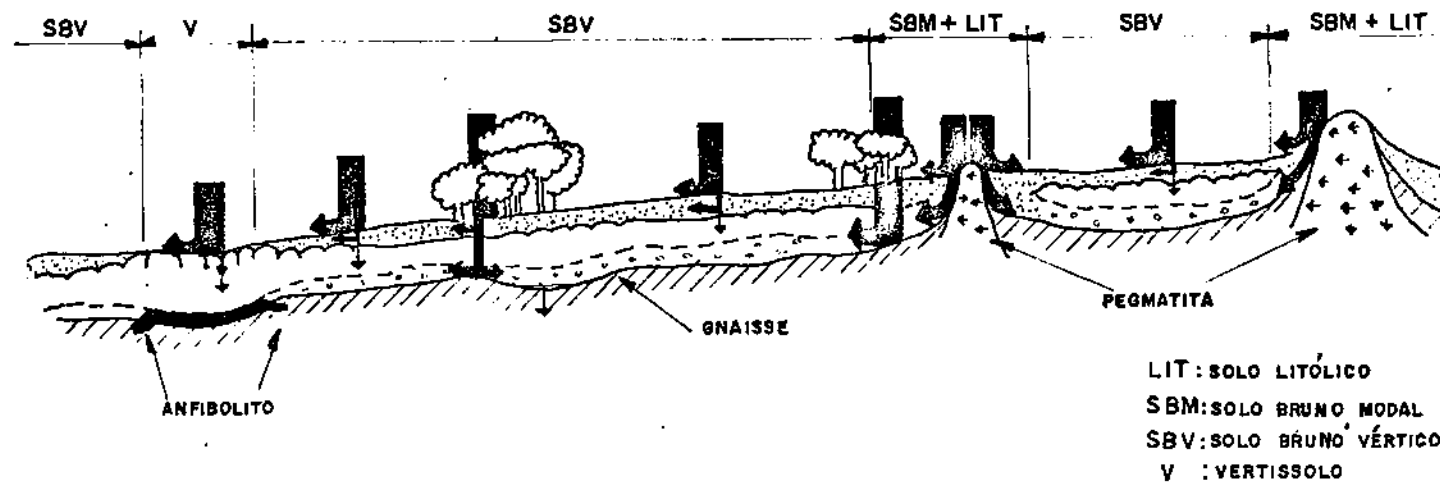


Figura 3.3 Esquema de circulação na Bacia Experimental de Sumé

(Molinier et alii 1989 a,b).

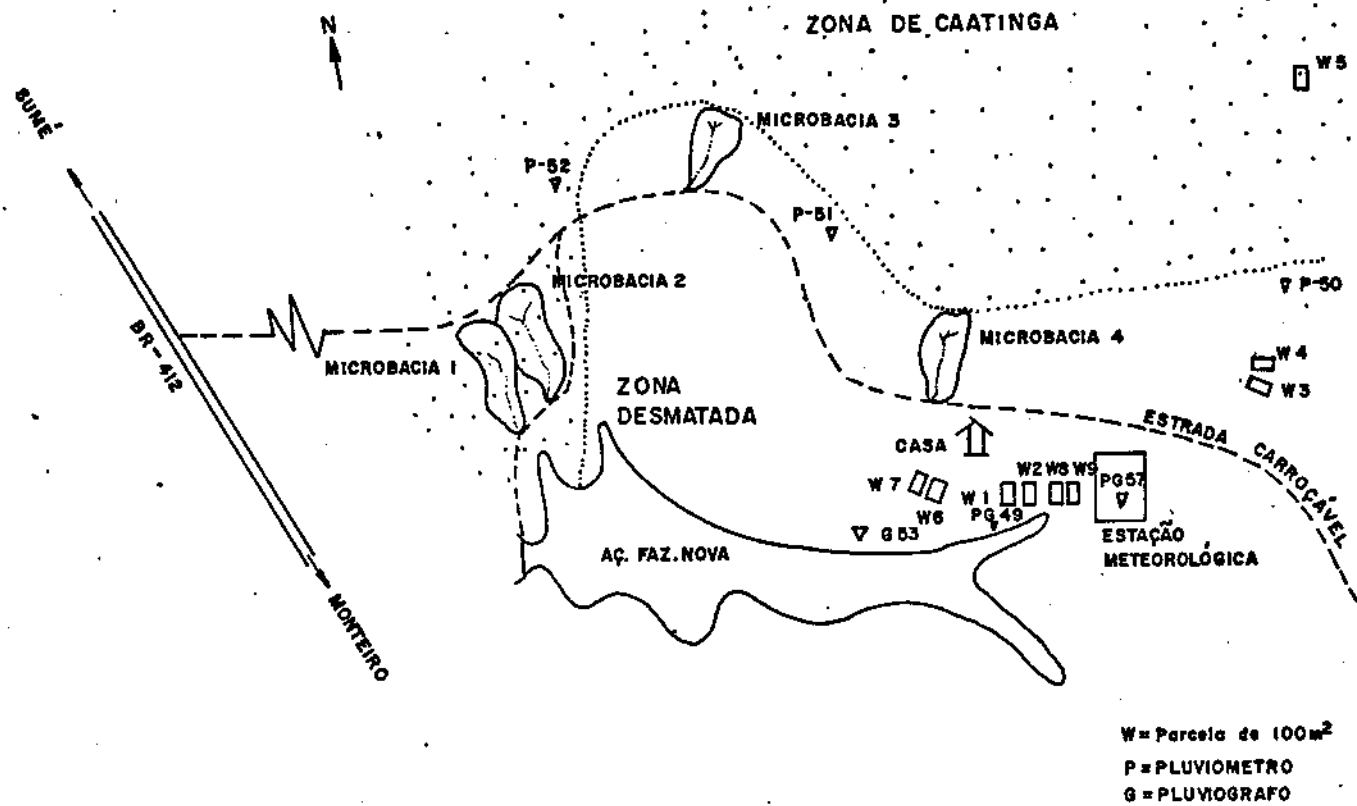


Figura 3.4 Croqui de localização das instalações (Cadler et al 1983)

desviando grande parte dessa circulação para o escoamento. Podem também acontecer "curto-circuitos" de A para C, sem umedecer B; através de caminhos preferenciais.

c) 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 tem dados. Tudo indica que é fraca e localizada, em relação à heterogeneidade e à estrutura falhada do embasamento rochoso.

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 alii (1989b).

3.2.4 - DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

O conjunto da Bacia Experimental é formado por quatro microbacias com área entre 0,5 e 1 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. A Figura 3.4 mostra o croqui das instalações.

Neste trabalho o estudo principal é dirigido às microbacias. Uma das parcelas de 100 m² também é considerada pela semelhança das condições de superfície.

3.2.4.1 - Microbacias e parcelas experimentais

As características das microbacias estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Características das microbacias estudadas (Cadier et alii 1983).

Microbacia	Área (ha)	Perímetro (m)	Declividade média (%)	Cobertura Vegetal
01	0,62	398	7,0	Caatinga Nativa
02	1,07	466	6,1	Caatinga Nativa
03	0,52	302	7,1	Desmatada
04	0,48	270	6,8	Desmatada

A parcela utilizada, a número 4, de 100 m², tem dimensões de 4,55 x 22,00 m, é desmatada, tem 7,0% de declividade, e mesmo tipo de solo das microbacias (Cadier et alii 1983).

Para efeitos de comparação, as mesmas condições de manejo do solo e vegetação são mantidas nas microbacias 3 e 4 e na parcela 4.

Antes e durante a instalação foi realizado um levantamento topográfico, pedológico e botânico para verificar a homogeneidade das bacias. As Figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 mostram o levantamento topográfico das quatro microbacias, realizado em 1982 (Cadier et alii 1983).

As microbacias possuem uma fossa paralelepípedica de cerca de 2300 litros de capacidade, equipada com um vertedor

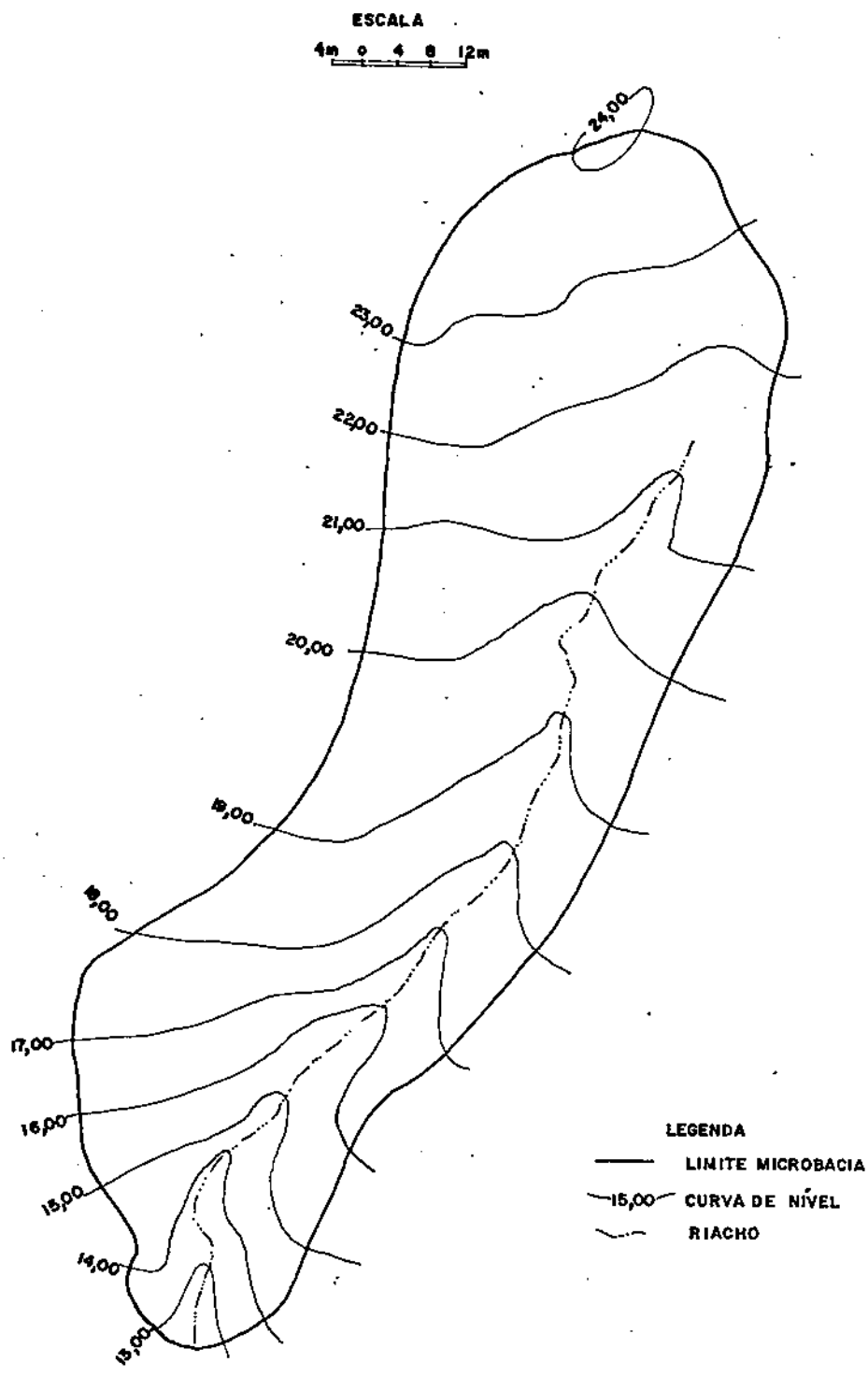


Figura 3.5 Levantamento topográfico da microbacia I
(Cadier et alii 1983)

ESCALA
4m 0 4 8 12m

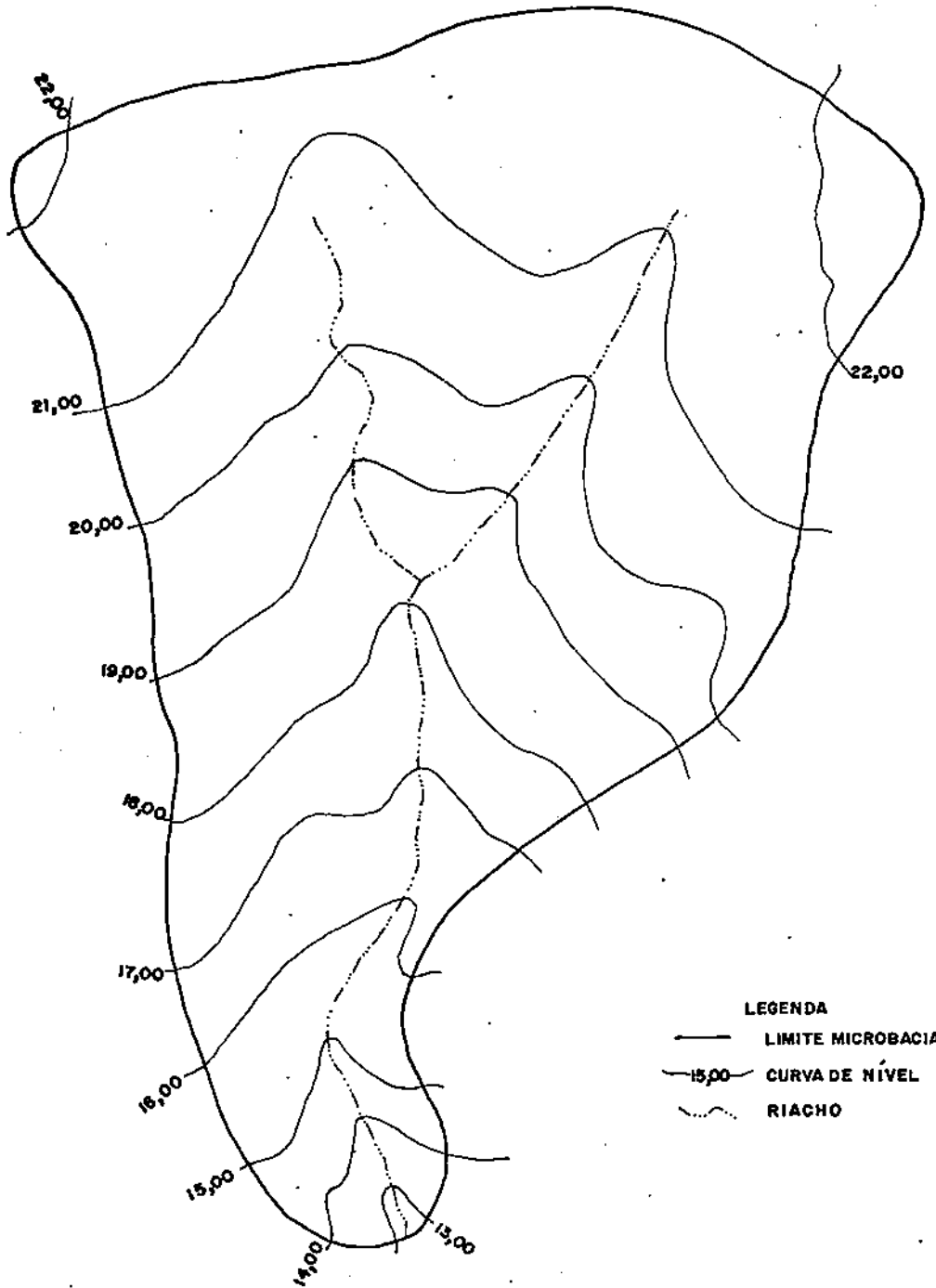


Figura 3,6 Levantamento topográfico da microbacia 2
(Cadier et alii 1983).

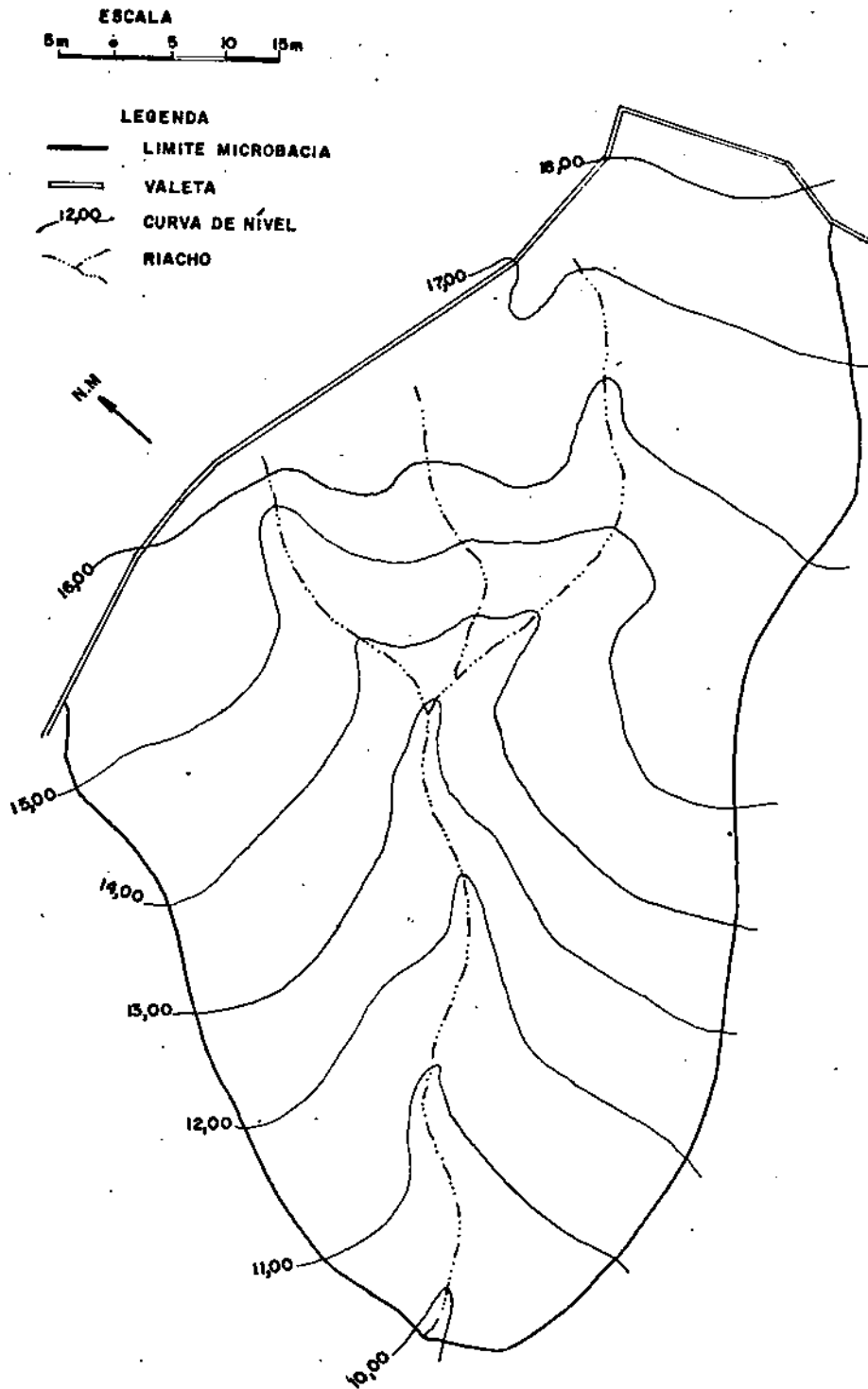


Figura 3.7 Levantamento topográfico da microbacia 3 (Cadier et alii 1983).

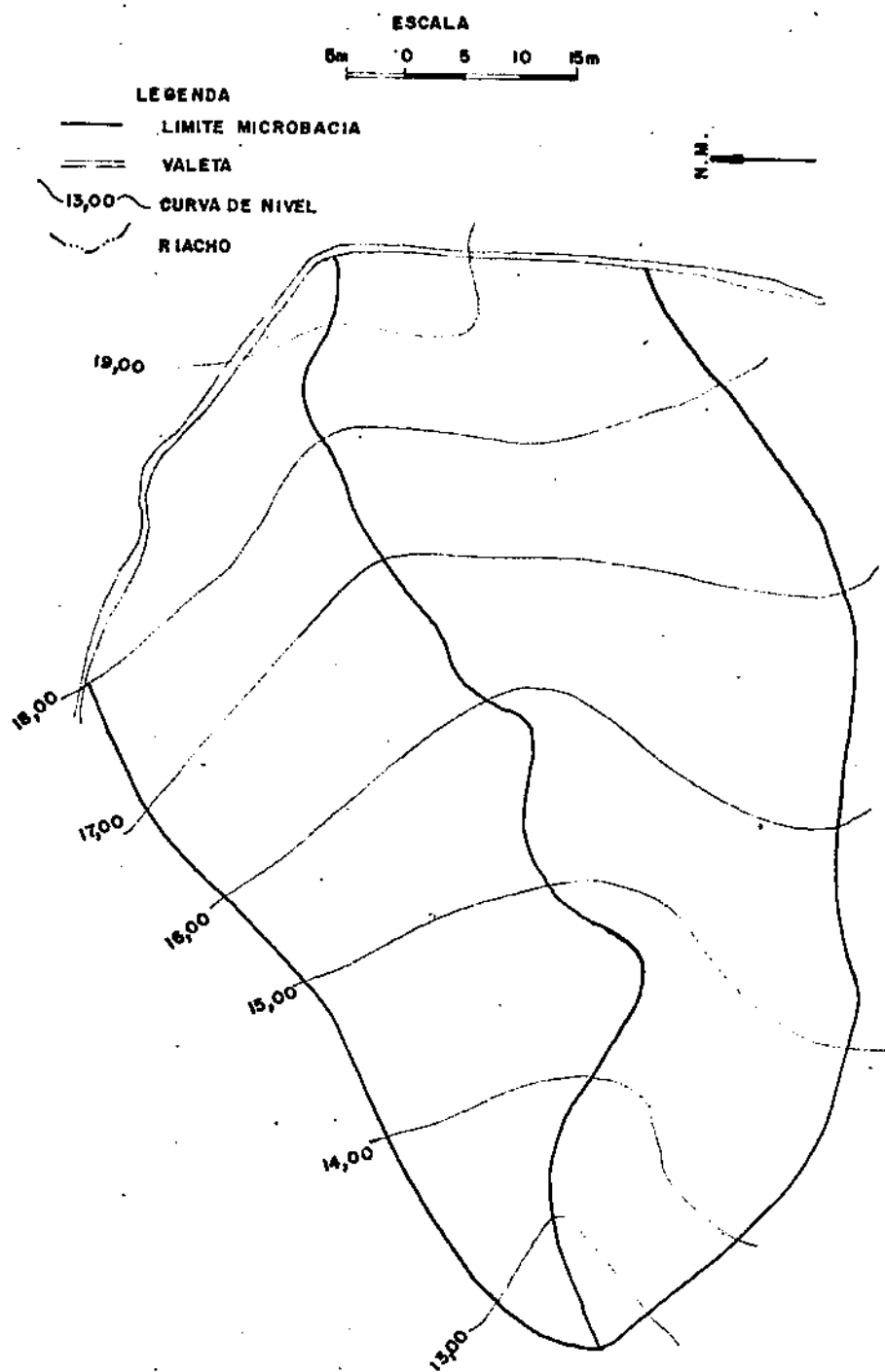


Figura 3.9 Levantamento topográfico da microbacia 4
(Cadier et alii 1983) .

triangular de 90° com parede delgada, dois linigrafos e um dispositivo de amostragem dos sedimentos transportados pelas águas que vertem, como mostra a Figura 3.9. Os linigrafos possuem escalas de tempo diferentes, de modo a melhor registrar o nível de água na fossa coletora.

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 aquele retido na fossa.

A avaliação da produção total de sedimentos da bacia é baseada em amostragem realizada no material retido na fossa (em suspensão e depositado no fundo) e no fluxo vertente. A amostragem dos sedimentos retidos na fossa é realizada em três estágios, correspondentes a diferentes concentrações. A concentração média em cada estágio corresponde a um volume definido. 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 possível, é coletada manualmente durante o evento, na descarga do vertedor. A concentração média destas três amostras é associada ao volume vertido. A produção total de sedimentos é calculada pelo somatório da produção relativa a cada estágio da fossa e ao escoamento através do vertedor.

Nas parcelas, são usados dois tanques de fibrocimento de 1000 litros, com um sistema de partidores no primeiro,

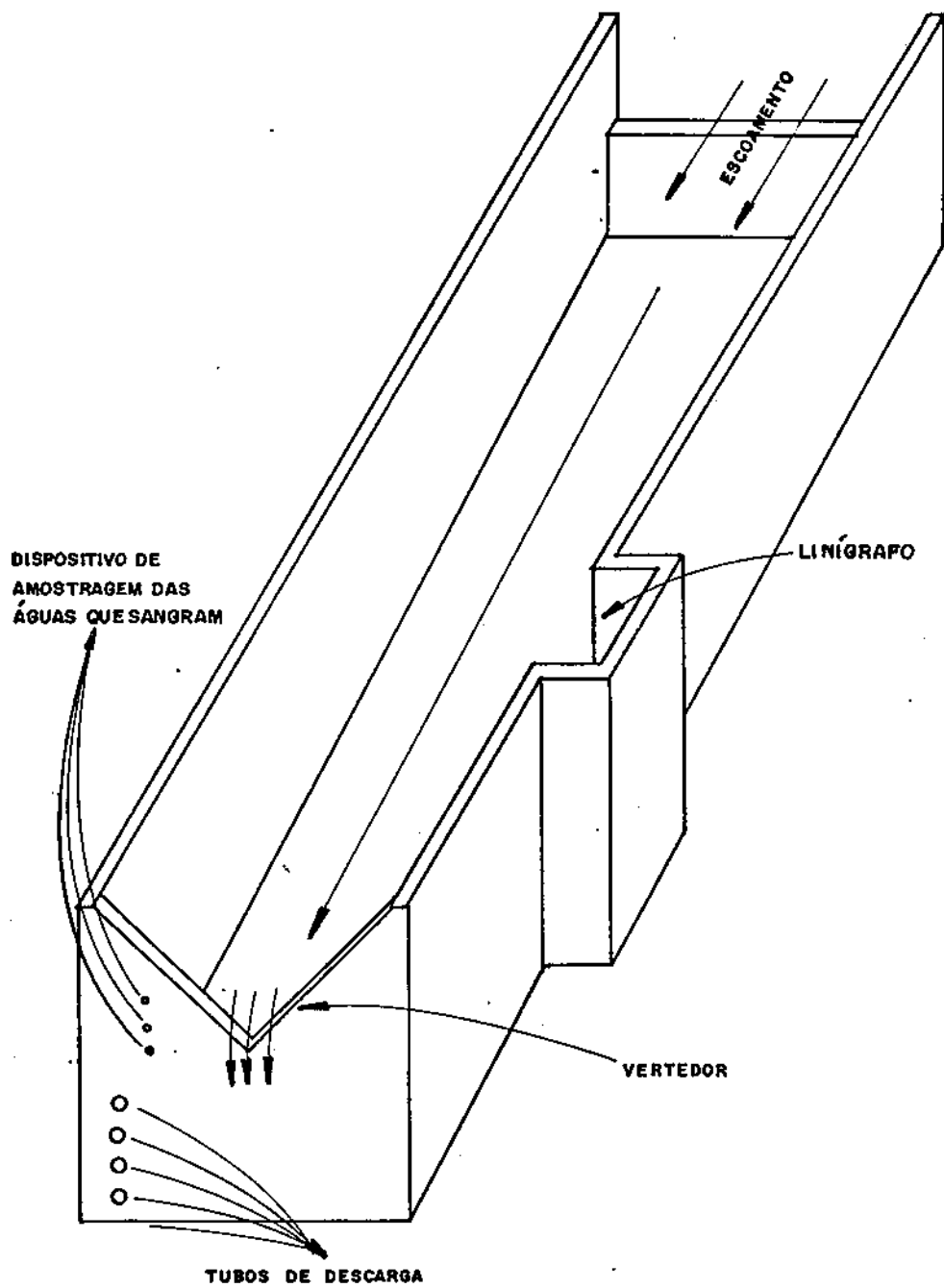


Figura 3.9 Dispositivo de medição das microbacias (Cadier et alii 1983)

onde, dentre os nove tubos vertedores, apenas um é ligado ao segundo tanque, conforme a Figura 3.10. O volume total escoado é a soma do conteúdo do primeiro com nove vezes o conteúdo do segundo. A avaliação da produção de sedimentos é realizada através de amostragem nos dois tanques. As amostras são coletadas no balde coletor, no primeiro tanque (em dois estágios correspondentes a diferentes concentrações), e no segundo tanque (num único estágio). Os tanques são pré-calibrados, de modo que a amostragem de cada estágio é associada a um volume definido. A produção total de sedimentos é estimada pelo somatório da produção relativa a cada estágio.

As amostras de sedimentos são coletadas em volumes de 5 litro ou 1 litro. Para diminuir o volume transportado para o laboratório são submetidas a um processo de reconcentração por floculação com sulfato de alumínio. Dependendo do conteúdo de sedimentos, o volume pode ser reduzido a até 200 ml.

3.2.4.2 - Observações meteorológicas

Cinco pluviômetros e três pluviógrafos, instalados na bacia conforme a Figura 3.4, registram a precipitação na Bacia Experimental de Sumé.

A estação climatológica possui pluviômetro, pluviógrafo, tanque evaporimétrico "Classe A", termômetros, anemômetro, conjunto psicrômetro e heliógrafo. Os dados coletados nesta estação foram utilizados neste trabalho conforme as necessidades.

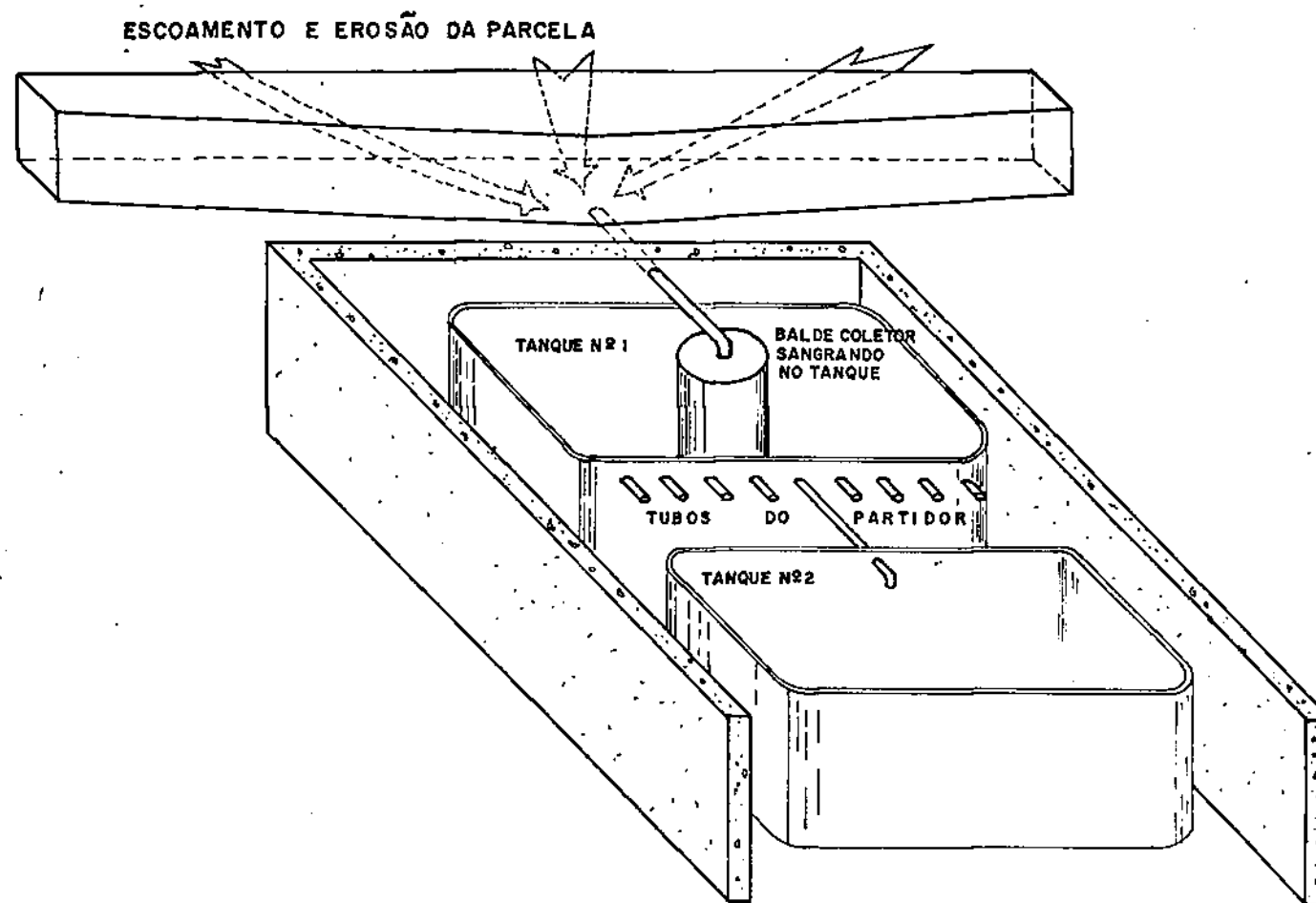


Figura 3.10 Dispositivo de medição das parcelas de 100m² (Cadier et alii 1983)

3.3 - MANEJO DO SOLO E VEGETAÇÃO

Neste estudo foram utilizados os dados coletados no período de 1982 a 1988, que compreende 192 eventos de chuva-escoamento-erosão. O manejo das parcelas e microbacias desmatadas previa uma limpeza da superfície quando a vegetação atingisse 5 cm em média. As microbacias desmatadas (3 e 4) não tiveram continuamente esta manutenção rigorosa, e assim sofreram mudanças no manejo do solo e da vegetação ao longo destes 7 anos. Isto implica, na realidade, em vários períodos separados nos quais as condições da superfície podem ser consideradas como consistentes.

O primeiro período compreende os anos de 1982 e 1983. Foram anos onde 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 a 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. E. Cadier (ORSTOM-SUDENE), em comunicação pessoal, recomendou 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 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.

Essas diferenças identificadas no sistema físico foram confirmadas durante o processo de modelagem. O comportamento hidrológico das microbacias, no que se refere à produção de escoamento superficial, demonstra ter sido diferenciado nos três períodos referidos. Para as microbacias com caatinga (1 e 2), preservadas de qualquer interferência artificial, não foi feita qualquer diferenciação.

3.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Anexo A estão listados os dados de evaporação média mensal diária do tanque evaporimétrico "Classe A" para o período de 1982 a 1988, e altura diária de precipitação para os cinco postos pluviométricos para os eventos utilizados neste trabalho.

Os relatórios parciais do Projeto da Bacia Experi-

mental de Sumé fornecem mais detalhes que os apresentados aqui (Cadier et alii 1983, Gomes 1985a e 1985b, Gomes et alii 1987b; Gomes et alii 1988, Srinivasan e Galvão 1989). Estas informações foram condensadas por Srinivasan e Galvão (1990), que apresentam a totalidade dos dados coletados na bacia desde sua instalação.

4 - O MODELO MODIBI

4.1 - DESCRIÇÃO DO MODELO

4.1.1 - APRESENTAÇÃO

O modelo MODIBI foi inicialmente proposto numa versão mensal (Ibiza 1983), evoluindo depois para o intervalo diário (Ibiza 1985). Neste estudo partiu-se da versão de julho de 1986, descrita por Servat (1986a, 1986b), implementada na linguagem Fortran 77 para microcomputador (tipo IBM PC). Foram realizadas algumas alterações no seu algoritmo, sem porém descaracterizá-lo, além de adaptá-lo para a linguagem Basic (versão Turbo Basic). Neste texto, a versão de Servat é denominada "versão original"; a forma efetivamente utilizada é chamada "versão modificada".

O modelo é do tipo conceitual determinístico global, a nível diário. Foi concebido originalmente para ser utilizado em regiões úmidas, onde a influência do lençol subterrâneo sobre a infiltração e, conseqüentemente, o escoamento, fosse acentuada. O balanço hídrico é representado no MODIBI através de

um sistema de reservatórios.

Estudos anteriores com aplicação do MODIBI foram relatados por Ibiza (1985, 1988) e Chevallier (1988).

Chevallier (1988) ressalta duas particularidades importantes do MODIBI: ele leva em conta explicitamente o funcionamento dos lençóis subterrâneos, cujos níveis de água podem influenciar a infiltração, e a interdependência existente na função de produção entre a evapotranspiração, a cobertura vegetal e o horizonte radicular (representados pelo reservatório "horizonte vegetal") e a infiltração (e portanto a alimentação da zona saturada). Esta última característica é muito importante para o caso das microbacias de Sumé, onde a cobertura vegetal é a grande diferença entre elas.

Marwell Filho e Lanna (1986) propuseram o Mohtsar, Modelo Hidrológico para o Trópico Semi-Árido, cuja metodologia de balanço hídrico teve origem na versão mensal do MODIBI, sendo adaptado especificamente para as condições do trópico semi-árido. Lanna e Schwarzbach (1989) aperfeiçoaram o Mohtsar, de modo a torná-lo um modelo genérico, aplicável a outras condições físico-climáticas, resultando o modelo Modhac.

4.1.2 - ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO

4.1.2.1 - Dados de entrada

O modelo precisa das seguintes informações como entrada:

1. Precipitação diária - P (mm)*
2. Evapotranspiração potencial média mensal diária - ETP (mm)
3. Lâminas observadas diárias - Lo (mm)

4.1.2.2 - Parâmetros

Os modelos hidrológicos possuem uma estrutura definida e alguns parâmetros que controlam sua operação; estes parâmetros devem ser definidos para a bacia específica, com o objetivo de particularizar o modelo para ela, de modo que ele reproduza satisfatoriamente seu comportamento hidrológico (Ibbitt e O'Donnell 1971). Os valores ótimos destes parâmetros são obtidos pela calibragem do modelo. Os parâmetros de calibragem do MODIBI são:

1. Coef. de correção da chuva - A
2. Coef. de correção da evapotranspiração - COEF
3. Coef. de repartição da chuva - X
4. Dimensão do reservatório de partição - HO (mm)*
5. Coef. de descarga do reservatório de partição - XT
6. Dimensão do reservatório horizonte vegetal - DEFDO (mm)*
7. Déficit inicial do horizonte vegetal - DEFDEB (mm)*
8. Coef. de escoamento rápido - Q
9. Retenção que limita o escoamento rápido - FN (mm)*
10. Coef. de alimentação do reservatório do lençol - P2
11. Dimensão do reservatório do lençol - HNO (mm)*
12. Nível inicial do reservatório do lençol - HNAPO (mm)*
13. Coef. de recessão do reservatório do lençol - AL (1/dia)
14. Dimensão do reservatório recessão lenta - HNO1 (mm)*

* - No programa a entrada é feita em 1/10 mm

15. Coef. de recessão lenta - R2 (1/hora)

16. Coef. de fuga - P1

Outros parâmetros utilizados no modelo:

1. Nivel inicial do reservatório horizonte vegetal - DU

$$DU = DEFCD - DEFDEB$$

2. Nivel inicial do reservatório de partição - H1 (= 0)

3. Nivel inicial do reservatório recessão lenta - HN1 (= 0)

4.1.2.3 - Funcionamento

A Figura 4.1 mostra o diagrama de funcionamento do MODIBI, e a Figura 4.2 (Ibiza 1985) apresenta uma representação do modelo a nível de vertente, enfatizando a fase subterrânea. Servat (1986a) apresenta de modo bastante claro e detalhado seu algoritmo de cálculo.

A seguir descreve-se seu funcionamento e as diferenças em relação à versão original.

A chuva observada P pode sofrer alteração através do fator de correção A , que tenta levar em conta a distribuição espacial das precipitações na bacia.

Parte desta chuva corrigida se dirige ao reservatório horizonte vegetal DEFCD, passando pelo reservatório de partição HQ. A outra parte dirige-se diretamente para a infiltração e escoamento rápido. Esta divisão da chuva é realizada pelo coeficiente de repartição da chuva X . Sua função é permitir o direcionamento de parte da chuva diretamente para o lençol ou

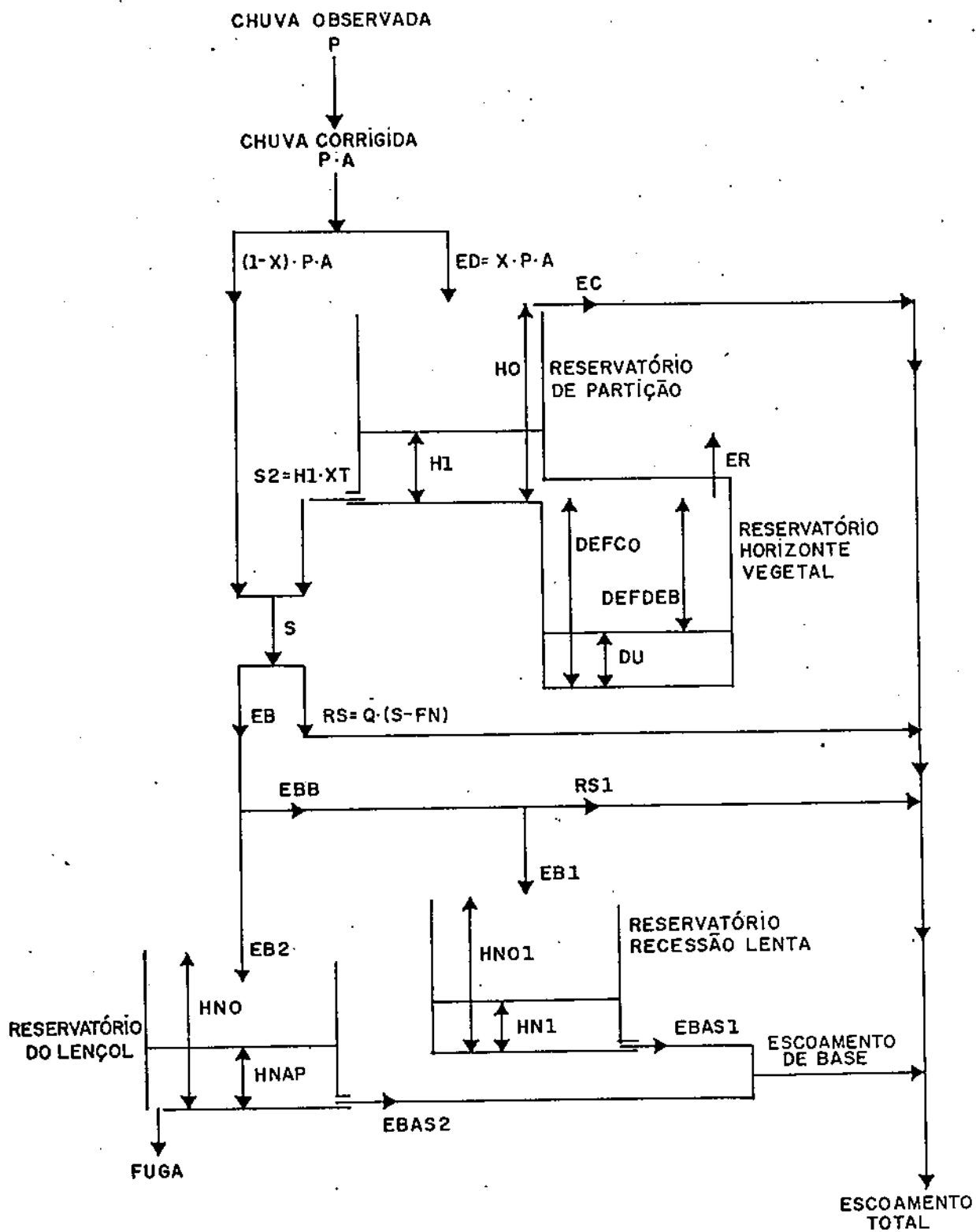


Figura 4.1. Diagrama esquemático do modelo MODIB modificado.

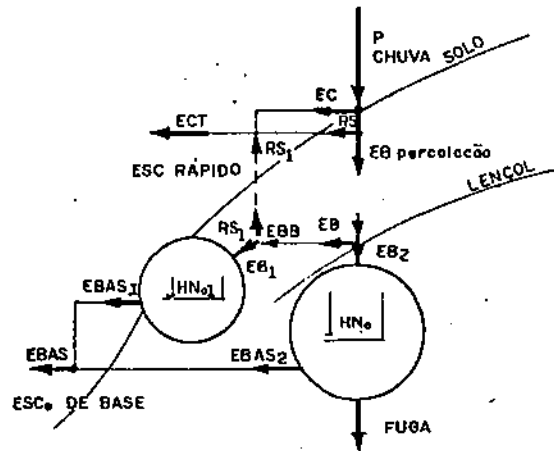


Figura 4.2. Representação do princípio de funcionamento do MODIBI (Ibiza 1985).

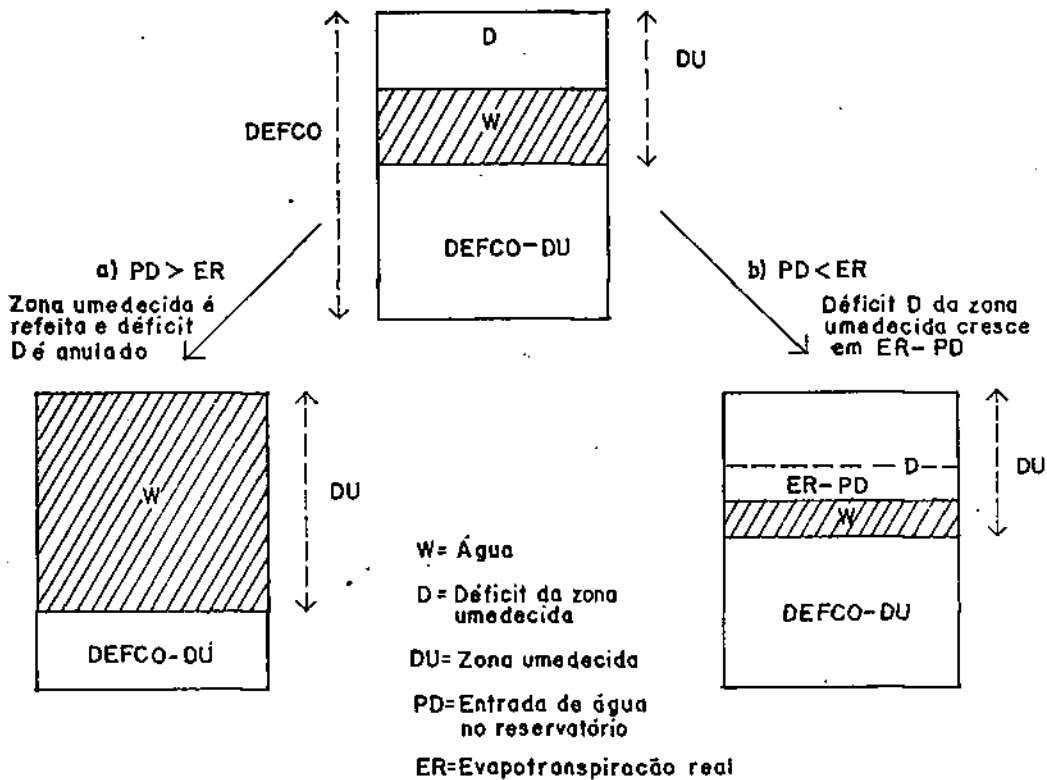


Figura 4.3. Funcionamento do reservatório horizonte vegetal no MODIBI original (adaptado de Servat 1986 a).

para o fluxo subsuperficial, importante nos períodos em que ocorre escoamento apesar de baixa pluviosidade. Caso não ocorresse este aporte de água, o horizonte vegetal tenderia a absorver todas as pequenas chuvas. A intervenção efetiva do coeficiente X no processo dá-se então exclusivamente nestes períodos.

O reservatório de partição funciona como uma passagem para o horizonte vegetal. Depois de suprida a evapotranspiração e do enchimento deste último, o excesso de água permanece no reservatório de partição. Caso haja transbordamento, este dará a parcela EC do escoamento superficial. Houve uma pequena mudança no cálculo de EC. Pelo cálculo original EC é dado como a diferença entre a água disponível ED e o déficit total dos reservatórios horizonte vegetal e partição. Na nova forma a evapotranspiração calculada é também debitada da água disponível, no cálculo de EC. Isto implica numa redução da possibilidade de ocorrência de EC, por que há maior retenção de água no reservatório de partição. Do remanescente H no reservatório, uma fração SZ , definida pelo coeficiente de descarga XT , percola subsuperficialmente, indo se unir à parte da chuva que não se dirigiu ao reservatório de partição, dando então a quantidade total percolada S .

O reservatório horizonte vegetal representa a parte superficial do solo que contém as raízes ativas. Nele ocorre a evapotranspiração real. Na versão original, este reservatório é considerado da seguinte forma (Figura 4.3, Servat 1986a): uma dimensão total $DEFCO$ e uma zona umedecida DU . Na ocorrência de precipitação, a entrada de água para este reservatório (deno-

minada de PD na Figura 4.3) forma a zona umedecida, medida a partir da sua borda, e que pode ou não ocupar a dimensão total do reservatório. Durante os dias seguintes, não havendo precipitação (ou sendo a parte PD destinada ao horizonte vegetal menor que a evapotranspiração) a zona umedecida sofre redução a partir da borda (superfície). Na mesma versão, a evapotranspiração real é calculada proporcional à evapotranspiração potencial e à quantidade de água presente em relação à dimensão da zona umedecida, isto é, $ER = ETP \cdot (DU - D) / DU$. O valor de ER utilizado nas operações dos dois reservatórios é porém o calculado no dia anterior. Como não há no programa dispositivos de checagem de seu valor em relação à água realmente disponível, ocorreram nos primeiros testes do modelo problemas no fechamento do balanço hídrico. Este esquema de funcionamento foi modificado para adaptar-se melhor às condições estudadas e para corrigir o balanço hídrico calculado. Na Figura 4.1 o reservatório horizonte vegetal já está modificado. Eliminou-se a zona de umedecimento; a dimensão DU passou a significar a zona de armazenamento de água, e a variável de déficit D deixa de existir. A evapotranspiração real passou a ser determinada como $ER = ETP \cdot (DU + ED) / DEFCO$. Esta concepção difere um pouco da original, pois considera a proporção de toda a água disponível em relação à dimensão total do reservatório, ao invés da dimensão da zona umedecida, como na versão original. ER é calculada no mesmo dia, para adaptação às condições de irregularidade de chuva do semi-árido. Implantou-se restrições no cálculo de ER em relação à água disponível no reservatório e à taxa potencial: a) ER pode no máximo igualar a ETP; b) ER não pode ser inferior à chuva disponível na entrada (ED), se esta não superar

a ETP; e c) ER nunca é maior que a água total disponível para a evapotranspiração (DU + ED). Estas considerações implicam numa prioridade para ER na destinação da água precipitada que dirige-se ao horizonte vegetal, formulação mais coerente com as condições do semi-árido. A ETP, dado de entrada, pode ser corrigida através de um coeficiente COEF.

A percolação subsuperficial S2 provocada pela descarga do reservatório de partição e a parte da chuva que não se dirigiu aos reservatórios superficiais formam a quantidade de água S, que é repartida para o escoamento rápido RS e para a recarga do lençol subterrâneo EB, através dos parâmetros FN e Q: $RS = Q.(S - FN)$ e $EB = S - RS$.

A circulação da quantidade infiltrada EB no lençol (Figura 4.2, Ibiza 1985) é simulada através de dois reservatórios, o reservatório do lençol HNO e o reservatório de recessão lenta HNO1. Ibiza (1985) propõe este sistema de reservatórios simulando o escoamento de base, através de liberação de água em duas partes EBAS1 e EBAS2. Sugere também uma "rejeição à infiltração" pela saturação das reservas subterrâneas, representada pelo transbordamento do reservatório recessão lenta. Essa rejeição é a fração RS1 do escoamento superficial direto. Outra parte dá a fuga para o lençol profundo ou para bacias vizinhas. No algoritmo original a fuga é representada como uma fração da quantidade EB2, através do coeficiente P1. Como EB2 cresce inversamente com o estado de enchimento HNAP do reservatório HNO, a fuga será tanto menor quanto mais próximo da saturação estiver o len-

çol. Parece melhor considerar a fuga proporcional à água disponível anteriormente no reservatório, HNAP, mais EB2, o que foi feito no algoritmo modificado. Para uma bacia onde não ocorre escoamento de base (o presente caso), em considerando que não houvesse reservatórios de lençol (HNO e HNO1 nulos), EB2 não existiria e EB daria RS1, nunca destinando nada para a fuga, o que não é aceitável. Foi então incluído um algoritmo alternativo para garantir a fuga, considerando como condição de não existência do escoamento de base o anulamento dos dois reservatórios de lençol, de modo a EB1 ser anulado, ficando a fuga igual a EB2.

A sequência de cálculos do balanço hídrico é a seguinte, realizada a nível diário:

1. Precipitação corrigida indo para os reservatórios superficiais

$$ED = X.A.P \quad (\text{eq. 4.1})$$

2. Evapotranspiração potencial corrigida

$$EV = ETP.COEF \quad (\text{eq. 4.2})$$

3. Déficit do horizonte vegetal*

$$D1 = DEFCO - DU \quad (\text{eq. 4.3})$$

4. Déficit total dos horizontes superficiais

$$EO = D1 + HO - H1 \quad (\text{eq. 4.4})$$

5. Evapotranspiração real*

$$\text{se } ED \geq EV \quad \rightarrow \quad ER = EV \quad (\text{eq. 4.5})$$

caso contrário:

$$ER = EV.(DU + ED)/DEFCO, \text{ com as restrições: } (\text{eq. 4.6})$$

$$\text{se } EV > ED > ER \quad \rightarrow \quad ER = ED \quad (\text{eq. 4.7})$$

$$\text{se } ER > EV \quad \rightarrow \quad ER = EV \quad (\text{eq. 4.8})$$

$$\text{se } ER > (DU + ED) \quad \rightarrow \quad ER = (DU + ED) \quad (\text{eq. 4.9})$$

* - Itens com modificação

6. Transbordamento do reservatório de partição*

$$EC = EB - ER - E0 \quad (\text{eq. 4.10})$$

7. Novo nível do reservatório de partição

$$H = H1 + ED - D1 - EC - ER \quad (\text{eq. 4.11})$$

8. Novo nível do reservatório horizonte vegetal*

$$DU = DU + ED + H1 - H - EC - ER \quad (\text{eq. 4.12})$$

9. Descarga do reservatório de partição

$$S2 = H.XT \quad (\text{eq. 4.13})$$

10. Nível final do reservatório de partição

$$H1 = H - S2 \quad (\text{eq. 4.14})$$

11. Água total percolada

$$S = S2 + A.P.(1 - X) \quad (\text{eq. 4.15})$$

12. Escoamento rápido - componente RS, subsuperficial

$$RS = Q.(S - FN) \quad (\text{eq. 4.16})$$

13. Alimentação do lençol

$$EB = S - RS \quad (\text{eq. 4.17})$$

14. Nível subterrâneo - existem os reservatórios subterrâneos

14.1. Alimentação do reservatório do lençol

$$EB2 = P2.EB.(HND - HNAP)/(EB + HND - HNAP) \quad (\text{eq. 4.18})$$

14.2. "Transbordamento" do reservatório do lençol

$$EBB = EB - EB2 \quad (\text{eq. 4.19})$$

14.3. Alimentação do reservatório recessão lenta

$$EB1 = EBB \quad \text{até o máximo de } (HND1 - HN1) \quad (\text{eq. 4.20})$$

14.4. Novo nível do reservatório recessão lenta

$$HN1 = HN1 + EB1 - EBAS1 \quad (\text{eq. 4.21})$$

14.5. Escoamento de base - componente EBAS1

$$EBAS1 = (HN1 + HN1I).(1 - e^{-(K2-24)})/2 \quad (\text{eq. 4.22})$$

* - Itens com modificação

HN1I é o nível do reservatório no dia anterior

14.6. Novo nível do reservatório do lençol*

$$HNAP = (HNAP + EB2).(1 - P1) - EBAS2 \quad (\text{eq. 4.23})$$

14.7. Escoamento de base - componente EBAS2

$$EBAS2 = (HNAP + HNAPI).(1 - e^{-\alpha})/2 \quad (\text{eq. 4.24})$$

HNAPI é o nível do reservatório no dia anterior

14.8. Fuga lateral ou profunda*

$$EFU = P1.(HNAP + EB2) \quad (\text{eq. 4.25})$$

15. Nível subterrâneo - não existem reservatórios subterrâneos*

$$EB2 = P2.EB \quad (\text{eq. 4.26})$$

$$EBB = EB - EB2 \quad (\text{eq. 4.27})$$

$$EB1 = 0 \quad (\text{eq. 4.28})$$

$$EFU = EB2 \quad (\text{eq. 4.29})$$

16. Escoamento rápido - componente RS1, transbordamento do lençol (rejeição à infiltração)

$$RS1 = EBB - EB1 \quad (\text{eq. 4.30})$$

17. Escoamento total

$$ECT = EC + RS + RS1 + EBAS1 + EBAS2 \quad (\text{eq. 4.31})$$

18. Água remanescente no solo

$$AGUAFIM = DU + H1 + HN1 + HNAP \quad (\text{eq. 4.32})$$

4.1.3 - CALIBRAGEM DO MODELO

4.1.3.1 - Considerações gerais

A determinação dos parâmetros e a avaliação do grau de ajuste do modelo à bacia é o principal problema enfrentado pelos usuários dos modelos. É o que constitui o processo de calibragem.

* - Itens com modificação

A questão é que o que se gostaria de saber sobre a descrição interna do sistema (os estados, parâmetros, e suas interações) é de uma ordem maior do que o que pode ser observado sobre a descrição externa do comportamento do sistema (entradas e saídas); na prática o problema se reduz a uma função objetivo para a estimativa dos parâmetros que tem uma forma imperfeita sobre a qual é difícil localizar eficiente e consistentemente um único ótimo global (Wheater et alii 1986). Tentativas têm sido feitas com o objetivo de minorar este problema. A simplificação dos modelos é uma delas, reduzindo o número de parâmetros, mantendo os mais sensíveis e dominantes, como o SMAP, por exemplo (Lopes et alii 1981). Outra opção é a mudança na estrutura dos modelos, dando maior consistência aos parâmetros e tentando evitar interdependências (Rotunno Filho e Magalhães 1987, Sorooshian e Gupta 1985). A terceira alternativa é a formulação de esquemas mais sofisticados de estimativa de parâmetros.

A primeira maneira de encontrar os melhores valores para os parâmetros de um modelo para uma dada bacia é a atribuição tentativa de valores, baseando-se na experiência e sensibilidade hidrológica. Duas consequências são previsíveis: o processo pode tornar-se muito demorado, se o modelador não tiver suficiente experiência com o modelo, e o conceito de "ótima" calibragem vai depender apenas do modelador.

4.1.3.2 - Otimização automática de parâmetros

Para remover subjetividade no ajuste do modelo aos dados, ou em determinar os valores dos parâmetros, foi proposta

otimização automática. Isto envolve sucessivas mudanças nos valores dos parâmetros de acordo com regras pré-concebidas de incremento, que levam em conta os resultados dos estágios anteriores e em particular se uma mudança melhorou ou não o ajuste, avaliado através de um critério especificado.

Há vários tipos de métodos de otimização automática de parâmetros disponíveis na literatura. Dawdy e O'Donnell (1965) estão entre os primeiros que propuseram otimização automática de parâmetros como alternativa para um melhor e mais rápido ajuste de parâmetros em modelos hidrológicos conceituais. Boas revisões são apresentadas por Ibbitt e O'Donnell (1971), Clarke (1973) e Tucci (1975).

Foi incluído, na versão modificada do MODIBI, um algoritmo de otimização automática de parâmetros; segundo o método de Rosenbrock (1960). A rotina utilizada foi adaptada da existente no modelo Modhac (Lanna e Schwarzbach 1989). É possível escolher: a função objetivo dentre oito alternativas disponíveis no programa, os parâmetros a serem otimizados e a faixa de variação de cada um. Estas restrições asseguram que a automatização da calibragem não conduza a valores hidrológicamente inconsistentes. Este método é do tipo "busca direta", onde os parâmetros são alterados alternadamente, de modo que gradativamente um parâmetro se ajuste aos valores assumidos pelos outros. Em cada simulação um parâmetro é alterado. Se ocorrer melhoria da função objetivo o passo de variação é triplicado; caso contrário, é reduzido à metade e muda de sentido. Se, para todos os parâmetros, após uma

melhoria ocorre piora da função diz-se que ocorre um "vale". Faz-se então uma rotação de eixos, de modo que o eixo do primeiro parâmetro coincida com a direção do vale, e reinicia-se o ciclo de variação. A finalização do processo é determinada por uma das três condições: a conclusão de um número definido de simulações; as alterações de todos os parâmetros sejam muito pequenas; ou a melhora do valor da função objetivo for insignificante entre uma rotação e outra. A cada simulação, para acompanhamento do processo pelo modelador, são apresentados os valores dos parâmetros e da função objetivo. O programa permite também variar apenas um parâmetro, definindo o passo e a faixa de variação, e verificar o efeito na função objetivo.

4.1.3.3 - Critérios de ajuste

A otimização necessita de um índice que exprima a concordância entre os valores observados e calculados. Esse índice, ou critério de ajuste do modelo, é comumente chamado de "função objetivo". Ela pode ser determinada sobre todo o intervalo de duração da série observada, ou em períodos pré-determinados tais como picos ou outros no hidrograma. Pode-se ainda usar funções objetivo diferentes para diferentes magnitudes das lâminas escoadas, mesmo que sobre um mesmo período. Khan (1989) propõe este tipo de avaliação como um meio de verificar deficiências do modelo em reproduzir cada faixa de fluxo. Wheeler et alii (1986), por seu turno, propõem o uso de funções diferentes para períodos da série com particularidades, onde os parâmetros dominantes para cada trecho específico possam ser calibrados mais adequadamente.

A escolha da função depende do tipo de aplicação a que o modelo vai se destinar. Funções de diversos tipos têm sido apresentadas na literatura (Dawdy e Lichty 1968, Lichty et alii 1968, Nash e Sutcliffe 1970, Ibbitt e O'Donnell 1971, Clarke 1973).

É recomendável que, além de usar uma função como critério de otimização dos parâmetros, deve-se calcular outras como medidas de performance do modelo ajustado (Diskin e Simon 1977).

Entre os estudos realizados no semi-árido do Nordeste brasileiro, os de Cadier e Campello (1983), Marwell Filho e Lanna (1986), Viana (1986), Ferreira Filho e Nunes (1987) e Lanna e Schwarzbach (1989) apresentam vários critérios adequados a esta região, caracterizada por longos períodos de estiagem, onde a maioria das vazões são baixas ou nulas.

Foram as seguintes as funções objetivo implementadas no modelo, selecionadas entre as propostas pelos autores referenciados:

$$1. F = \sum |L_c - L_o| \quad (\text{eq. 4.33})$$

$$2. F = \sum (L_c - L_o)^2 \quad (\text{eq. 4.34})$$

$$3. F = 100 \cdot (1 - R^2), \text{ onde} \quad (\text{eq. 4.35})$$

$$R^2 = (\sum (L_o - L_m)^2 - \sum (L_c - L_o)^2) / \sum (L_o - L_m)^2 \quad (\text{eq. 4.36})$$

$$4. F = \sum (2 \cdot (L_c - L_o) / (L_o + L_c))^2 \quad (\text{eq. 4.37})$$

$$5. F = \sum (L_c - L_o) \quad (\text{eq. 4.38})$$

$$6. F = \sum (L_c - L_o)^2 / \sum L_c^2 \quad (\text{eq. 4.39})$$

$$7. F = \sum (2 \cdot (L_c - L_o)^2 / (L_o + L_c)) \quad (\text{eq. 4.40})$$

$$8. F = \Sigma |L_c - L_o| / (\Sigma (L_o - L_m)^2)^{1/2} \quad (\text{eq. 4.41})$$

onde, L_o é a lâmina observada em um evento,

L_m é a lâmina média observada no período considerado,

L_c é a lâmina calculada pelo modelo em um evento,

R^2 é o coeficiente de determinação.

Devido às características do semi-árido, onde apenas uma pequena parte dos dias do ano são chuvosos, as funções objetivo são calculadas apenas nos períodos aqui ditos "válidos", aqueles onde ocorreu chuva ou escoamento. Isto evita que as funções número 3 e número 8 forneçam equívocos por levar em conta o ajuste "perfeito" das lâminas no período de estiagem. As funções número 1 (Marwell Filho e Lanna 1986), número 2 (clássica nos estudos com modelos conceituais) e número 3 são mais adequadas à calibragem de lâminas altas; a função número 3 tem origem na estatística e é um critério clássico de avaliação de ajuste (Nash e Sutcliffe 1970); a número 4 é mais adequada a lâminas baixas; a de número 5 é interessante para verificar se o modelo está tendendo a subestimar ou superestimar no todo as vazões geradas em relação à série observada; a função número 6 tem sido utilizada pela SUDENE (Cadier e Campello 1983) para a calibragem de modelos às Bacias Representativas do Nordeste; as funções número 7 e número 8, utilizadas pelo Modhac (Lanna e Schwarzbach 1989), são recomendadas quando o ajuste deva levar em conta tanto as lâminas altas como as baixas.

Para facilitar a avaliação da modelagem, a versão aqui modificada permite a impressão de tabelas de acompanhamento

da simulação evento a evento, onde são apresentados os valores de cada elemento do balanço hídrico calculado. A visualização do ajuste também pode ser feita através de gráficos.

4.1.3.4 - Comportamento dos parâmetros do MODIBI

Ibiza (1988) oferece valiosas sugestões para calibragem do modelo, baseado na experiência adquirida desde sua concepção. Enfatiza a necessidade de um bom conhecimento da precipitação média na bacia para conseguir um adequado ajuste entre as lâminas observadas e calculadas. Recomenda atingir-se um coeficiente de correlação no mínimo igual a 0,9. Para os valores dos parâmetros, sugere:

DEFCO. Seu valor varia entre 120 e 200 mm quando a estação seca não é muito acentuada, e cresce com o volume de vegetação. Quando a estação seca é muito acentuada, seu valor fica entre 60 e 120 mm para uma cobertura de gramíneas, ou pode chegar até a 250 mm ou mais, para plantas perenes com um sistema radicular profundo, geralmente em solos argilosos.

X. Varia entre 0,7 e 1. Pode-se usar um valor médio de 0,8. Seu objetivo é proporcionar um pouco de escoamento nos dias secos ou de baixa precipitação, quando toda a chuva disponível ficaria retida no horizonte vegetal.

HQ. Pode ser tomado igual a DEFCO.

XT. Vale $24/TB$, até um máximo de 1. TB é o tempo de base em horas.

Q. Parâmetro muito sensível e importante do modelo; não há faixa determinada para sua variação. Os estudos de

Ibiza (1985) e Chevallier (1988) sobre várias bacias forneceram uma variação grande de valores deste parâmetro. Ibiza (1985) não o considera um parâmetro inteiramente ligado às características físicas da bacia.

HNO. Varia entre 0 e 600 mm, aproximadamente. Pode ser avaliado a partir das vazões observadas plotadas em coordenadas semi-logarítmicas.

AL. Também estimado a partir das vazões observadas, vale entre 0,003 e 0,1.

FN. Parâmetro secundário e pouco sensível, influi principalmente nas lâminas muito baixas. Estimado como o produto de HNO por AL, ou seja, a vazão máxima de recessão.

HNO1. Varia entre 0 e 120 mm. Determinado como HNO.

R2. Aumenta com a declividade da bacia e tem seu valor entre 0,011 a 0,017.

P2. Parâmetro pouco sensível, pode ser tomado entre 0,8 e 1.

P1. Como não há possibilidade de computar a evaporação do tençol, usa-se este parâmetro para traduzir este fenômeno, além da fuga lateral e profunda.

4.2 - APLICAÇÃO DO MODELO AS MICROBACIAS DE SUMÉ

4.2.1 - DADOS UTILIZADOS

A série utilizada corresponde ao período 1982/88. Foram utilizados os dados de precipitação dos cinco postos da bacia. Para avaliar a evapotranspiração utilizou-se os dados mé-

dios mensais do tanque evaporimétrico "Classe A" da estação climatológica Fazenda Nova, também localizada na bacia experimental. No Anexo A estão listados os dados de precipitação e evaporação e os procedimentos utilizados para preenchimento de falhas e cálculo de médias.

4.2.2 - RESULTADOS DA CALIBRAGEM

Inicialmente foram realizadas várias simulações tentativas para adquirir sensibilidade da influência de cada um dos parâmetros. Realizou-se também vários testes de otimização automática, para verificar o comportamento do algoritmo de Rosenbrock aplicado ao MODIBI e a eficiência das várias funções objetivo implementadas no modelo.

A otimização automática conjunta dos cinco parâmetros, na maioria dos casos mostrou-se ineficiente, frequentemente estacionando em mínimos locais, exceto nas últimas tentativas de refinamento, quando a faixa de variação assumida para os parâmetros já era pequena. Assim, na maior parte dos casos, o método foi mais útil para otimizar cada dois ou três parâmetros, caracterizando-se como um recurso importante de auxílio na calibragem, mas não como um instrumento de automação dela.

Em comunicações pessoais, Michel Molinier (ORSTOM-SUDENE) e Pierre Chevallier (ORSTOM-UFRS), que trabalharam com o modelo na sua versão sem algoritmo de otimização, e Antônio Eduardo Lanna (UFRS), que implantou Rosenbrock a nível mensal num modelo do mesmo tipo (Modhac), haviam previsto este comportamento do MODIBI a nível diário.

Concluiu-se a calibragem final pelo uso alternado de tentativas, da otimização automática e da análise de sensibilidade de parâmetros isoladamente. Fugiu-se então do propósito do uso de otimização automática como um meio de eliminar a subjetividade do modelador na condução do processo ajuste. O método de otimização e as funções objetivo nem sempre conseguem acompanhar o comportamento real do sistema; a "mão" do modelador, conhecedor da bacia e da "história" das medições realizadas, passa a ter um papel importante na calibragem do modelo. É necessário porém que a calibragem realizada possa, após concluída, ser aferida através de critérios objetivos e aceitos pela comunidade científica. Neste sentido as funções objetivo funcionam como esses critérios de aferição.

As funções objetivo, na otimização automática, foram utilizadas de acordo com a ordem de grandeza das lâminas que se queria ajustar e com os parâmetros em otimização. Por exemplo, para o ajuste, nas microbacias desmatadas, do parâmetro FN, que influi nas lâminas baixas, utilizou-se a função $4 \left(\frac{2 \cdot (L_c - L_o)}{(L_o + L_c)} \right)^2$. Algumas funções não chegaram a ser usadas como critério para a calibragem automática e serviram de elemento de comparação entre as simulações.

O ajuste a certos eventos considerados importantes, em detrimento de outros onde problemas de medição e registro foram detectados pela equipe de coleta (Srinivasan e Galvão 1990), também norteou a avaliação do ajuste. A participação do autor durante vários anos na equipe de coleta e tratamento desses

dados facilitou esta identificação.

4.2.2.1 - Estimativa dos parâmetros

4.2.2.1.1 - Parâmetros definidos "a priori"

"A priori" foram definidos os valores de alguns dos parâmetros:

a) Coeficiente de correção da chuva A . Foi tomado igual a 1, considerando que a área é densamente instrumentada, sendo a precipitação média uma boa estimativa da precipitação real. Além disto não se verificam na região condicionantes naturais que interfiram na pluviometria.

b) Coeficiente de correção da evaporação COEF. Tomado igual a 0,75, valor usualmente utilizado no Nordeste para estimar a evapotranspiração potencial a partir da evaporação do tanque "Classe A".

c) Déficit inicial do horizonte vegetal DEFDEB. Tomado igual a DEFCD, já que no início dos anos simulados o solo encontra-se sempre seco.

d) Coeficiente de descarga do reservatório de partição XT. Ibiza (1988) sugere tomá-lo como $24/TB$, onde TB é o tempo de base da bacia, em horas. No caso de Sumé, como o tempo de base é de no máximo algumas horas, TB é igual a 1.

e) Parâmetros referentes aos reservatórios subterâneos. As dimensões do reservatório do lençol HNO, de seu nível inicial HNAPO e do reservatório recessão lenta HNO1, e coeficientes de recessão do reservatório do lençol AL e de recessão lenta

R2 foram tomados iguais a zero, e o coeficiente de alimentação do reservatório do lençol P2 igual a 1. Não se verifica escoamento de base nas microbacias de Sumé. Daí não haver sentido no uso dos dois reservatórios subterrâneos do MODIBI. Estes valores acarretam também que a rejeição à infiltração R51 também será nula.

f) Coeficiente de fuga P1. Foi considerado igual a 1, ou seja, toda a água infiltrada que não se aloca no horizonte vegetal ou não for dirigida ao escoamento rápido R5 será dada como fuga.

4.2.2.1.2 - Parâmetros otimizados

Os valores dos cinco parâmetros restantes foram calibrados para cada microbacia.

a) Coeficiente de heterogeneidade vegetal X. Não seria esperado que em Sumé seu valor ficasse fora da faixa recomendada (0,7-1,0). Nas microbacias não ocorre escoamento básico. Um valor mais baixo de X destinaria muita água à infiltração pelos caminhos preferenciais, sem passar pelo horizonte vegetal, onde ocorre a evapotranspiração, o que não seria coerente.

b) Dimensão do horizonte vegetal DEFCD. Nas microbacias desmatadas é de se esperar valores mais baixos que os citados (60-120 mm), mas nas protegidas esta faixa é uma boa referência.

c) Dimensão do reservatório de partição HD.

d) Coeficiente de escoamento rápido Q.

e) Retenção que limita o escoamento rápido FN. No caso de Sumé, sem escoamento de base, não é possível estimá-lo

como o produto de HNO por AL. Para baixas precipitações é justamente FN que impede a ocorrência de escoamento, quando for o caso. Tentou-se então uma estimativa de partida para a calibragem do seguinte modo: estabelecido X, pode-se ter uma idéia da grandeza de FN tomando as maiores chuvas que, sob condição de solo seco, não provocaram escoamento. Neste caso $FN = P.(1 - X)$. Isto se justifica considerando que para estes casos, a parte P.X da precipitação seria absorvida pela evapotranspiração e pelo horizonte vegetal, não transbordando para o reservatório de partição, que também alimenta S.

4.2.3 - CALIBRAGEM PARA AS MICROBACIAS DESMATADAS

Para a estimativa inicial do parâmetro FN, procedeu-se como indicado anteriormente. A partir da maior chuva observada que não provocou escoamento sob condição de solo seco (cerca de 16 mm, em 27/01/1983):

$$FN = P.(1 - X), \text{ ou seja,} \quad (\text{eq. 4.42})$$

FN teria um valor entre 0 e 4,8 mm, de modo a impedir este escoamento (X variando entre 1,0 e 0,7). O restante da precipitação seria absorvido pela evapotranspiração e pelo horizonte vegetal. Para seleção deste evento realizou-se uma simulação, o modelo calibrado com parâmetros aproximados, para checagem da condição de horizonte vegetal sem reservas. A menor chuva que provocou escoamento, sobre solo seco, foi de 16,7 mm, em 31/03/1982, o que sugere a pertinência da estimativa realizada.

Durante as primeiras simulações percebeu-se, com a

série completa, os efeitos das diferenças de manejo sobre o escoamento, conforme descrito no capítulo anterior. Observou-se, principalmente, que os dados compreendidos nos primeiros três meses de 1984, entre 26/03/85 e 08/05/85 e os dos anos de 1988, apresentavam sistematicamente o escoamento calculado muito abaixo do observado, confirmando as hipóteses levantadas. Realizou-se, então, uma calibragem para toda a série sem estes períodos.

Para a microbacia 4, chegou-se a três conjuntos de ajuste aproximadamente semelhantes. A variação de Q e H_0 para os três casos foi relativamente pequena. Variação maior ocorreu com DEFCO:

X	0,900	0,900	0,900
DEFCO (mm)	23,4	14,7	10,2
H_0 (mm)	44,5	49,5	52,0
Q	0,358	0,317	0,304
FN (mm)	1,4	1,4	1,4

A microbacia 3 difere da microbacia 4 por possuir topografia e rede de drenagem mais acentuadas. Isto provoca um escoamento sistematicamente maior que na microbacia 4. Como as demais condições são as mesmas, era de se esperar que os parâmetros do modelo tivessem a mesma ordem de grandeza. O primeiro conjunto estimado para a microbacia 4, com o valor do coeficiente de escoamento rápido igual a 0,580, teve um ajuste razoável para a microbacia 3.

Os valores de DEFCO e H_0 abaixo da faixa sugerida para uma cobertura de gramíneas por Ibiza (1988) foram adotados

considerando que a microbacia é desmatada.

Estes conjuntos de parâmetros serviram de estimativa inicial para a calibragem definitiva, realizada dividindo a série total nos três períodos já caracterizados, 1982/83, 1984/86, e 1987/88. O resumo dos eventos verificados nestas microbacias está mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Resumo dos eventos verificados nas microbacias desmatadas.

	1982/83	1984/86	1987/88
Microbacia 3			
Total de dias simulados	732	1061	721
Eventos com chuva ou escoamento	81	222	110
Lâmina total escoada (mm)	23,1	575,3	163,6
Lâmina média (mm)*	0,29	2,59	1,49
Microbacia 4			
Total de dias simulados	732	1061	723
Eventos com chuva ou escoamento	81	222	112
Lâmina total escoada (mm)	16,2	414,3	147,1
Lâmina média (mm)*	0,20	1,87	1,31

* - Calculada apenas com os eventos com chuva ou escoamento.

Foram utilizadas como critério principal de ajuste na calibragem do MODIBI para estas microbacias as funções objetivo 3 ($100 \cdot (1 - R^2)$) e de número 7 ($\Sigma(2 \cdot (L_c - L_o)^2 / (L_o + L_c))$). Para o período 1982/83 a função 3 foi a mais adequada, em virtude da existência de poucos eventos com escoamentos significativos. Para os outros períodos a função número 7 mostrou melhor desem-

penho. Mas, apesar desses dois tipos terem servido de base para as calibrações, a otimização das outras funções foi sempre observada nas avaliações das simulações.

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 estão apresentados os resultados obtidos nas melhores simulações para as duas microbacias.

Nas Figuras 4.4 a 4.11 estão apresentadas as comparações gráficas entre as lâminas calculadas e observadas dos eventos que apresentaram escoamento. Deve-se observar que, para melhor visualização, foram suprimidos os dias sem escoamento, ou seja, a escala horizontal dos gráficos não é cronológica.

No Anexo B estão listados todos os eventos e o balanço hídrico para cada um, como calculado pelo MODIBI.

Na microbacia 4 chegou-se, em dois períodos (1982/83 e 1984/86), a dois conjuntos que obtiveram ajuste de boa qualidade, mas com algumas diferenças nos valores dos parâmetros (Tabela 4.3). Estas variações põem em evidência a questão da dificuldade em assegurar a unicidade dos parâmetros em modelos conceituais.

4.2.4 - CALIBRAGEM PARA AS MICROBACIAS PROTEGIDAS

As séries de escoamento nas microbacias protegidas com caatinga apresentam uma grande maioria dos eventos com lâmina muito baixa, menores que 1 mm, e alguns picos verificados nas chuvas muito intensas. Ocorreram também problemas de medição em alguns eventos de importância em ambas as microbacias. O interes-

Tabela 4.2. Resultados da calibragem para a microbacia 3 (desmatada).

Parâmetro	Período		
	1982/83	1984/86	1987/88
X	0,943	0,950	0,900
DEFCO (mm)	34,5	20,0	8,0
H0 (mm)	43,7	30,0	44,3
Q	0,099	0,430	0,644
FN (mm)	0,3	2,0	0,4
FO-1	11,0	201,4	54,2
FO-2	35,5	1440,4	200,6
FO-3 (R ²)	82,95	92,43	89,00
FO-4	81,8	135,6	65,2
FO-5	-4,3	-14,8	-14,3
FO-6	0,20	0,07	0,10
FO-7	15,3	172,4	42,1
FO-8	0,76	1,46	1,27
Balanço hídrico - mm, (%)			
Precipitação	555,2 (100,00)	3129,2 (100,00)	1138,3 (100,00)
ECT	18,8 (3,38)	875,7 (27,98)	352,6 (30,98)
EC	8,2 (1,47)	396,0 (12,65)	4,0 (0,35)
RS	10,6 (1,91)	479,7 (15,33)	348,6 (30,63)
ER	426,1 (76,75)	1428,4 (45,65)	560,2 (49,21)
FUGA	110,3 (19,87)	825,1 (26,37)	225,5 (19,81)

Tabela 4.3. Resultados da calibragem para a microbacia 4 (desmatada).

Parâmetro	Período				
	1982/83		1984/86		1987/88
X	0,866	0,892	0,900	0,921	0,900
DEFCO (mm)	87,5	44,4	35,0	9,6	11,0
HO (mm)	20,0	41,9	37,0	31,0	41,4
Q	0,369	0,115	0,340	0,215	0,600
FN (mm)	2,2	0,5	2,0	2,2	0,5
FO-1	5,0	7,8	187,1	182,6	62,9
FO-2	11,1	16,2	1499,3	1330,1	276,1
FO-3 (R²)	90,45	86,09	88,13	89,47	78,32
FO-4	53,4	84,8	161,4	142,8	73,4
FO-5	-1,7	-0,6	-33,4	-11,6	-12,2
FO-6	0,10	0,16	0,13	0,10	0,17
FO-7	5,57	10,53	175,2	163,4	57,6
FO-8	0,47	0,72	1,66	1,62	1,76
Balanço hídrico - mm, (%)					
Precipitação	554,0 (100,00)		3135,3 (100,00)		1143,0 (100,00)
ECT	14,5 (2,62)	15,6 (2,82)	631,9 (20,16)	667,7 (21,30)	298,2 (26,09)
EC	0,0 (0,00)	4,2 (0,76)	251,7 (8,03)	386,8 (12,34)	4,4 (0,39)
RS	14,5 (2,62)	11,4 (2,06)	380,2 (12,13)	280,9 (8,96)	293,8 (25,70)
ER	459,8 (82,99)	426,1 (76,91)	1542,4 (49,19)	1207,8 (38,52)	611,1 (53,46)
FUGA	79,7 (14,39)	112,3 (20,27)	961,0 (30,65)	1259,8 (40,18)	233,7 (20,45)

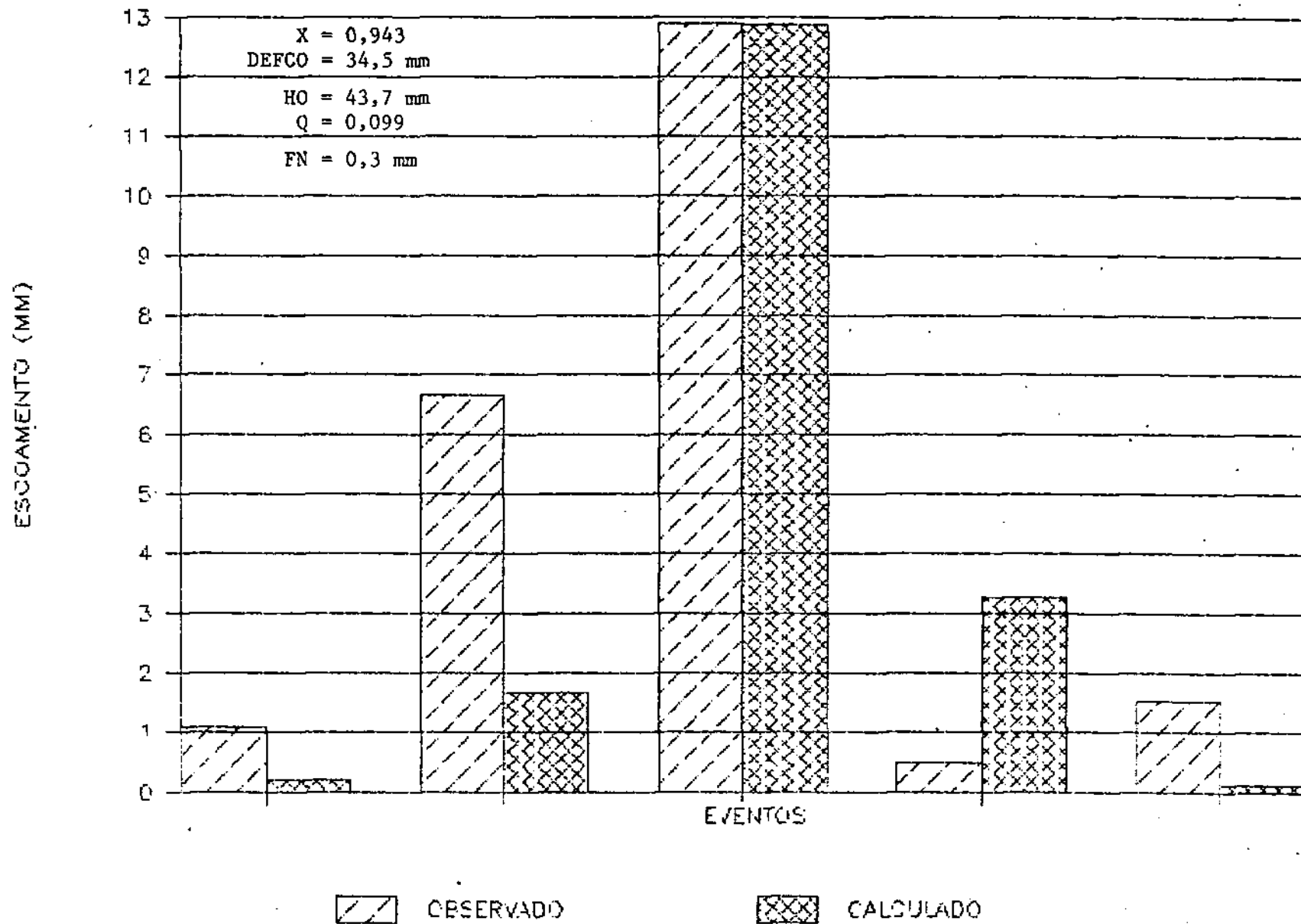


Figura 4.4. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 3 no período 1982-1983.

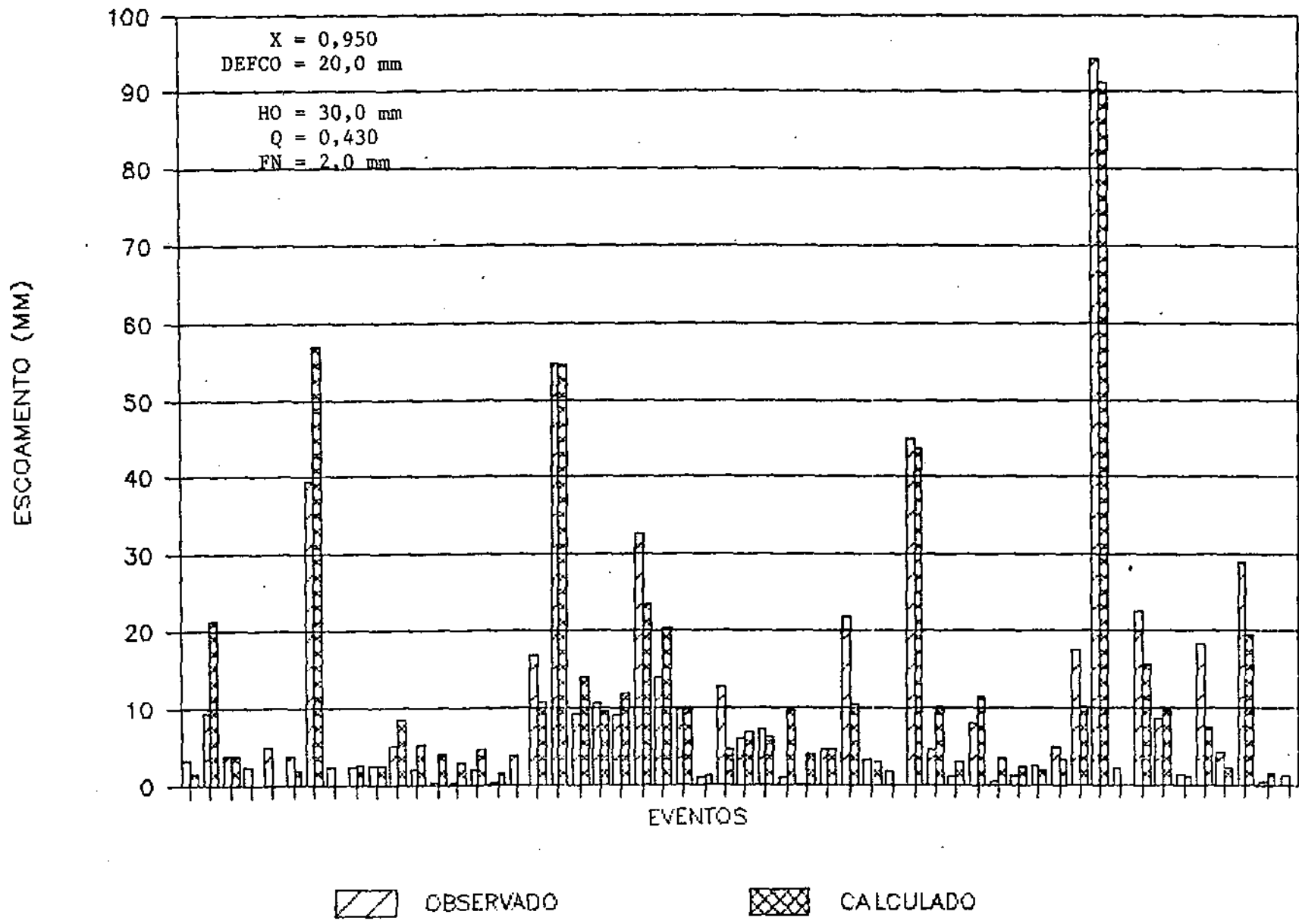


Figura 4.5. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 3 no período 1984-1986.

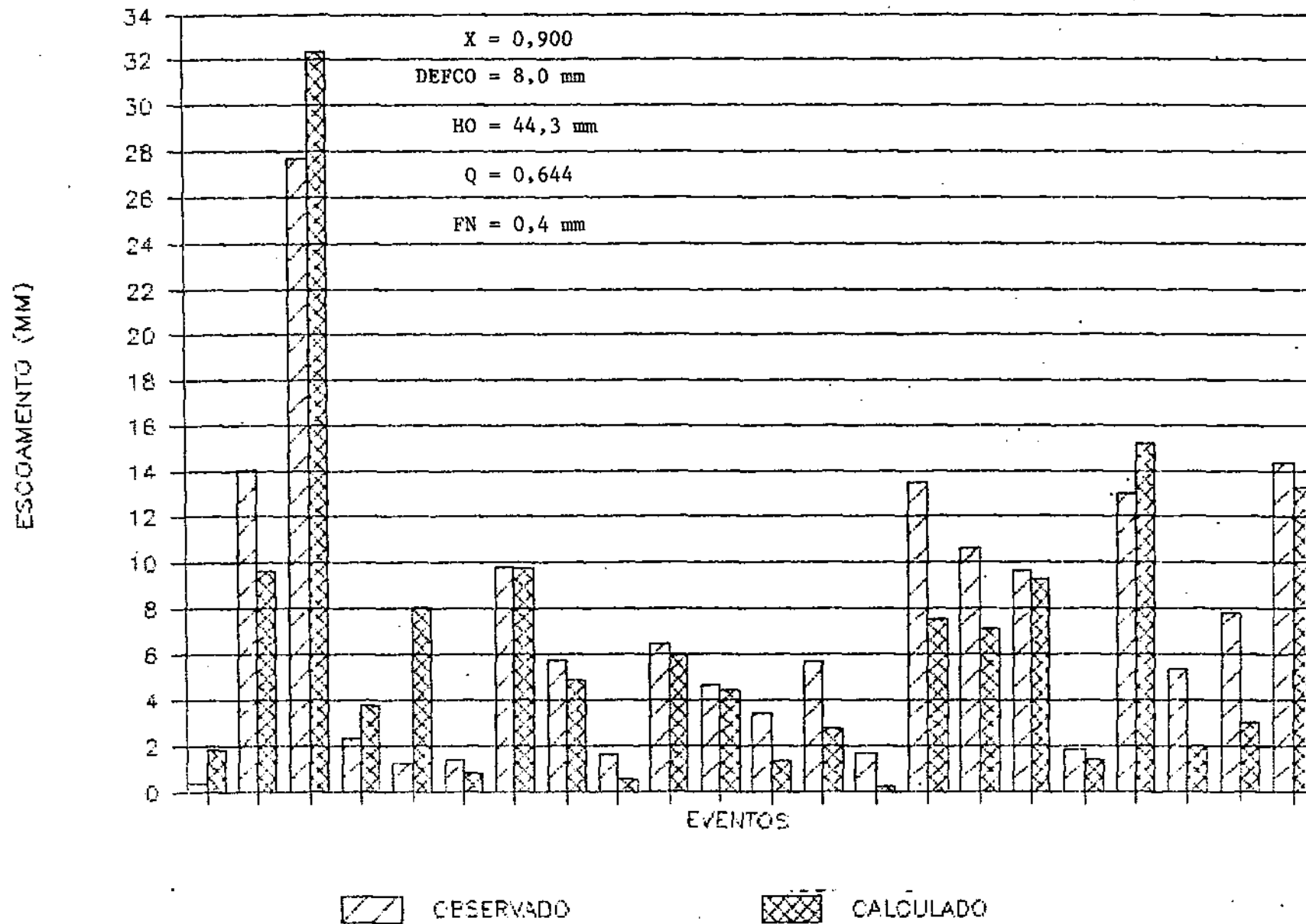


Figura 4.6. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 3 no período 1987-1988.

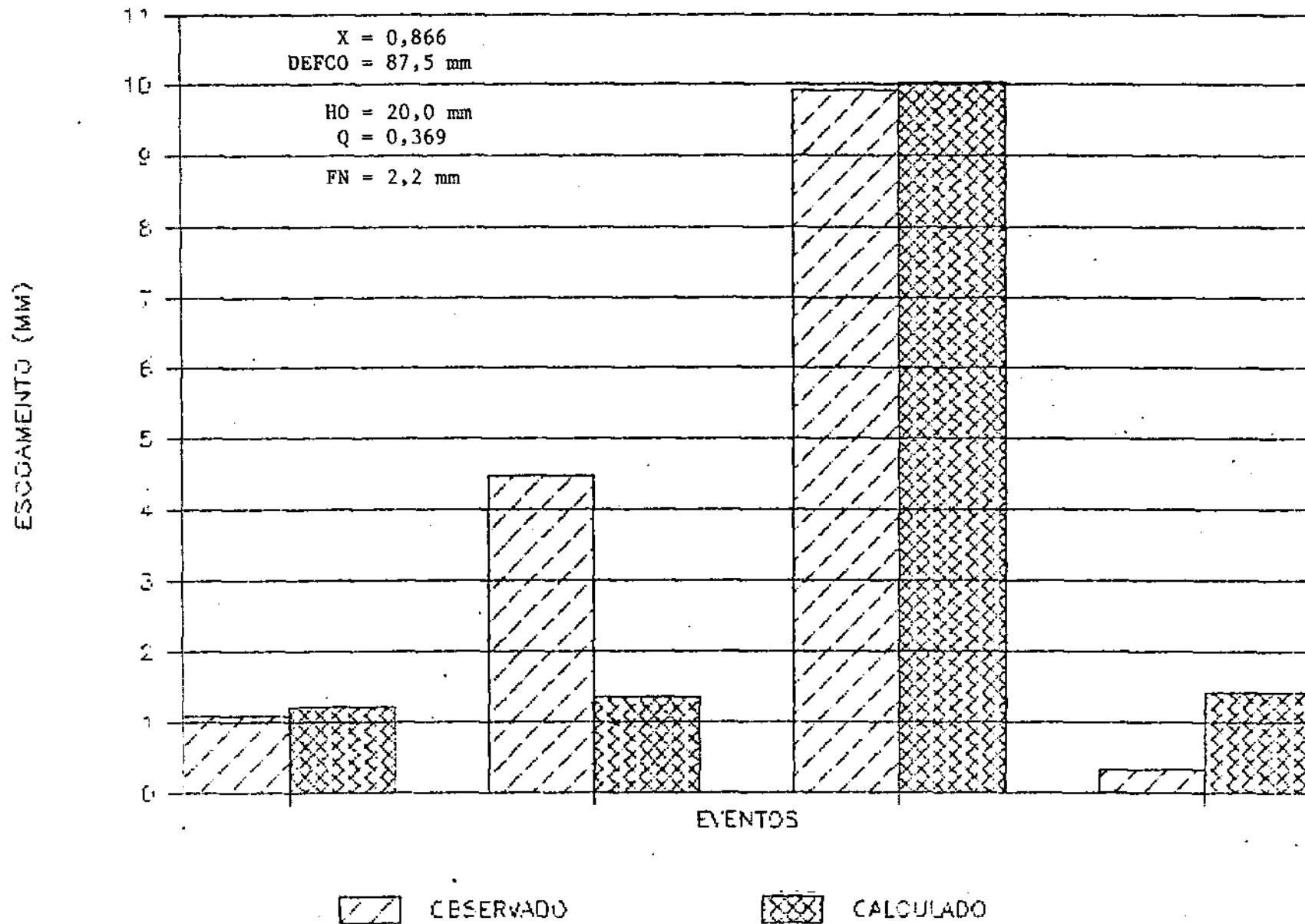


Figura 4.7. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 4 no período 1982-1983 (a).

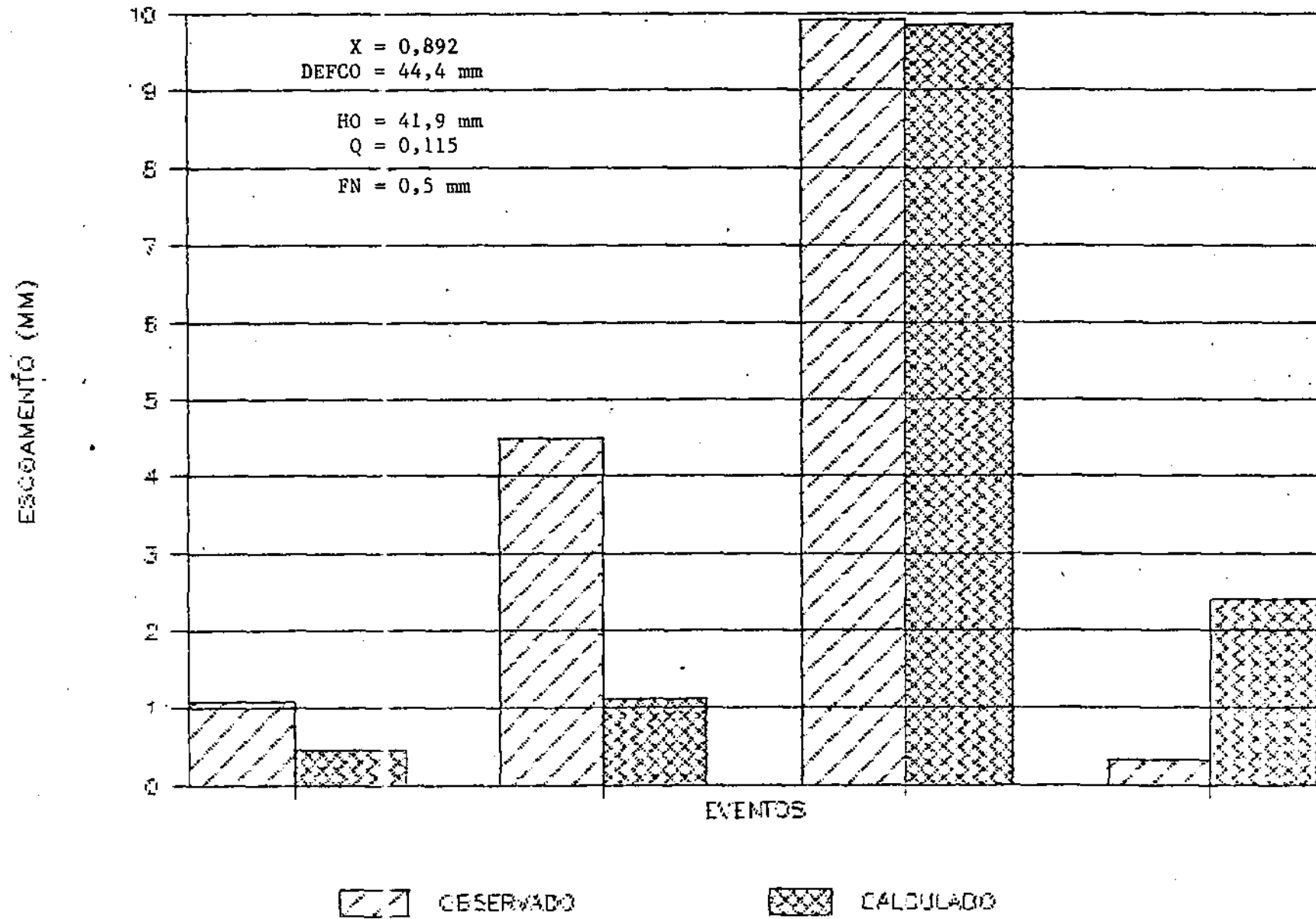


Figura 4.8. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 4 no período 1982-1983 (b).

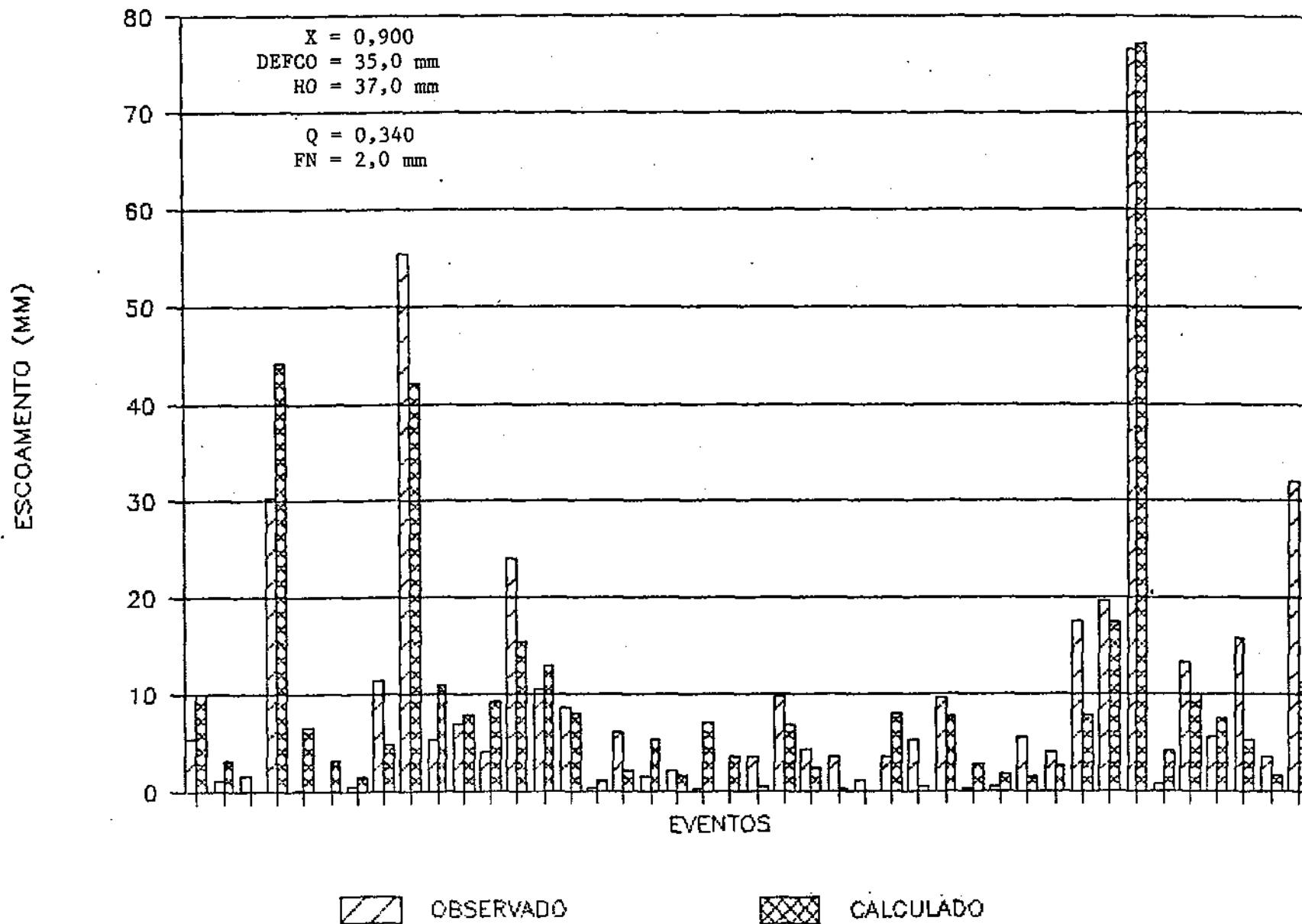


Figura 4.9. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 4 no período 1984-1986 (a).

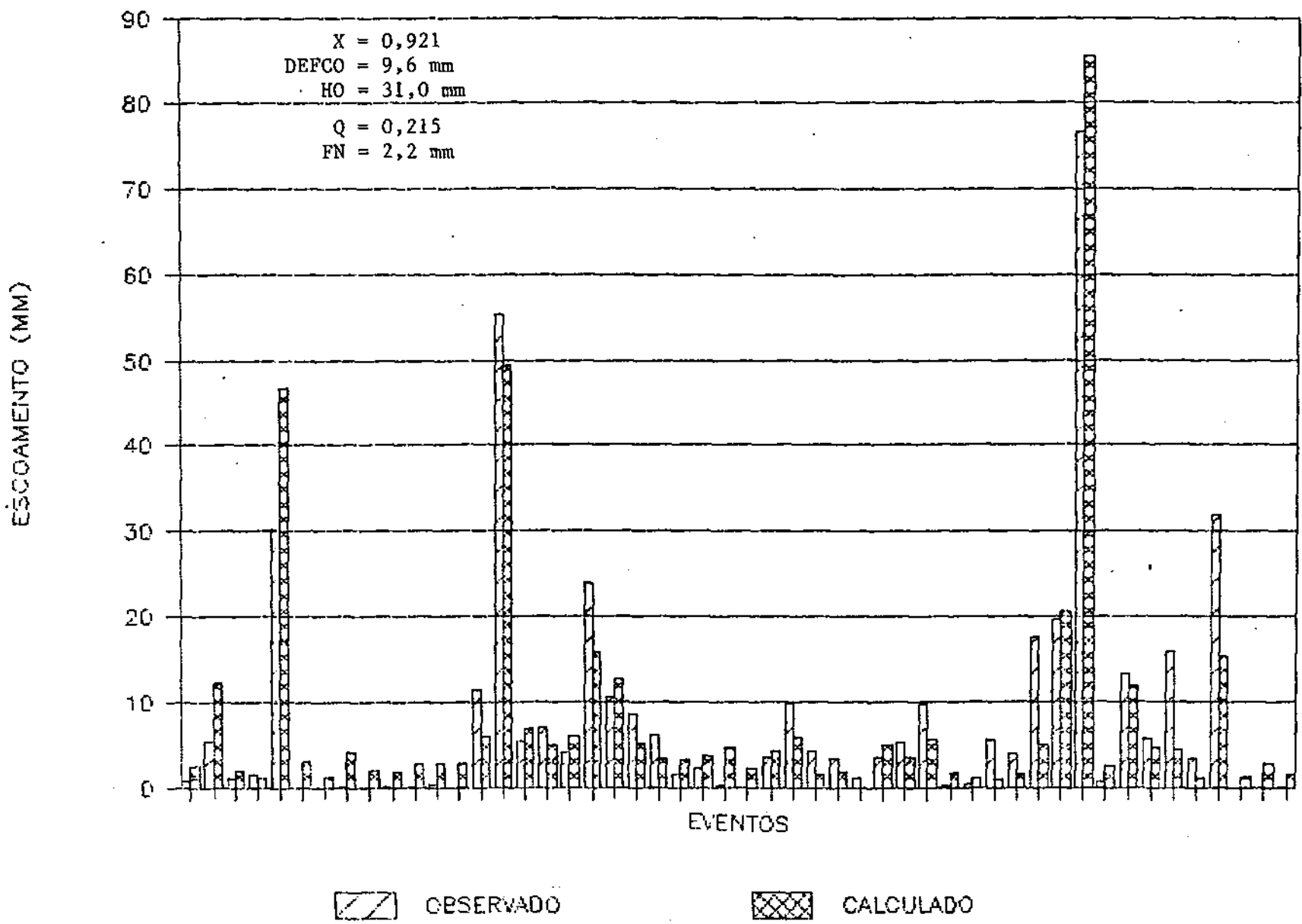


Figura 4.10. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 4 no período 1984-1986 (b).

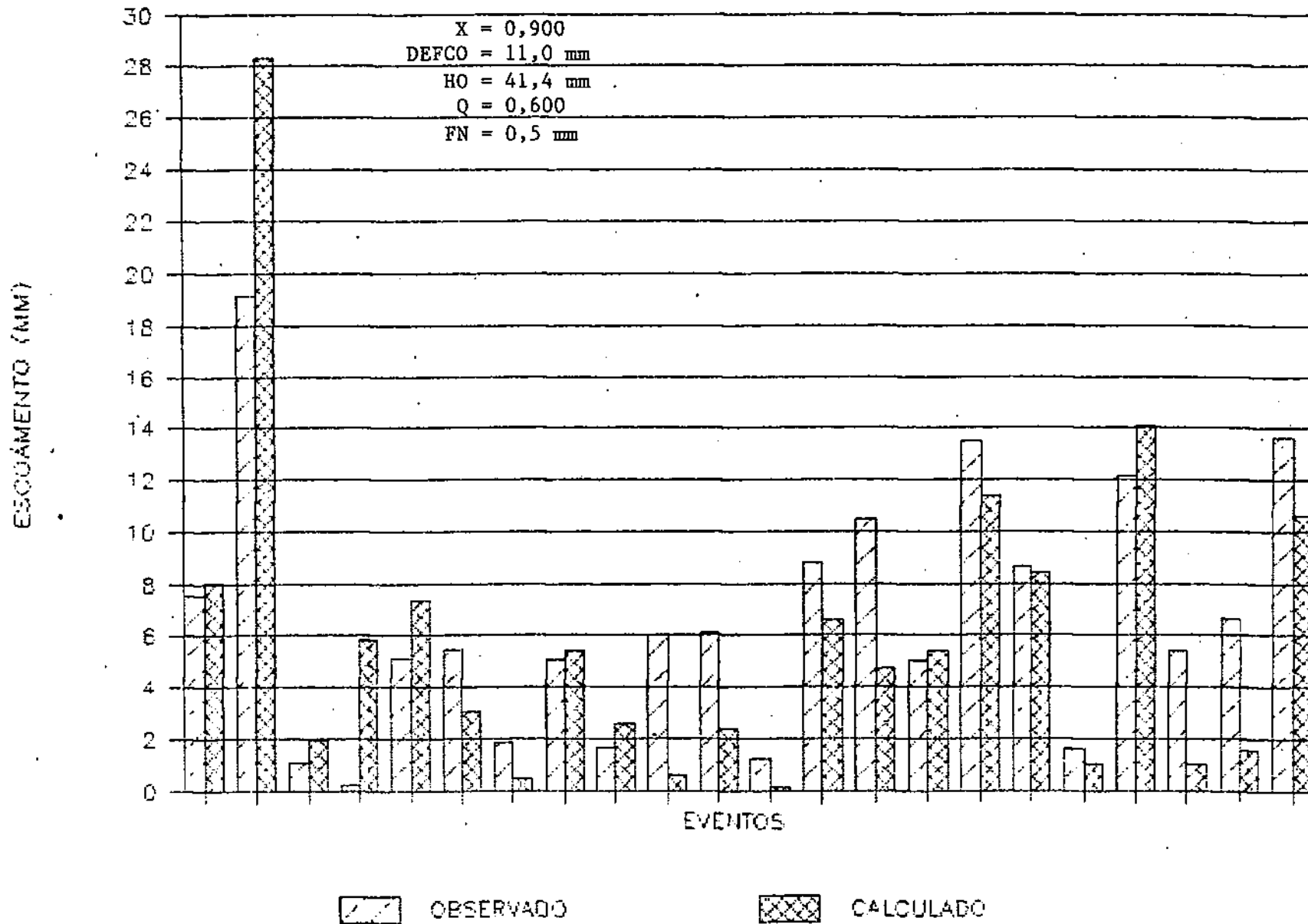


Figura 4.11. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 4 no período 1987-1988.

se em ajustar um modelo a estas microbacias volta-se então aos poucos eventos significativos. O resumo dos eventos verificados nestas microbacias está na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Resumo dos eventos verificados nas microbacias protegidas com vegetação natural

	MICROBACIA 1	MICROBACIA 2
Total de dias simulados	2558	2550
Eventos com chuva ou escoamento	457	449
Lâmina total escoada (mm)	58,9	140,2
Lâmina média (mm)*	0,13	0,31

* - Calculada apenas com os eventos com chuva ou escoamento.

Para uma estimativa inicial de FN, à semelhança da feita para as microbacias desmatadas, buscando a maior precipitação que não provocou escoamento sobre solo seco, encontrou-se, nas duas microbacias, o valor de 28,2 mm, para o dia 25/01/1985, o que dá uma variação de FN até 8,5 mm. Mas a menor precipitação observada que provocou escoamento foi em 07/02/1984, de 18,8 mm. Estes dois valores não apresentam uma coerência como ocorreu nas desmatadas.

Nas tentativas iniciais de calibragem automática na microbacia 1, mantendo DEFCO e HO em faixas bastante amplas e usando a função objetivo 4 ($\sum(2 \cdot (Lc - Lo) / (Lo + Lc))^2$) como critério de ajuste (pensando nas lâminas mais baixas), a liberação os cinco parâmetros conduziu a valores de X entre 0,7 e 0,9, DEFCO e HO em torno 300 a 400 mm ou em cerca de 100 mm, Q por volta de 0,1 quando FN ficou entre 4 e 5 mm ou em cerca de 0,4.

quando FN foi mantido em torno de 20 mm. A calibragem sempre tendia a levar o escoamento calculado para zero na grande maioria dos eventos com lâmina observada muito baixa, evidenciando a dificuldade de um bom ajuste a eventos dessa magnitude, normalmente sensíveis a qualquer variação momentânea das condições fisiográficas da bacia. Mas também não se estava conduzindo a um bom ajuste das lâminas altas.

A otimização manual, porém, foi mais eficiente e atingiu-se um melhor resultado. A análise do comportamento dos reservatórios horizonte vegetal e de partição foi muito importante para estimar os parâmetros de maneira mais consistente.

A escolha da função objetivo também mereceu atenção. Com o fracasso da número 4, ficou evidente que no ajuste teriam que ser enfatizados os valores mais altos. Decidiu-se então tentar a de número 1 ($\sum |L_c - L_o|$). Mas os melhores ajustes foram obtidos com a função 3 ($100 \cdot (1 - R^2)$).

Na Tabela 4.5 estão apresentados os resultados obtidos nas melhores simulações para as duas microbacias usando as funções objetivos número 1 (colunas 1 e 4) e número 3 (colunas 2, 6 e 7) como critério de ajuste.

Nas Figuras 4.12 a 4.14 estão apresentadas as comparações gráficas entre as lâminas calculadas e observadas dos eventos que apresentaram escoamento, para os conjuntos de parâmetros das colunas 2, 6 e 7 da Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Resultados da calibragem para as microbacias protegidas.

	MICROBACIA 1			MICROBACIA 2			
	FO-1	FO-3		FO-1		FO-3	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
X	0,900	0,902	0,925	0,900	0,900	0,850	0,910
DEFCO (mm)	78,4	66,4	66,5	97,7	298,0	105,1	110,0
HO (mm)	52,0	80,3	76,5	25,0	25,0	76,5	71,5
Q	0,101	0,100	0,058	0,234	0,596	0,479	0,360
FN (mm)	15,0	20,0	4,5	10,0	10,0	18,2	14,0
FO-1	66,4	26,7	50,5	128,8	81,0	62,2	66,5
FO-2	825,4	78,0	115,6	1806,1	720,5	499,8	515,0
FO-3 (R ²)	-0,34	90,52	85,95	53,91	81,62	87,25	86,86
FO-4	228,0	231,3	258,0	210,6	220,0	214,5	203,6
FO-5	41,0	-2,9	24,1	81,2	-3,9	-9,0	-0,5
FO-6	0,28	0,10	0,12	0,20	0,20	0,14	0,15
FO-7	69,1	34,3	70,5	124,8	133,7	74,7	76,5
FO-8	2,31	0,93	1,76	2,06	1,29	0,99	1,06

Balanco hídrico - mm, (%)							
Precipitação	4881,4 (100,00)			4881,4 (100,00)			
ECT	200,4 (4,11)	129,4 (2,65)	162,5 (3,33)	433,7 (8,88)	335,7 (6,88)	282,7 (5,79)	288,8 (5,92)
EC	147,8 (3,03)	80,4 (1,65)	95,0 (1,95)	323,7 (6,63)	195,5 (4,01)	71,3 (1,46)	99,5 (2,04)
RS	52,6 (1,08)	49,0 (1,00)	67,5 (1,38)	110,0 (2,25)	140,2 (2,87)	211,4 (4,33)	189,3 (3,88)
ER	3157,4 (64,68)	3085,9 (63,22)	3126,8 (64,06)	3264,0 (66,87)	3784,3 (77,52)	3193,7 (65,43)	3337,0 (68,36)
FUGA	1523,6 (31,21)	1666,1 (34,13)	1592,1 (32,61)	1183,7 (24,25)	761,4 (15,60)	1405,0 (28,78)	1255,6 (25,72)

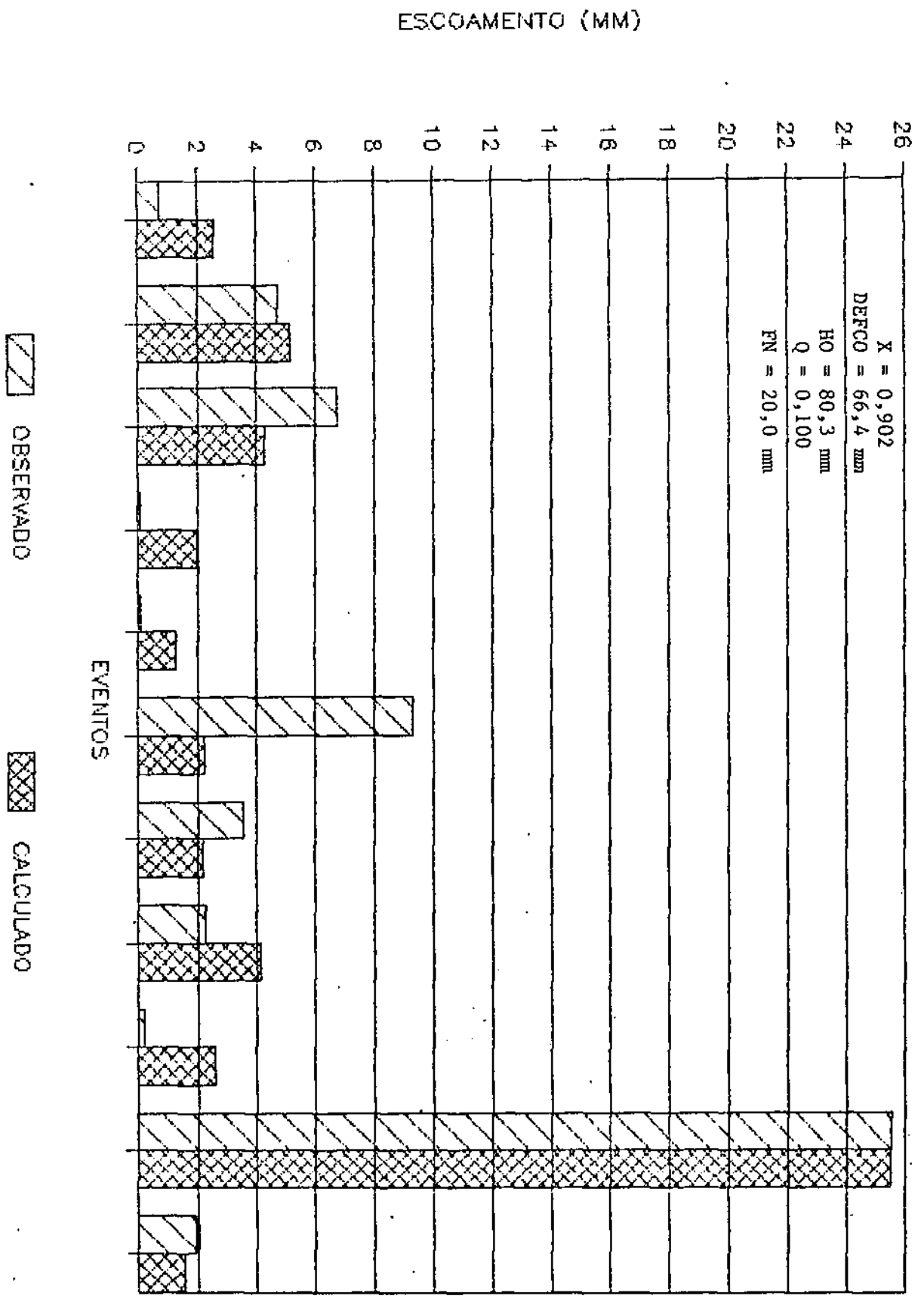


Figura 4.12. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 1 no período 1982-1988.

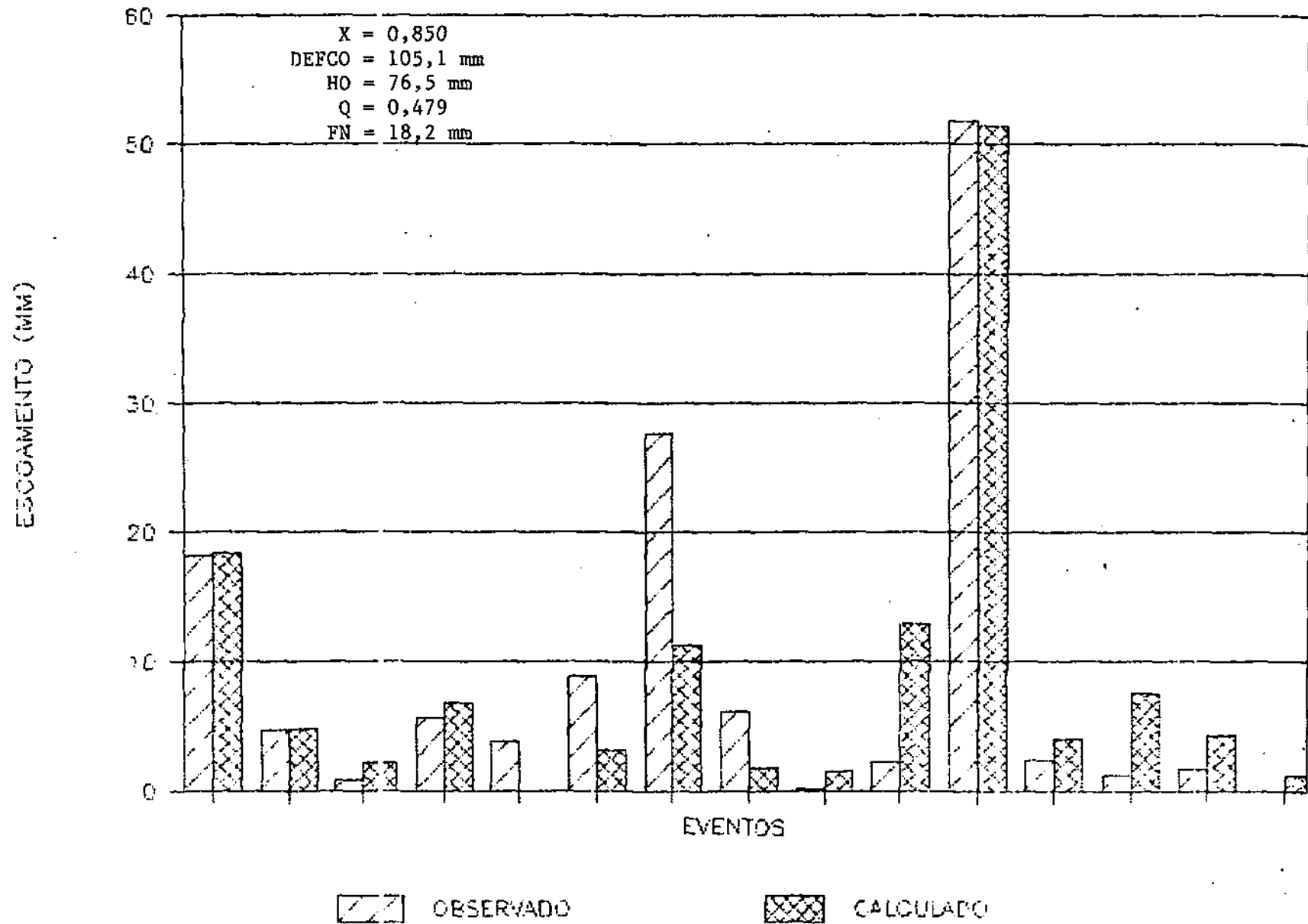


Figura 4.13. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacia 2 no período 1982-1988 (a).

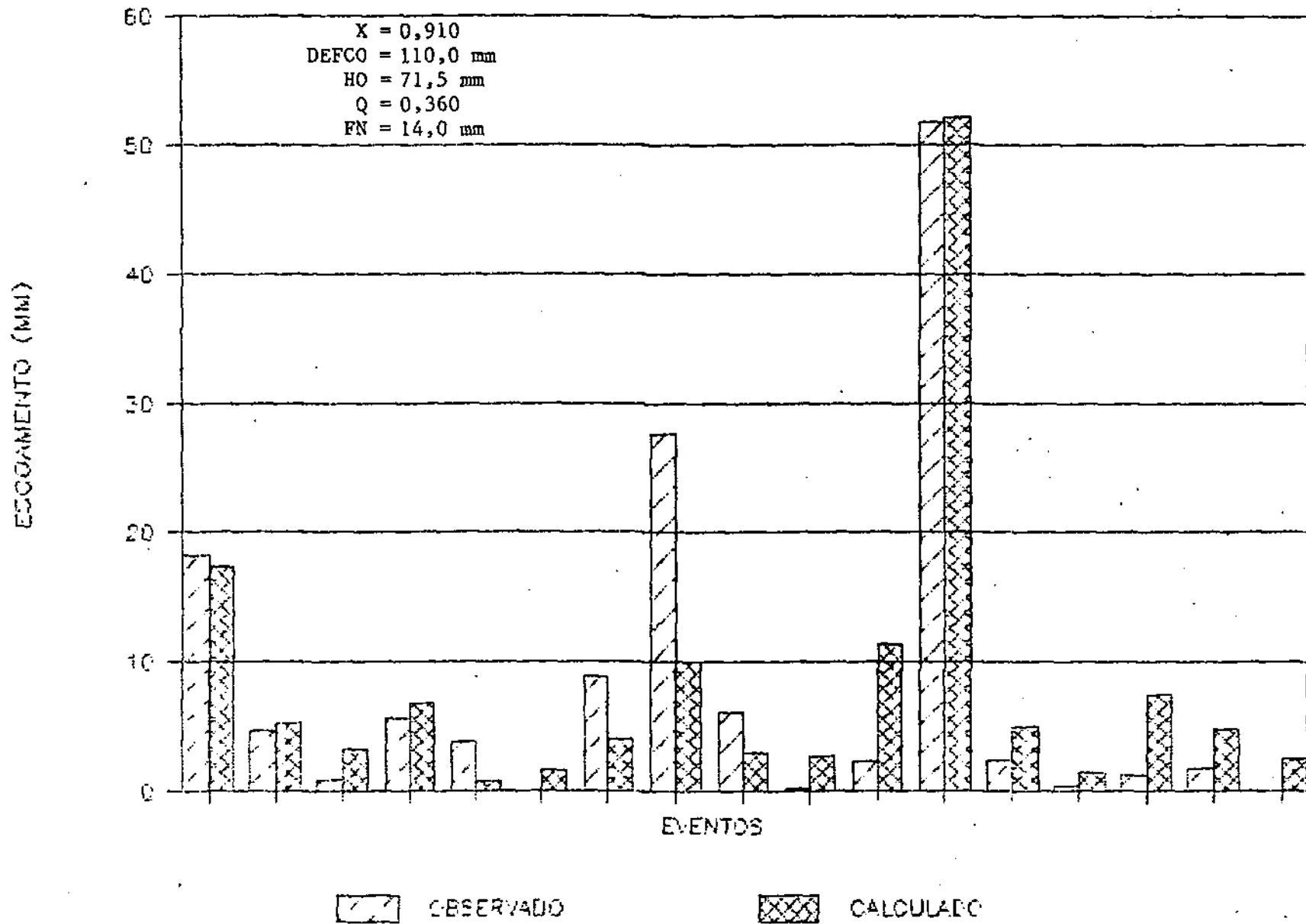


Figura 4.14. Comparação entre as lâminas observadas e calculadas pelo MODIBI nos principais eventos da microbacta 2 no período 1982-1988 (b).

No Anexo B estão listados todos os eventos e o balanço hídrico para cada um, como calculado pelo MODIBI.

Na microbacia 2 chegou-se, com a função objetivo número 3, a dois conjuntos que obtiveram ajustes semelhantes, mas com diferenças nos valores dos parâmetros (Tabela 4.5 colunas 6 e 7).

Uma análise dos gráficos revela que, mesmo com coeficientes de determinação altos, o ajuste às lâminas baixas continua apenas razoável. As diferenças encontradas para os parâmetros que os descrevem confirmam isto. O pequeno número de eventos válidos pode ser uma das causas da dificuldade que se teve em calibrar o MODIBI para estas microbacias.

Realizou-se ainda dois testes sobre alternativas "de exclusão" sugeridas inicialmente. Para a microbacia 2 tentou-se manter DEFCO na faixa dos 300 mm, a partir das primeiras tentativas de otimização. Neste caso, o escoamento seria praticamente controlado por Q , através da água de infiltração não utilizada no horizonte vegetal. Os resultados foram inferiores aos outros (Tabela 4.5 coluna 5). Na microbacia 1 tentou-se verificar o comportamento do modelo mantendo-se o valor de FN na faixa indicada na estimativa inicial (entre 1,5 e 4,5 mm). Os resultados (Tabela 4.5 coluna 3) também foram apenas razoáveis.

4.2.5 - VERIFICAÇÃO DA CALIBRAGEM

Normalmente define-se um período para calibragem do modelo, a partir do qual os parâmetros são estimados, e outro

período de verificação, ou validação, do ajuste, onde o comportamento do modelo com os parâmetros estimados no período anterior é avaliado. No caso de Sumé, as séries são muito pequenas, não sendo possível dividi-las em duas. Mas têm-se, sob condições fisiográficas semelhantes, duas microbacias para cada tipo de cobertura vegetal. Testou-se os conjuntos calibrados para cada microbacia na outra análoga, como forma de verificação da calibragem. Este procedimento tem a vantagem de considerar áreas semelhantes, como um primeiro teste de extrapolação de resultados, objetivo final de todos os estudos sobre bacias representativas e experimentais. Sabe-se de antemão que as microbacias semelhantes têm respostas sensivelmente diferentes. Num nível de regionalização, porém, essas diferenças não seriam ressaltadas e as duas microbacias seriam classificadas num mesmo grupo.

As simulações mostraram que:

a) Para as microbacias protegidas com caatinga:

I. A aplicação na microbacia 2 dos parâmetros ótimos da microbacia 1 geraram uma série com um coeficiente de determinação de aproximadamente 58% em relação à série observada, e com tendência geral de subestimar as lâminas calculadas.

II. A série gerada na microbacia 1 com os parâmetros ótimos da microbacia 2 não apresentou correlação.

b) Para as microbacias desmatadas:

I. A aplicação na microbacia 3 dos parâmetros ótimos da microbacia 4 subestimou as lâminas, mas os coeficientes de determinação obtidos foram razoáveis: 81,5%, 90,1% e 86,0%, para os períodos de 1982/83, 1984/86 e 1987/88, respectivamente.

II. Quando os parâmetros ótimos da microbacia 3 foram aplicados na microbacia 4, as lâminas foram superestimadas, mas os coeficientes de determinação também foram satisfatórios: 78,1%, 82,5% e 71,2%, respectivamente para os três períodos simulados (1982/83, 1984/86 e 1987/88).

4.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.3.1 - O PROCESSO DE CALIBRAGEM

Finalmente, os seguintes pontos podem ser enfatizados sobre o processo de calibragem do MODIBI para as microbacias de Sumé:

a) A questão do critério de ajuste. O uso do coeficiente de determinação (função número 3) como função objetivo quase sempre trouxe também a melhoria de todos os outros critérios, em se tratando das microbacias protegidas e dos períodos com poucos eventos nas microbacias desmatadas. A função número 7 ($\sum(2 \cdot (L_c - L_o)^2 / (L_o + L_c))$) mostrou-se mais adequada para os períodos com lâminas de várias magnitudes.

b) Os parâmetros DEFCD e Q são os que mais têm influência na geração do escoamento e são também os mais sensíveis. HD controla o ajuste dos maiores eventos, que têm parcela significativa de sua formação proveniente de EC. FN é pouco sensível e depende do valor de Q, indo controlar as lâminas mais baixas. O fator de repartição de chuva X tem pouca influência no escoamento gerado, mas seu valor influi na magnitude dos outros. Mudanças no seu valor provocaram reajustamento dos outros parâme-

tros, mas as novas séries geradas não sofreram alterações significativas.

c) O algoritmo de otimização tendeu, algumas vezes, a "simplificar" o modelo, quando usando a função 3 para as microbacias desmatadas. Ao tentar ajustar os maiores picos (que têm grande influência no valor desta função) fazia crescer H_0 e diminuía o horizonte vegetal DEFCD. Este, nos períodos chuvosos permanecia quase sempre cheio, deixando de influir no processo e fazendo com que a geração do escoamento dependesse apenas de X e Q . Deve-se cuidar na estimativa do valor de H_0 , pois valores muito altos, como os obtidos em algumas simulações (chegando até 400 mm), deixam de influir no valor dos critérios de ajuste e podem mascarar seu significado conceitual. Isto ocorre porque, a partir de certa dimensão do reservatório de partição, a ocorrência de EC torna-se impossível e todo o transbordamento do horizonte vegetal é transferido sempre para S , independente do valor de H_0 .

d) Foi muito útil como estratégia de calibragem realizar tentativas iniciais, manualmente ou por otimização, procurando "sentir" o comportamento do modelo e definindo um conjunto inicial de parâmetros que oferecesse um ajuste razoável e se apresentasse coerente conceitualmente. A otimização alternando os seguintes passos facilitou o processo de calibragem:

- I - Otimização simultânea de DEFCD, H_0 e Q ;
- II - Otimização simultânea de DEFCD e Q ;
- III - Otimização simultânea de DEFCD e H_0 ;

IV - Otimização simultânea de Q e FN;

V - Otimização simultânea dos cinco parâmetros, com faixas de variação estreitas, como ajuste fino;

VI - Otimização separada de cada um dos cinco parâmetros, como ajuste fino.

4.3.2 - ADEQUAÇÃO DO MODELO AO SISTEMA FÍSICO

A comparação das conclusões do estudo de Molinier et alii (1988 e 1989a, b) sobre os mecanismos que controlam o balanço hídrico na Bacia Experimental de Sumé, a partir dos resultados sob chuvas simuladas e naturais, com os resultados obtidos com o MODIBI, permite uma quantificação mais refinada do balanço hídrico.

Considerou-se na modelagem, os solos como o dominante na região, o Bruno não cálcico vértico. Todas as considerações aqui apresentadas são relativas a este tipo de solo.

Sob chuva simulada, os experimentos realizados levaram à conclusão que o horizonte superior denominado "A" não se comporta apenas como simples reservatório que se enche, porém suas relações com os horizontes adjacentes, aos quais transmite seus fluxos, são igualmente determinantes. As transferências verticais de A para a camada inferior B seriam lentas. Sob chuva suficiente, ocorreria a saturação de A, se prolongando até após a chuva e criando condições de drenagem lateral. Como a escala diária é bem maior que a duração das chuvas, esses processos de transferência lenta para B e de drenagem se dariam num mesmo

intervalo de computação no MODIB1, representados pelo esvaziamento do reservatório de partição e sendo computados como a fuga ou como o escoamento RS, particionados pelo coeficiente de escoamento rápido Q.

O horizonte A possui uma espessura de cerca de 20 cm, é poroso e permeável. Este horizonte tem uma baixa capacidade de estocagem d'água, mas é o condutor do sistema. Para as microbacias desmatadas, isto se traduz no valor alto do parâmetro X e baixo valor de DEFCO, ou seja, a transferência para os horizontes inferiores e a drenagem subsuperficial ocorre principalmente através do horizonte A, representado pelos reservatórios HO e DEFCO (a transferência seria representada pela descarga de HO, pois o parâmetro XT é igual a 1), e numa menor parcela através dos caminhos preferenciais, representados pela quantidade 1-X. Os estudos de campo mostram as vias de circulação preferenciais como fendas, raízes, pedras ou mesmo manchas de solos bruno molais ou litólicos. Mas as dimensões de DEFCO nestas microbacias apresentaram-se bem menores que nas microbacias protegidas. Esta grande diferença parece confirmar a hipótese levantada por Molinier et alii (1989a, b) de que a infiltração no solo nu é regida por sua película superficial, que se constitui num obstáculo para a percolação, enquanto que no solo protegido é definida pela capacidade de infiltração do perfil.

Na mesma linha de raciocínio, o parâmetro X seria esperado sensivelmente menor nas protegidas que nas desmatadas, já que as raízes constituem um caminho preferencial para a infiltração. Não se verificou tal tendência. Isto parece confirmar o

papel do horizonte vegetal como grande controlador do escoamento, principalmente nas microbacias protegidas.

O horizonte B é compacto e pouco permeável, mas retém, quando molhado, importantes quantidades de água. No modelo, considerável fração da água infiltrada é transferida para a "fuga". Parte dessa água de fuga seria a infiltração para o horizonte B, que a acumula. Outra parte representaria fugas para áreas abaixo do ponto de medição, onde realmente constata-se afloramentos, drenadas pelo horizonte A ou pelo horizonte C, localizado abaixo da camada B. Casos de "curto-circuito" A-C foram observados, formando-se dois lençóis: um no topo de B e o outro na base do solo, dentro do C. A última parte da fuga, a menor, seria a drenagem vertical na base do solo, localizada e praticamente desprezível. Caso as microbacias fossem estanques, como as relatadas por Ibiza (1985), a maior parte da fuga calculada - a fuga pelo lençol subterrâneo - seria muito pequena, e a verificação do balanço hídrico seria facilitada.

O modelo só computa a evapotranspiração ao nível do reservatório horizonte vegetal. No caso de Sumé, o horizonte B pouco permeável acumula muita água que lentamente será evapotranspirada. Este termo da evapotranspiração, que não aparece no balanço hídrico fornecido pelo MODIBI, existe e está incluído no total de fugas. Ibiza (1988) admite esta inclusão na concepção do modelo.

No caso das pequenas chuvas de baixa intensidade que não geram escoamento, o parâmetro X dirige a maior parte da

água precipitada para o horizonte vegetal, que não chega a transbordar e evapora no mesmo dia ou nos dias seguintes. A parte dirigida para S, representa a parte infiltrada mais profundamente pelos caminhos preferenciais. Ela é totalmente retida (por FN) e dirigida para a fuga.

Estas hipóteses são coerentes com o modelo de simulação vertical proposto por Molinier et alii (1989b).

Os reservatórios superficiais são importantes conceitualmente, principalmente na separação dos vários componentes do balanço hídrico calculado. Pode-se comprovar isto através dos resultados das microbacias 2 e 4, quando foram encontrados diferentes conjuntos de parâmetros "ótimos". A principal distinção conceitual entre eles é a dimensão dos reservatórios horizontal vegetal e de partição. Isto têm influência direta nos termos do balanço hídrico. A partir dos dados medidos disponíveis ainda é prematuro assegurar a precisão e confiabilidade da determinação destes termos, mas certamente eles se mostram coerentes com as hipóteses já levantadas sobre o comportamento hidrológico da bacia. A obtenção vários conjuntos "ótimos" de parâmetros na calibragem de modelos conceituais têm sido fonte de preocupação para os pesquisadores da área (Wheater et alii 1986), principalmente quando a intenção é a extrapolação de resultados.

Na validação da calibragem, os resultados para as microbacias com cobertura vegetal não foram satisfatórios. No caso das desmatadas, o ajuste foi bom, notando-se, como esperado, que os parâmetros calibrados na microbacia 3 superestimaram o

escoamento quando aplicados para a microbacia 4, e vice-versa.

Estes resultados mostram a coerência das informações hidrológicas e do modelo matemático utilizado. Ao mesmo tempo apontam na direção do aprimoramento das ferramentas de modelagem, para aprofundar o entendimento dos sistemas hidrológicos dessa região, dentro do objetivo de utilização operacional dos resultados dos estudos das bacias representativas e experimentais.

5 - O MODELO WESP

5.1 - GENERALIDADES

O modelo WESP foi desenvolvido e apresentado por Lopes (1987). Tem o propósito geral de ser usado em pesquisa de erosão em pequenas bacias, com duas propostas específicas: entender e simular o sistema erosão/deposição e ser um instrumento de comparação para avaliação de modelos simplificados desenvolvidos para aplicação prática. O WESP pode ser usado para geração de dados sintéticos, para preenchimento de falhas e para previsão da resposta das bacias a vários tipos de práticas de manejo.

O modelo foi testado em microbacias experimentais operadas pelo U.S. Department of Agriculture, em Tucson, Arizona, EUA, com resultados satisfatórios.

5.2 - CONCEPÇÃO E FORMULAÇÃO DO WESP

O modelo é baseado nos processos de infiltração, na hidráulica do escoamento superficial e na mecânica dos processos de erosão e deposição. São estes os três componentes princi-

país do modelo.

A bacia é representada através de uma geometria simplificada de planos de escoamento e de canais. Os planos são delineados baseados na edafologia, vegetação e topografia; seus contornos são linhas de fluxo ou curvas de nível. Os canais são considerados prismáticos (trapezoidais, triangulares ou retangulares), possuem propriedades hidráulicas uniformes em cada trecho e consideram entrada de água por escoamento lateral das superfícies ou como entrada pontual de outros canais. Cada elemento é caracterizado por um conjunto de parâmetros e é identificado por um número de acordo com sua sequência no cálculo computacional.

5.2.1 - DADOS E PARAMETROS DE ENTRADA

A entrada de dados 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:

I. Geometria:

área superficial,
elevações e
rugosidade superficial n_p .

II. Rede de drenagem:

declividades,
seções transversais de escoamento e
coeficiente de rugosidade hidráulica n_c .

III. Solos:

condutividade hidráulica saturada K_s , e

parâmetro da equação de infiltração N_s .

b) Parâmetros de erosão/deposição:

I. Erodibilidade do solo:

por impacto da chuva K_i , e

por arrastamento pelo fluxo K_r e a .

II. Características dos sedimentos:

tamanho característico d_s , e

peso específico γ_s .

III. Parâmetros para tensão crítica:

de arrastamento δ , e

de deposição e_p e e_c .

c) Características da precipitação:

I. Histograma.

II. Distribuição espacial na bacia.

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

5.2.2 - A INFILTRAÇÃO

O WESP considera como perdas da precipitação apenas a infiltração, sendo o restante considerado como excesso de precipitação.

O componente de infiltração no modelo calcula o excesso de precipitação usando a equação de Green-Ampt (Mein e

Larson 1973), com cálculo do tempo de empoçamento para chuva não permanente desenvolvido por Chu (1978).

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

$$f(t) = K_s \cdot (1 + N_s/F(t)) \quad (\text{eq. 5.1})$$

onde,

$f(t)$ é a taxa de infiltração (m/s),

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

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

t é o tempo (s), e

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

O potencial de capilaridade N_s pode ser calculado como:

$$N_s = (1 - S_e) \cdot p \cdot S \quad (\text{eq. 5.2})$$

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, e

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

A equação de Green-Ampt assume que existe uma frente de molhamento distinta e precisamente definível; que a sucção ou o potencial nesta frente permanece constante indepen-

dente de tempo ou posição; que o perfil de solo é homogêneo; e que 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 (Lopes 1987). 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.

Chu (1978) modificou a equação de Green-Ampt para descrever a infiltração durante uma chuva não permanente.

O tempo de empoçamento é aquele quando passa a ocorrer excesso de precipitação, ou seja, quando a intensidade de precipitação iguala a taxa de infiltração. No WESP é calculado o tempo de empoçamento como proposto por Chu (1978):

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

(eq. 5.3)

onde,

t_p é o tempo de empoçamento (h),

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

P é a chuva 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.

5.2.3 - O 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 modelagem deste componente foi baseada principalmente nos trabalhos de Woolhiser e Liggett (1967), Smith e Woolhiser (1971) e Rovey et alii (1977). As equações da continuidade e quantidade de movimento utilizadas para o fluxo superficial sobre os planos são:

$$\partial h / \partial t + \partial (u \cdot h) / \partial x = r \quad (\text{eq. 5.4})$$

$$\partial u / \partial t + u \cdot \partial u / \partial x + g \cdot \partial h / \partial x = g \cdot (S_0 - S_f) - r \cdot u / h \quad (\text{eq. 5.5})$$

onde,

t é o tempo (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.

A equação da quantidade de movimento tal como apresentada considera que a pressão adicional causada pela precipitação sobre o fluxo é desprezível, que o componente da velocidade da chuva na direção x é nulo, que o seno do ângulo formado pelo plano e a horizontal é aproximadamente igual a sua declividade, e que o coeficiente de distribuição de velocidade é igual a um. A modelagem unidimensional do fluxo superficial é uma significativa simplificação (Lopes 1987).

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:

$$\partial A / \partial t + \partial (u.A) / \partial x = q_A \quad (\text{eq. 5.6})$$

$$\partial u / \partial t + u . \partial u / \partial x + g . \partial h / \partial x = g . (S_0 - S_f) - q_A . u / A \quad (\text{eq. 5.7})$$

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 a 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. Noutras palavras, os termos da gravidade e atrito são considerados preponderantes em relação aos outros na equação da quantidade de movimento (Lopes 1987).

Para os planos, considerando para a velocidade a equação paramétrica $u = \alpha \cdot h^{m-1}$ (Lopes 1987), tem-se a seguinte equação, derivada da equação da continuidade:

$$\partial h / \partial t + \alpha \cdot m \cdot h^{m-1} \cdot \partial h / \partial x = r \quad (\text{eq. 5.8})$$

onde,

α é um parâmetro relacionado à rugosidade superficial, e

m é um parâmetro relacionado à geometria, e

as outras variáveis são as mesmas já descritas.

As condições iniciais e de fronteira são as seguintes:

$$h(0, t) = 0, \text{ para } t \geq 0, \text{ e} \quad (\text{eq. 5.9})$$

$$h(x, 0) = 0, \text{ para } x \geq 0. \quad (\text{eq. 5.10})$$

Para os fluxos concentrados, a aproximação da onda cinemática dá a seguinte equação para a continuidade:

$$\partial Q / \partial t + dQ / dA \cdot \partial A / \partial x = q_A \quad (\text{eq. 5.11})$$

onde,

$Q(x, t)$ é a vazão do fluxo, e

e as outras variáveis são as mesmas já descritas, e está sujeita às seguintes condições iniciais e de fronteira:

$$Q(0,t) = Q_0(t), \text{ para } t \geq 0, \text{ e} \quad (\text{eq. 5.12})$$

$$Q(x,0) = 0, \text{ para } x \geq 0. \quad (\text{eq. 5.13})$$

onde,

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

A equação da quantidade de movimento (eq. 5.7) pode ser escrita como (Lopes 1987):

$$Q = \alpha \cdot A^m / WP^{m-1} \quad (\text{eq. 5.14})$$

onde,

WP é o perímetro molhado (m), e

as outras variáveis são as mesmas já descritas.

As equações são resolvidas utilizando um esquema de diferenças finitas não linear de segunda ordem, inicialmente proposto por Rovey et alii (1977). A expansão da série de Taylor é usada na linearização das equações, baseada num esquema implícito de diferenças finitas a quatro pontos (Lopes 1987). O critério de estabilidade utilizado é o seguinte:

$$\Delta t < \Delta x / (\alpha \cdot m \cdot h^{m-1}), \quad (\text{eq. 5.15})$$

onde,

Δt e Δx são os incrementos no tempo e espaço utilizados no esquema, e

as outras variáveis são as mesmas já descritas.

5.2.4 - O COMPONENTE EROSAO-DEPOSIÇÃO

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, e considerando as perdas pela deposição.

A equação de continuidade considerada é:

$$\partial(c.h)/\partial t + \partial(c.q)/\partial x = \theta \quad (\text{eq. 5.16})$$

onde,

$q(x,t)$ é a vazão do fluxo (m^3/s),

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

$\theta(x,t)$ é a taxa de sedimento saindo para o fluxo ($kg/m^2/s$), e

as outras variáveis são as mesmas já descritas.

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 pelo impacto da chuva (e_r) e pelo arras-

tamento pelo fluxo (e_R), e a deposição (d), vão dar a taxa de sedimentos indo para o fluxo:

$$\theta = e_R + e_I - d \quad (\text{eq. 5.17})$$

onde todos os termos variam no tempo e no espaço e são expressas em $\text{kg/m}^2/\text{s}$.

O termo e_R é considerado proporcional à tensão de cisalhamento média na superfície do solo:

$$e_R = K_R \cdot \tau^{1.5} \quad (\text{eq. 5.18})$$

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).

O termo e_I é dado por:

$$e_I = K_I \cdot i \cdot r \quad (\text{eq. 5.19})$$

onde,

K_I é um coeficiente de erodibilidade do solo por impacto da chuva (kg.s/m^2), $i(t)$ é a intensidade da chuva (m/s), e $r(x,t)$ é o excesso de precipitação (m/s),

O termo de deposição é expresso por:

$$d = e_p \cdot V_s \cdot C \quad (\text{eq. 5.20})$$

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/m³).

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

$$V_s = F_o \cdot \left(\frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma} \cdot g \cdot d_s \right)^{1/2} \quad (\text{eq. 5.21})$$

$$F_o = \left(\frac{2}{3} + \frac{36 \cdot \nu^2}{g \cdot d_s^3 \cdot (\gamma_s / \gamma - 1)} \right)^{1/2} - \left(\frac{36 \cdot \nu^2}{g \cdot d_s^3 \cdot (\gamma_s / \gamma - 1)} \right)^{1/2} \quad (\text{eq. 5.22})$$

onde,

γ_s é o peso específico do sedimento (N/m³),

γ é o peso específico da água (N/m³),

ν é a viscosidade cinemática da água (m²/s),

d_s é o tamanho representativo do sedimento (m), e

g é a aceleração da gravidade (m/s²).

As condições iniciais e de fronteira são as seguintes:

$$C(0, t) = K_r \cdot i(t) \cdot r(t) / (\epsilon_p \cdot V_s + r(t)), \text{ para } t \geq t_p, \quad (\text{eq. 5.23})$$

$$C(x, t_p) = K_r \cdot i(t_p) \cdot r(t_p) / (\epsilon_p \cdot V_s + r(t_p)), \text{ se } x \geq 0 \quad (\text{eq. 5.24})$$

onde t_p é o tempo de empoçamento (s).

Para os fluxos concentrados nos canais, o modelo não distingue 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 de continuidade, considerando um fluxo unidimensional, é:

$$\partial(A.C)/\partial t + \partial(C.Q)/\partial x = e_R - d + q_s \quad (\text{eq. 5.25})$$

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:

$$C(0,t) = C_0(t), \text{ para } t \geq 0, \text{ e} \quad (\text{eq. 5.26})$$

$$C(x,0) = 0, \text{ para } x \geq 0, \quad (\text{eq. 5.27})$$

onde $C_0(t)$ 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 (termo e_R) pelo fluxo concentrado é usada a seguinte equação:

$$e_R = a.(\tau - \tau_c)^{1.5}, \text{ para } \tau \geq \tau_c, \text{ e} \quad (\text{eq. 5.28})$$

$$e_R = 0, \text{ para } \tau < \tau_c, \quad (\text{eq. 5.29})$$

onde,

$$\tau = \gamma.R_H.Sf, \quad (\text{eq. 5.30})$$

$$\tau_c = \delta.(\gamma_s - \gamma).d_s, \quad (\text{eq. 5.31})$$

R_H é o raio hidráulico (m),

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

$\tau(x,t)$ 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),

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

e as outras variáveis são as mesmas já descritas.

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

$$d = E_c.TW.V_s.C \quad (\text{eq. 5.32})$$

onde,

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

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

as outras variáveis são as mesmas já descritas.

5.3 - CALIBRAGEM DO MODELO

Lopes (1987) descreveu o procedimento adotado no teste do modelo, durante o seu desenvolvimento. Foram realizados

estudos sob chuva simulada e em pequenas bacias.

5.3.1 - ESTUDOS SOB CHUVA SIMULADA

Foram utilizados dados obtidos com simulações sobre três tipos de parcelas:

- a) com vegetação natural (natural);
- b) com vegetação removida (clipped);
- c) com vegetação totalmente removida e superfície nua (bare).

As chuvas simuladas, aplicadas com intensidade constante, foram as seguintes:

- a) seca (dry run) - inicial, de 60 min de duração,
- b) úmida (wet run) - depois de 24 horas, com 30 min de duração,
- c) muito úmida (very wet run) - depois de 30 min, com 30 min de duração.

Os parâmetros de infiltração adotados foram os seguintes:

a) K_s , condutividade hidráulica saturada, foi estimada dos dados da simulação muito úmida como a taxa final de infiltração;

b) N_s , potencial de capilaridade, foi estimado por otimização usando os dados da simulação seca, tentando ajustar o volume medido ao calculado pela equação, já utilizando o valor de K_s estimado antes;

c) S_r , a sucção média da frente de molhamento, foi estimada pela equação 5.2 - $N_s = (1 - S_e).p.S$ - usando os dados de umidade do solo, onde S_e é a saturação efetiva relativa e p é a porosidade efetiva;

d) A simulação úmida foi utilizada para verificar as estimativas de K_r e S_r , comparando a precipitação efetiva calculada e o escoamento medido.

O parâmetro α , de resistência ao fluxo superficial, foi otimizado para ajustar o hidrograma medido. O coeficiente de Manning foi calculado por $n = (S_o/\alpha)^{1/2}$, sendo S_o a declividade do plano de escoamento.

Os parâmetros de erosão foram assim definidos:

a) ϵ , parâmetro de deposição, foi adotado da literatura como 0.5 para o fluxo superficial e 1.0 para os canais.

b) K_R , erodibilidade para o fluxo superficial, e K_I , erodibilidade para o impacto da chuva, foram otimizados por tentativas para ajustar a produção total de sedimentos. Lopes ressalta que não há dados adequados disponíveis na literatura sobre a estimativa destes parâmetros.

5.3.2 - ESTUDOS EM PEQUENAS BACIAS

Foram consideradas duas bacias nos estudos, cobertas com vegetação natural:

a) bacia número 105, com 2344,7 m², e

b) bacia número 103, com 34792,2 m².

Foram adotados parâmetros globais de infiltração com o mesmo valor para todos os elementos:

a) K_s foi estimado em 2,0 mm/h.

b) N_s foi otimizado por tentativas para cada evento individual, procurando ajustar o volume calculado ao escoado.

Para o fluxo superficial foram utilizados parâmetros globais de resistência, sendo diferentes para os planos e os canais:

a) n para os planos foi adotado como 0,06, considerando o fluxo como turbulento.

b) n para os canais foi adotado como 0,03.

Os parâmetros de erosão foram adotados ou avaliados pelos seguintes critérios:

a) Para K_r e K_R, foram utilizados os valores obtidos para as parcelas sob cobertura natural.

b) α , o fator da erosão em canais, foi otimizado por tentativas até ajustar a produção total de sedimento observada para cada evento ao valor calculado.

c) δ , coeficiente para a tensão de cisalhamento crítica, assumido como 0,047 para todos os eventos, com base na literatura.

d) O tamanho característico dos sedimentos, foi estimado em 0,120 mm, através de inspeção de campo.

5.4 - APLICAÇÃO DO MODELO AS MICROBACIAS DE SUMÉ

5.4.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para aplicação inicial do modelo WESP à Bacia Experimental de Sumé escolheu-se uma das microbacias desmatadas. Esta escolha foi realizada devido ao maior número de eventos observados com a erosão e o manejo consistente da superfície da bacia. Muitos dos parâmetros foram estimados através de indicações na literatura, como se verá a seguir. Considera-se este estudo um primeiro teste deste modelo para as condições do Nordeste semi-árido.

O programa está escrito na linguagem Fortran 77 e foi inicialmente executado num microcomputador IBM PC/AT compatível. Como o tempo de processamento foi muito longo, o programa foi implementado numa estação de trabalho Sony News-1700, baseada no microprocessador Motorola 68030, quando então o tempo de processamento foi muito reduzido.

5.4.2 - DADOS UTILIZADOS

Foi escolhida a microbacia 4 para a aplicação do WESP. Sua descrição encontra-se na Tabela 3.1.

Como alguns parâmetros precisavam ser definidos através dos dados para parcelas de 100 m², selecionou-se a parcela 4 para isto, pois esta apresenta o mesmo tipo de solo, uma declividade em torno da média para a microbacia e possui o mesmo manejo da vegetação.

Os dados de precipitação foram obtidos do pluviômetro 49, situado nas imediações das áreas estudadas.

Decidiu-se estudar apenas o período de 1987 a 1988. Foram os anos nos quais a vegetação manteve-se em todos os eventos completamente controlada, mantendo o solo permanentemente nu. Selecionou-se os eventos que não apresentaram nenhum tipo de problema de medição.

5.4.3 - DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DA MICROBACIA

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

A discretização da microbacia 4 num conjunto de planos e canais foi feita a partir do seu levantamento topográfico (Figura 3.6). Procurou-se preservar principalmente a área total dos elementos representados e os comprimentos das linhas de fluxo.

Este trabalho foi realizado em condições não adequadas, já que o levantamento topográfico disponível não apresentava um nível de detalhes grande. Com a ajuda de recursos de computação gráfica realizou-se interpolação das curvas de nível existentes (Figura 5.1) e produziu-se uma vista tridimensional da microbacia (Figura 5.2). Isto, associado com inspeções no campo, facilitou a identificação dos planos e canais. Definiu-se um total de 17 planos e 4 canais. A Figura 5.1 mostra um delineamen-

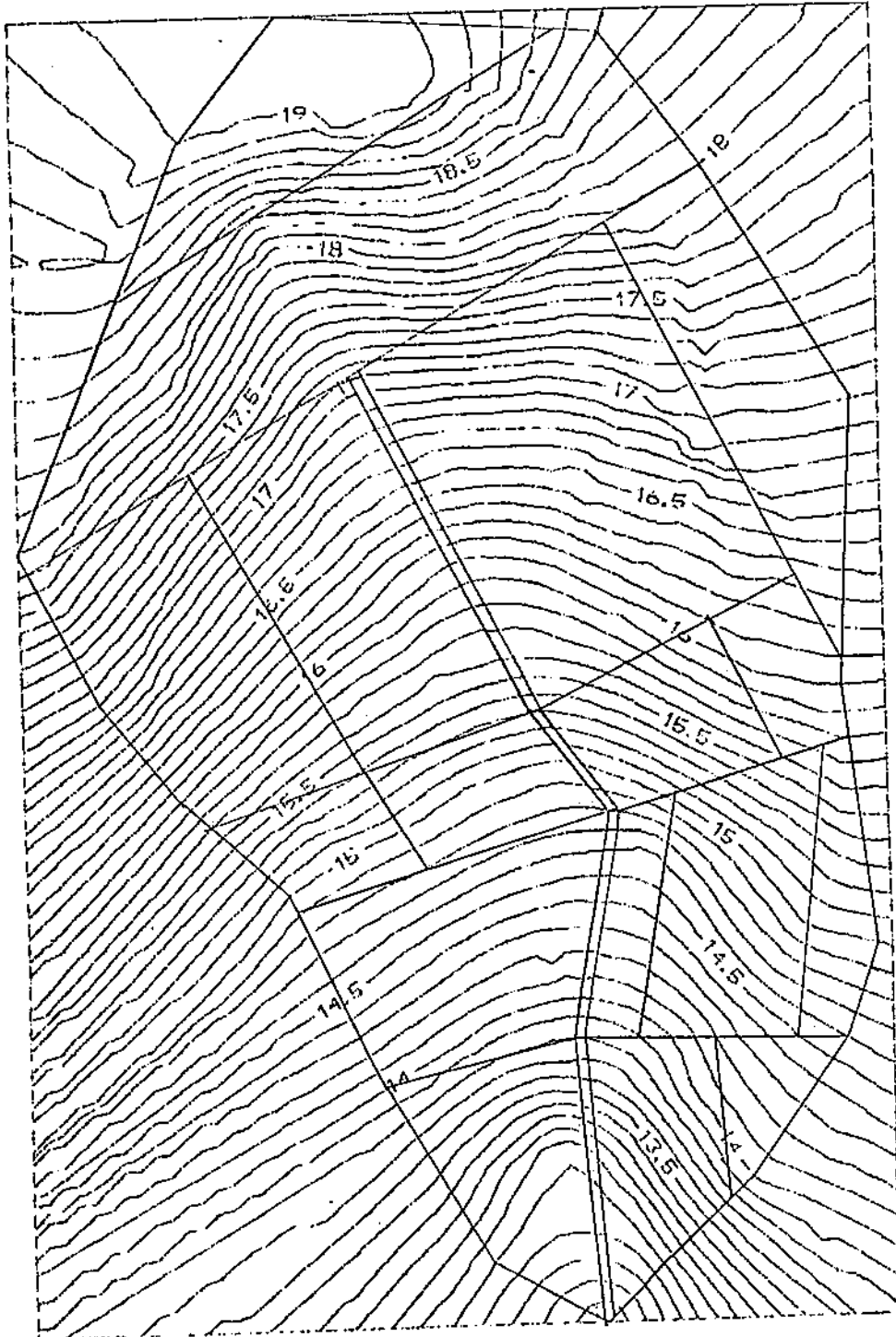


Figura 5.1 Delineamento geométrico da microbacia 4 sobre o levantamento topográfico.

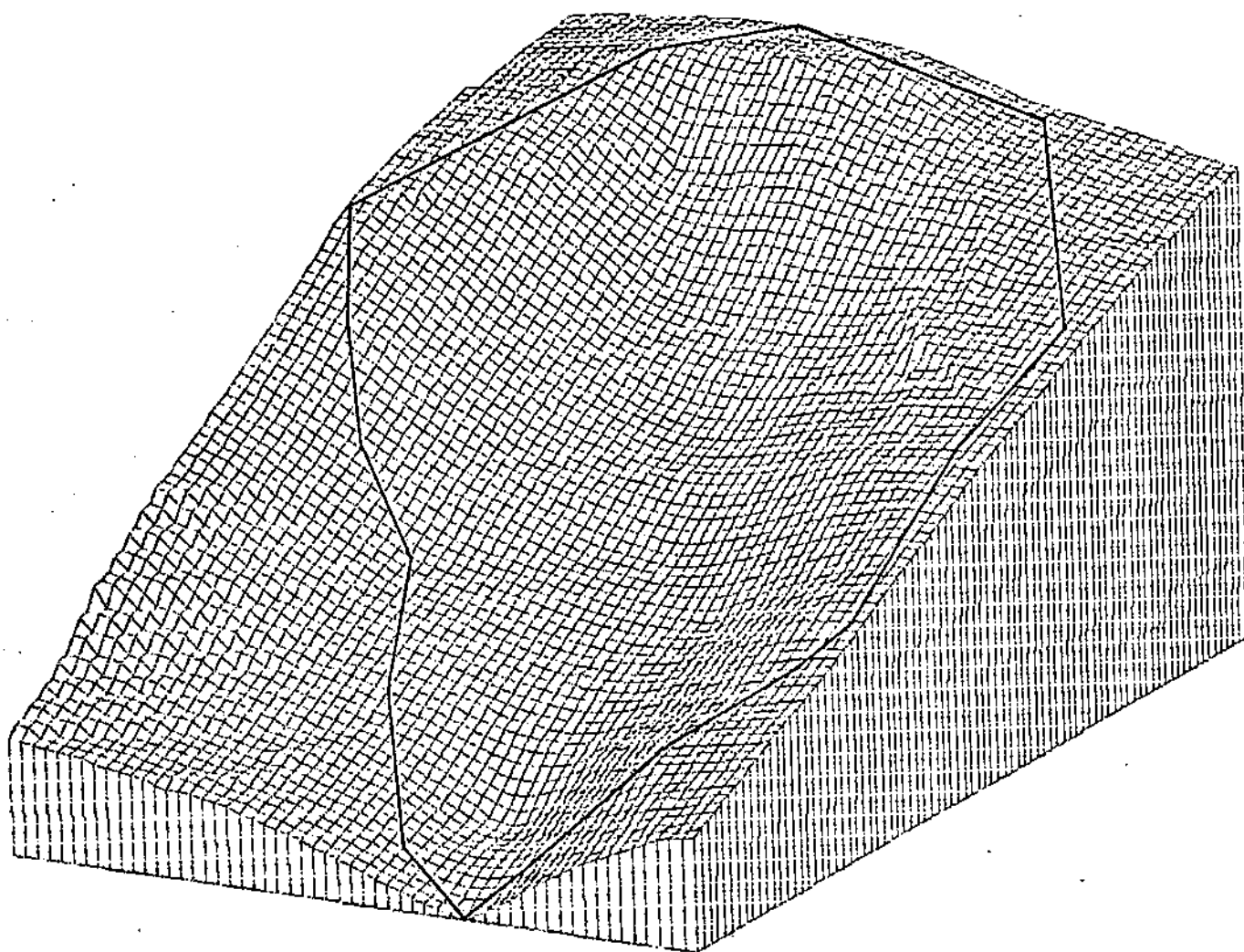


Figura 5.2 Visualização tridimensional da microbacia 4

to aproximado desses elementos sobre o mapa topográfico. A Figura 5.3 é uma representação esquemática da microbacia, e encontra-se na Tabela 5.1 todos esses elementos caracterizados para entrada no WESP. A Tabela 5.2 apresenta a sequência numérica para o procedimento de cálculo computacional dos elementos.

5.5 - ESTIMATIVA DOS PARAMETROS

Na calibragem do WESP para a microbacia 4 da Bacia Experimental de Sumé, foi estimada ou determinada a maior parte dos parâmetros "a priori", e mantidos fixos para todos os eventos. Apenas quatro parâmetros foram calibrados por tentativas evento a evento. Para a determinação de alguns parâmetros para o fluxo e erosão superficial sobre planos utilizou-se a parcela (de 100 m²) número 4. Todos os parâmetros foram aplicados como globais, ou seja, com o mesmo valor para todos os planos ou para todos os canais.

5.5.1 - PARAMETROS DEFINIDOS "A PRIORI"

Foram estabelecidos primeiro os valores de alguns parâmetros ou características conforme o que se segue:

a) Tamanho característico dos sedimentos (ds)

Simons e Şentörk (1977) afirmam que a escolha do tamanho dos sedimentos representativo da mistura é arbitrária e que 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 usado o

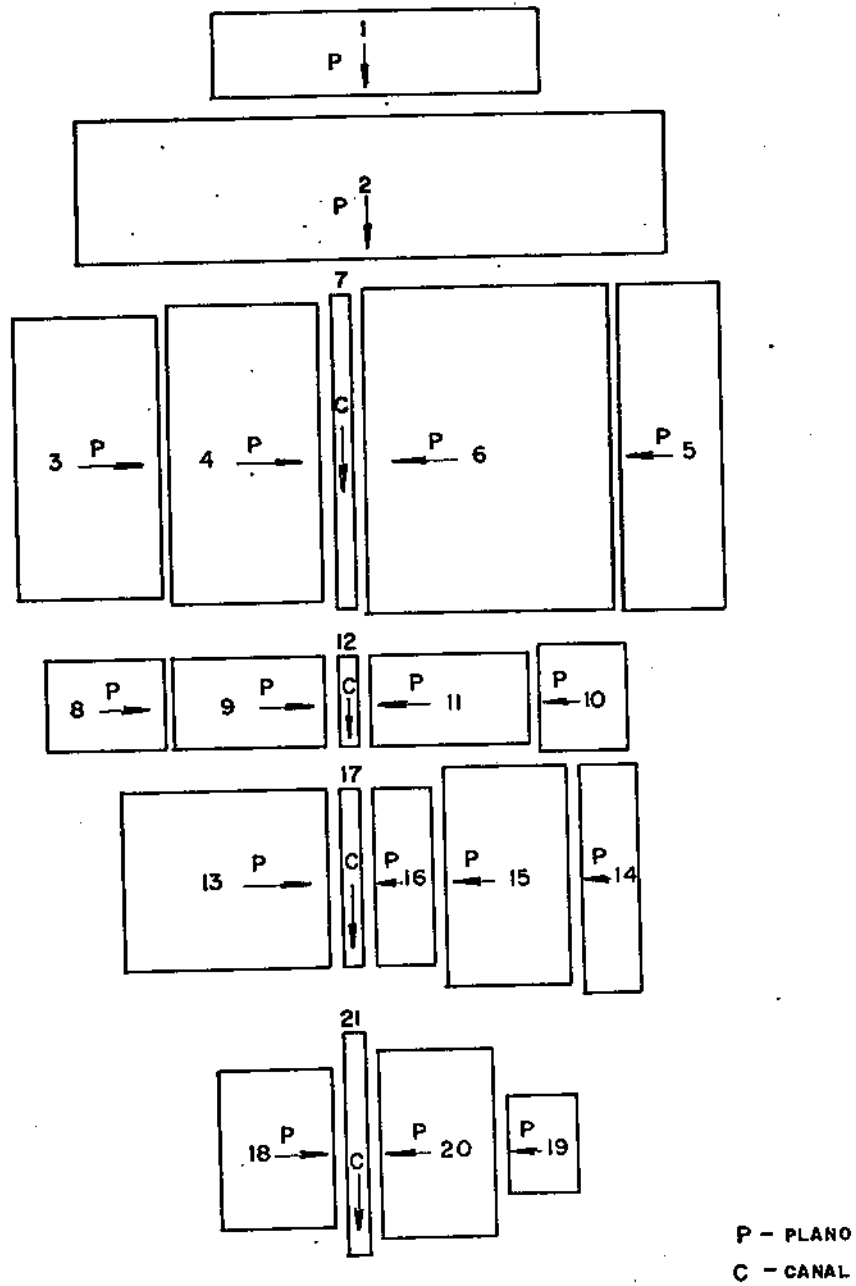


Figura 5.3 Representação esquemática da microbacia 4 para o wesp.

Tabela 5.1. Características físicas dos elementos da microbacia 4 para entrada no WESP.

Elemento	Area (m ²)	Compr. (m)	Largura (m)	Decl.	Base ¹ (m)	Inclin. 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

¹Dimensão da base da seção transversal do canal.

²Inclinação das laterais da seção transversal do canal. Relação da dimensão vertical sobre a horizontal.

Tabela 5.2. Sequência de cálculo e posição relativa dos elementos da microbacia.

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	

d_{50} , ou diâmetro mediano, definido como o diâmetro para o qual 50% da amostra em peso tem diâmetro menor. Este valor tem sido o mais utilizado para representar misturas de sedimentos. Simons e Şentürk (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 5.4 e 5.5 mostram as curvas granulométricas de material coletado na microbacia 4 e na parcela 4, respectivamente. Os diâmetros característicos são então 0,35 mm e 0,73 mm, respectivamente.

b) Peso específico da água (γ)

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

c) Peso específico dos sedimentos (γ_s)

Assumido como 2,650 vezes o peso específico da água, ou seja, $25.914,35 \text{ N/m}^3$.

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).

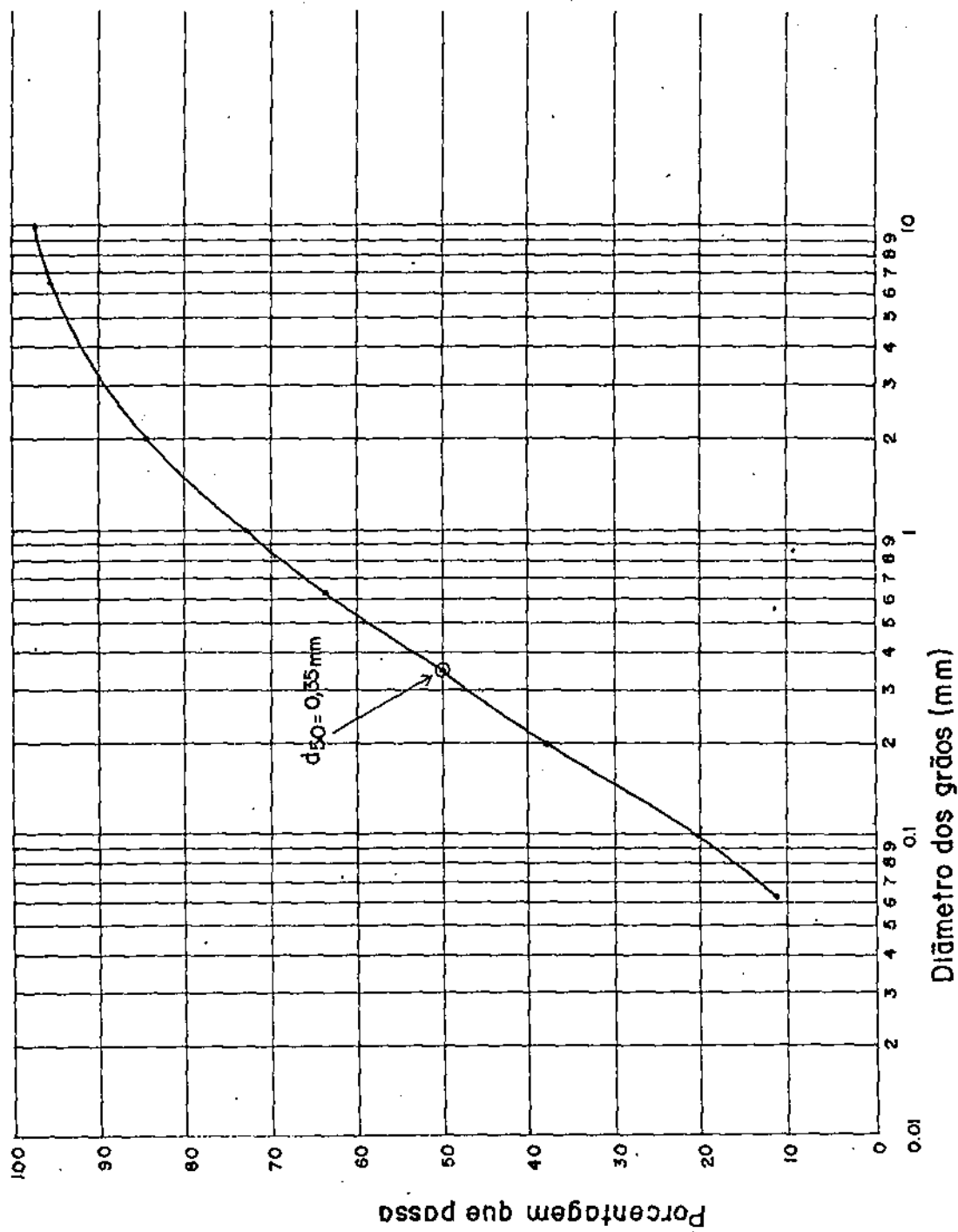


Figura 5.4. Distribuição granulométrica do solo amostrado na Microbacia 4.

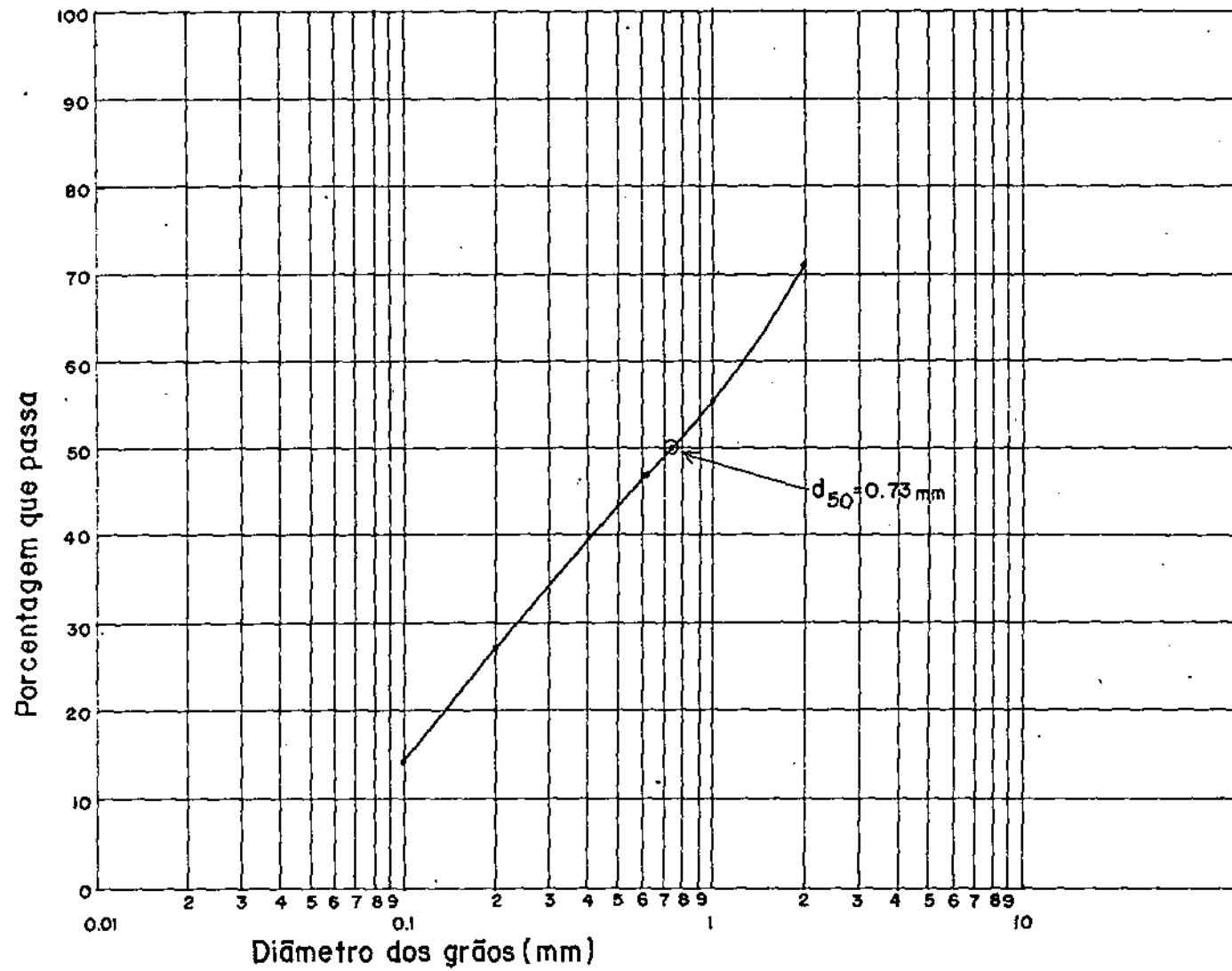


Figura 5.5. Distribuição granulométrica do solo amostrado na Parcela 4.

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

A formulação utilizada no WESP para τ_c é semelhante à 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. As coletâneas de Raudkivi (1976), Simons e Şentürk (1977) e ASCE (1975) apresentam 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:

$$\tau_c = 0,66 \cdot N \cdot \text{tg} \alpha \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot d_s / (1 + 0,85 \cdot \text{tg} \alpha) \quad (\text{eq. 5.33})$$

onde,

N é um 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,
 o que, aplicando na equação 5.31 o valor calculado de τ_c , dá um valor de 0,043 para δ .

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

$$\gamma \cdot d \cdot S = \tau = 0,047 \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot d_s + 0,25 \cdot (\gamma/g)^{1/3} \cdot q_s^{2/3} \quad (\text{eq. 5.34})$$

onde,

d é a profundidade do fluxo,

q_s é a carga de sedimento transportada, e

as outras variáveis são as mesmas já descritas. Na condição crítica, $q_s = 0$, o que dá:

$$\tau_c / (\gamma_s - \gamma) \cdot ds = 0,047 \quad (\text{eq. 5.35})$$

Ver Shields onde o valor de δ para o trecho turbulento fica próximo do obtido pela fórmula de Meyer-Peter. *Ver* Gessler (1971) apresenta uma correção do diagrama

Lopes (1987) utiliza 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 (E_p)

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

h) Parâmetro de deposição para os canais (E_c)

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

i) Coeficiente de Manning para os planos (n_p)

Este coeficiente poderia ser obtido pelo ajuste do

hidrograma observado, como realizado por Lopes (1987). Como nas parcelas de Sumé não é registrado o hidrograma, mas apenas o volume total escoado no evento, o valor de n_p teve de ser adotado 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), Engman (1983, 1986) e Liang et alii (1989).

j) Coeficiente de Manning para os canais (n_c)

Como não se dispõe de medições sobre este coeficiente em Sumé, seu valor foi adotado da literatura. Henderson (1966) indica a faixa de 0,025 a 0,030 para cursos naturais "limpos e retos", mas sugere experimentações para uma estimativa mais precisa. Para canais aluviais com material não coesivo e pedregulhos, sugere a fórmula $0,031 \cdot d_{50}^{1/4}$. Com o valor de $d_{50} = 1,15$ mm (Figura 5.4), para a microbacia 4, tem-se n_c igual a 0,032. 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 a estimativa da condutividade hidráulica saturada K_s , tem-se o resultado de um ensaio de infiltração sob carga constante, relatado por Audry et alii (1987) e Molinier et alii (1988). P. Audry (ORSTOM), que conduziu esses ensaios, em comunicação pessoal recomendou, para o caso das chuvas naturais, um valor entre 2,5 e 5,0 mm/h.

Para verificar o comportamento do modelo com dife-

rentes valores de K_s realizou-se simulações com vários eventos com 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.

5.5.2 - PARAMETROS OTIMIZADOS

A estimativa dos quatro parâmetros restantes foi realizada através de otimização por tentativas.

Utilizou-se a parcela de 100 m² número 4 para estimar os valores dos parâmetros de erosão nos planos, ou seja, K_I e K_R . A otimização foi feita para cada evento. Calibrou-se inicialmente o potencial de capilaridade N_s , ajustando a lâmina total escoada. O parâmetro de erodibilidade pelo impacto da chuva K_I mostrou-se pouco sensível e foi fixado em $5 \cdot 10^6$ kg-s/m⁴ para todos os eventos. O fator de erodibilidade pelo fluxo superficial K_R foi então estimado pelo ajuste à produção total de sedimentos. Obteve-se uma série de eventos com resultados coerentes e alguns eventos inconsistentes. A Tabela 5.3 mostra o resultado para a faixa considerada aceitável.

Os parâmetros de erosão estimados para a parcela foram então utilizadas na microbacia, para calibragem do parâmetro "a" de erodibilidade nos canais para cada evento (ajustando a produção total de sedimentos). Para o parâmetro K_R utilizou-se a média dos valores estimados ($2,174 \text{ kg-m/N}^{1,5}\text{-s}$). O valor de N_s

foi previamente ajustado para cada evento, como na parcela. A Tabela 5.4 mostra os resultados das simulações. Uma comparação entre a produção de sedimentos calculada utilizando o valor médio encontrado para o parâmetro de erodibilidade "a" ($0,0144 \text{ kg-m}^2/\text{N}^{1,5}\text{-s}$) e os valores observados é apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.3. Estimativa dos parâmetros de infiltração e erosão para a parcela 4.

Data do evento	N_s (mm)	K_R ($\text{kg-m}/\text{N}^{1,5}\text{-s}$)	L_o^1 (mm)	L_c^2 (mm)	E_o^3 (kg)	E_c^4 (kg)
07/02/87	8,5	0,631	2,84	2,83	2,437	2,436
12/03/87	5,9	2,270	0,64	0,64	0,488	0,488
04/04/87	6,5	4,460	0,59	0,57	0,775	0,775
23/02/88	8,4	4,830	1,48	1,48	3,004	3,007
19/03/88	9,7	1,130	1,31	1,31	1,261	1,262
21/03/88	9,1	1,127	11,83	11,83	32,326	32,322
20/04/88	4,6	1,510	1,27	1,26	1,269	1,272
06/05/88	5,0	1,139	8,14	8,13	18,995	18,999
13/07/88	5,4	2,470	0,30	0,30	0,092	0,092

¹ L_o é a lâmina observada no evento.

² L_c é a lâmina calculada usando os parâmetros calibrados.

³ E_o é a produção de sedimentos observada no evento.

⁴ E_c é a produção de sedimentos calculada usando os parâmetros calibrados.

5.6 - RESULTADOS

A principal expectativa ao se aplicar um modelo fundamental, que tem como base as formulações teóricas que descrevem os processos físicos, é de se obter na calibragem valores coerentes dos parâmetros, associados a um bom ajuste aos dados observados. No caso de estudos em várias escalas, como em Sumé, a

coerência destes resultados entre os níveis é muito importante na direção de extrapolação para outras áreas. Nesta ótica devem ser considerados os resultados apresentados.

Tabela 5.4. Estimativa dos parâmetros de infiltração e erosão para a microbacia 4.

Data do evento	Ns (mm)	a (kg-m ² /N ² ·s)	Lo ¹ (mm)	Lc ² (mm)	Eo ³ (kg)	Ec ⁴ (kg)
07/02/87	78,0	0,0064	0,116	0,115	3,203	3,207
02/05/87	43,5	0,0125	1,074	1,079	154,649	155,168
29/06/87	7,0	0,0046	0,328	0,328	11,938	11,969
23/02/88	6,9	0,0225	1,840	1,839	488,404	492,137
25/02/88	0,8	0,0126	5,038	5,007	853,521	851,657
02/03/88	26,5	0,0155	1,622	1,627	323,081	324,096
14/03/88	4,0	0,0197	6,140	6,141	1967,820	1968,320
05/04/88	16,8	0,0164	10,468	10,457	3299,756	3298,578
08/04/88	27,5	0,0148	5,017	5,025	1340,662	1339,218
19/04/88	16,3	0,0232	8,642	8,669	3195,927	3194,607
20/04/88	3,4	0,0265	1,609	1,599	556,524	558,695
30/04/88	32,0	0,0066	5,405	5,399	631,805	631,520
13/07/88	7,4	0,0056	0,095	0,095	1,831	1,847

¹L_o é a lâmina observada no evento.

²L_c é a lâmina calculada usando os parâmetros calibrados.

³E_o é a produção de sedimentos observada no evento.

⁴E_c é a produção de sedimentos calculada usando os parâmetros calibrados.

Experimentou-se na utilização do modelo WESP uma dificuldade apontada por muitos autores quando trabalhando com um modelo fundamental (ver por exemplo Beven 1989): a estimativa de parâmetros "efetivos" que reproduzam as condições de campo. Lopes (1987), ao comentar os resultados obtidos nos testes realizados

no desenvolvimento do WESP, alerta que os valores dos parâmetros de erosão obtidos por tentativa podem não ser únicos.

Tabela 5.5. Comparação entre a produção de sedimentos observada e a calculada utilizando o valor médio do parâmetro a para a microbacia 4.

Data do evento	E_o^1 (kg)	E_c^2 (kg)	Erro ³ (%)
07/02/87	3,203	7,213	+ 125,2
02/05/87	154,649	178,507	+ 15,4
29/06/87	11,938	37,329	+ 212,7
23/02/88	488,404	316,204	- 35,3
25/02/88	853,521	970,787	+ 13,7
02/03/88	323,081	301,426	- 6,7
14/03/88	1967,820	1463,499	- 25,6
05/04/88	3299,756	2943,302	- 10,8
08/04/88	1340,662	1322,650	- 1,3
19/04/88	3195,927	2029,553	- 36,5
20/04/88	556,524	306,369	- 44,9
30/04/88	631,805	1298,203	+ 105,5
13/07/88	1,831	4,748	+ 159,3

¹ E_o é a produção de sedimentos observada no evento.

² E_c é a produção de sedimentos calculada usando os parâmetros calibrados.

³Erro da estimativa simulada sobre a observada, em %.

No caso da Bacia de Sumé, houve lacunas nas informações necessárias para a estimativa de vários dos parâmetros do modelo. A adoção dos parâmetros não otimizados, discutida no item 5.5.1, caracterizou bem esta dificuldade. Alguns parâmetros foram fixados pelas informações na literatura e escolhidos dentre vá-

rias alternativas.

O erro provocado por essas estimativas pode ter sido incorporado na otimização dos quatro parâmetros restantes, que calibraram o modelo aos valores de escoamento e erosão estimados das observações de campo. Esta é uma ressalva que deve ser feita no julgamento da estimativa dos parâmetros.

O parâmetro N_s da equação de Green-Ampt foi otimizado evento a evento e a variação obtida na sua estimativa mostrou a impossibilidade da adoção de um valor médio representativo das condições de Sumé. A heterogeneidade observada na área, tratada no capítulo 3, parece ser a principal causa da diversidade do comportamento do solo quanto à infiltração, o que não é levado em conta no modelo de Green-Ampt. O desenvolvimento ou adoção de um esquema mais apropriado para estes solos poderia resolver este impasse.

Os parâmetros de erosão apresentaram razoável variação, mas puderam ser agrupados em faixas não muito largas. A utilização dos valores médios de K_R da parcela de 100 m² na microbacia de 0,48 ha com resultados satisfatórios do fator "a" de erodibilidade dos canais mostrou que a aplicação do modelo em escalas diferentes é promissora. A grande dificuldade encontrada foi a falta de estudos antecedentes sobre estes fatores, que pudessem balizar as suas estimativas iniciais. O fator de erodibilidade pelo fluxo superficial nos planos K_R mostrou maior sensibilidade que o de impacto da chuva K_I , tendo sido concentrado sobre ele o esforço de calibragem.

A avaliação final utilizando os valores médios dos parâmetros de erosão na comparação com os valores estimados no campo (Tabela 5.5) mostrou superestimativas da produção de sedimentos da ordem de até 200%. Mas para a maioria dos eventos não chegou aos 50%.

A quantidade de eventos estudados é pequena para garantir a viabilidade do uso deste modelo. Porém os resultados mostram-se promissores e são uma boa indicação de que o WESP pode se constituir numa ferramenta muito útil nos estudos de erosão.

Torna-se necessário, então, a realização de testes em diversas condições, para um maior conhecimento dos parâmetros do modelo, seu comportamento e as faixas admissíveis de variação.

6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A modelagem dos processos hidro-sedimentológicos é ainda uma tarefa difícil, a começar da complexidade destes processos, que envolvem inúmeras variáveis, o que dificulta montar representações matemáticas que os reproduzam. Na Bacia Experimental de Sumé utilizou-se para estudar o seu comportamento hidro-sedimentológico ferramentas de diferentes níveis de complexidade e uma discussão dos resultados obtidos é apresentada a seguir.

6.2 - O MODELO BAC400

Esta abordagem, de cunho empírico, apesar de não fazer parte do presente trabalho, merece ser discutida, por ser um estudo alternativo para as microbacias de Sumé.

O modelo apresentou ajustes satisfatórios, traduzidos pelos baixos valores do índice de ajustamento mensal (Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3). O posicionamento das curvas para as microbacias desmatadas e protegidas com caatinga estão coerentes com seu

comportamento físico.

Para as microbacias protegidas com caatinga, os parâmetros das hipérboles sugerem comportamentos relativos diferentes nas épocas mais secas e mais úmidas: a microbacia 1 teria uma maior resposta nos períodos mais secos e a microbacia 2 nos períodos mais úmidos.

Para as microbacias desmatadas, os parâmetros das hipérboles permaneceram praticamente inalterados entre as duas, com exceção do índice de precipitação antecedente IH, que as distingue. O comportamento das duas microbacias foi semelhante, embora o escoamento na microbacia 3 tenha sido maior. As diferenças no manejo da vegetação entre os três períodos identificados se confirmou no resultado da modelagem em ambas as microbacias. Para o período 1984/86, quando o solo estava com vegetação, os índices IH das curvas são maiores e as curvas estão deslocadas para a direita em relação aos anos 1987/88, quando o solo permaneceu nu todo o tempo.

As diferenças de comportamento entre as microbacias desmatadas e as cobertas com caatinga estão muito evidentes quando se compara os parâmetros calibrados. Os valores limites de IH e das curvas são maiores e, acumulando o efeito de redução do escoamento, as curvas são bastante deslocadas para a direita, nas microbacias com caatinga. Uma característica interessante da forma das curvas destas áreas é seu achatamento, refletido pelos valores altos de X_0 e principalmente X_1 , em relação às curvas das microbacias desmatadas. Isto destaca o papel da vegetação nativa

sobre o escoamento para a maioria das chuvas ou, inversamente, o efeito enorme do desmatamento no aumento do escoamento. Por exemplo, para baixos teores de umidade do solo (hipérbole 3), chuvas da ordem de 70mm, produziriam apenas cerca de 1mm de escoamento superficial numa área completamente coberta com caatinga.

6.3 - O MODELO MODIBI

A calibragem do modelo MODIBI em Sumé demonstrou a vantagem de um modelo conceitualmente mais bem elaborado que o BAC400.

Os resultados, apresentados no Capítulo 4, mostraram a adequação conceitual do modelo às características físicas das microbacias experimentais, o que permite recomendá-lo no prosseguimento desses estudos. A sua utilização em áreas tão pequenas requereu adaptações mas sua aplicabilidade foi estabelecida. O esquema de otimização incluído no programa torna mais ágil sua calibragem. Todos esses fatores fazem do MODIBI uma ferramenta possível de utilização nos estudos das bacias representativas do Nordeste.

Como seu algoritmo de geração de escoamento de base não foi utilizado, nada pode-se dizer sobre o comportamento do MODIBI neste nível no semi-árido nordestino.

A principal limitação encontrada no modelo, a multiplicidade de conjuntos de parâmetros reproduzindo uma mesma situação, decorre de uma estrutura onde a dependência entre os parâmetros é muito acentuada. Isto porém é decorrente do esforço

empreendido no desenvolvimento do modelo (Ibiza 1983, 1985) de representar com maior fidelidade os conceitos hidrológicos de geração do escoamento superficial.

6.4 - O MODELO WESP

A utilização do modelo WESP foi uma tentativa de aplicação de um modelo fundamental de precipitação-escoamento-erosão nas Bacias Representativas e Experimentais do Nordeste. O propósito foi testar uma ferramenta teoricamente bem fundamentada que pudesse adequadamente reproduzir o comportamento físico da região estudada.

Entre os pontos favoráveis apresentados pelo WESP estão a sua modularidade, boa documentação e esquemas numéricos eficientes, o que permite a incorporação à sua estrutura de equações e parâmetros mais adequados à realidade do semi-árido do Nordeste.

A maior dificuldade foi a estimativa dos parâmetros e julgamento dos resultados. A consideração de que um modelo fundamental deve trabalhar com parâmetros que tragam consigo o máximo de significado físico real, e não apenas semelhança ou simples representações das características da bacia, como ocorre nos modelos conceituais, faz com que o modelador se depare com conflitos e dúvidas na estimativa destes fatores. Bons ajustes dos dados gerados pelo modelo aos observados é um critério necessário na avaliação da calibragem - ajustes inadequados a condenariam - mas não deve ser o único critério (ASCE 1985). Estimativas

adequadas dos parâmetros, com base nas características físicas da bacia, são necessárias para a validação da aplicabilidade do modelo.

Os estudos de simulação do comportamento do escoamento superficial e da produção de sedimentos em Sumé através de modelos de maior base física parece uma direção acertada a seguir. O modelo WESP, pelo seu comportamento nestes primeiros testes realizados, demonstrou ser uma ferramenta promissora para o prosseguimento desses estudos.

6.5 - A QUESTÃO DO MELHOR MODELO

Existe uma grande diversidade de opiniões na literatura quanto ao mais adequado tipo de modelo a ser utilizado nos estudos hidrológicos. Ultimamente, com o aumento das pesquisas e aplicações utilizando modelos com maior base física ("physically-based models"), a polêmica em torno deste tema tem crescido. Discussões interessantes podem ser encontradas, entre outros, em Nash e Sutcliffe (1970), Naef (1981), Dubreuil (1982), Foster (1982), ASCE (1985), Pilgrim (1986), Klemes (1986), Chevallier (1988), Beven (1989) e Yevjevich (1989).

Os razoáveis ajustes apresentados por todos os modelos testados em Sumé às séries observadas do escoamento superficial e a coerência na estimativa dos seus parâmetros não desaconselham a utilização de qualquer um deles.

Na literatura (Naef 1981, ASCE 1985, Beven 1989, por exemplo) são apresentadas diversas comparações entre modelos

simples com outros mais complexos. Em geral, os resultados têm mostrado que mesmo modelos muito simples podem explicar uma grande parte da variação da série observada (Naef 1981). Isto foi notado neste estudo. As respostas dos modelos BAC400 e MODIBI, para séries longas, e do WESP para eventos isolados, não mostram diferenças significativas entre os modelos na reprodução da lâmina escoada.

Na extensão das séries de escoamento das microbacias, por exemplo, tanto o BAC400 quanto o MODIBI poderiam ser utilizados. O BAC400 já vem sendo inclusive aplicado pela SUDENE na regionalização dos resultados das Bacias Representativas do Nordeste (Cadier e Campello 1983, Cavalcante et alii 1990), e tem a vantagem de uma calibragem mais simples e rápida. O MODIBI no entanto pode oferecer maior segurança ao modelador. A coerência conceitual com o sistema físico estudado, aliada a um bom conhecimento do funcionamento e comportamento do modelo por parte do usuário, torna sua aplicação mais confiável (ASCE 1985).

Os modelos mais complexos contribuiriam principalmente na maior compreensão dos processos hidrológicos (Yevjevich 1989). Os resultados dos três modelos aplicados em Sumé são bastante interessantes neste aspecto. Considerando apenas os processos de infiltração e geração do escoamento superficial, tanto o modelo BAC400 quanto o MODIBI reproduzem satisfatoriamente a resposta das bacias e, no caso do MODIBI, até analogias entre a concepção do modelo e as características da bacia podem ser visualizadas. Os resultados do WESP, porém, põem em relevo as dificuldades de compreensão e modelagem do mecanismo de infiltração,

não aparentes no MODIBI. Vale destacar que grande parte das dificuldades com o WESP é devida ao seu objetivo de estabelecer o hidrograma (e sedigrama) de cada evento, cuja duração é de apenas algumas horas. Em contraste, os outros dois modelos procuram apenas a lâmina total do escoamento diário.

Em relação à erosão e produção de sedimentos, as relações empíricas que se vinha tentando estabelecer em Sumé não mostraram resultados satisfatórios. A tentativa de modelagem através de uma abordagem mais sofisticada como o WESP veio então como uma alternativa necessária. Estes resultados iniciais não são conclusivos, mas já apontam uma direção que pode ser viável.

7 - CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi estudado o processo de análise e reprodução do comportamento de uma bacia experimental numa região semi-árida, desde as primeiras aproximações através de esquemas empíricos, até a representação dos fenômenos com uma ferramenta de base física. As impressões finais deste estudo são agora enumeradas.

7.1 - CONCLUSOES

Os resultados da modelagem mostraram coerência com as hipóteses levantadas nos estudos anteriores sobre o funcionamento hidro-sedimentológico das microbacias. A influência dos horizontes mais superficiais do solo sobre a infiltração e o escoamento foi evidenciada pelos modelos. O papel da película superficial formada pelo impacto das chuvas nas microbacias desmatadas também pareceu confirmado pela modelagem. A abordagem do MODIBI, através de reservatórios, aproximou bem o funcionamento do sistema, enquanto que os resultados da calibragem do WESP indicam que um modelo fundamental para aquela situação deve levar

em conta a heterogeneidade dos solos.

O modelo MODIBI teve um comportamento bastante satisfatório, mostrou sensibilidade às mudanças no manejo do solo e da vegetação, e pode ser um instrumento adequado aos estudos das Bacias Representativas e Experimentais do Nordeste do Brasil.

O modelo WESP, como primeira tentativa de modelagem da erosão, apresentou os parâmetros com dispersão razoável, mostrando-se promissor para utilização no prosseguimento das pesquisas.

7.2 - RECOMENDAÇÕES

A partir da experiência adquirida permite-se fazer algumas sugestões para trabalhos subsequentes.

O modelo MODIBI deve ser aplicado às sub-bacias da Bacia Representativa de Sumé, procurando verificar a viabilidade de sua utilização nos estudos de regionalização. Recomenda-se também a adaptação do modelo para simulação a nível de evento.

Para o modelo WESP, a consecução de levantamentos topográficos mais detalhados que os disponíveis para este estudo é necessário. Sua aplicação para as demais parcelas e microbacias de Sumé poderia determinar a faixa de ocorrência dos parâmetros do modelo para os vários sistemas de cultivo e manejo do solo. Recomenda-se a avaliação crítica do algoritmo de infiltração do modelo.

Recomenda-se o MODIBI e o WESP para aplicação nas

outras bacias experimentais do Nordeste (Tauá e nas próximas a serem implantadas). A aplicação do WESP pode ser tentada aos resultados das numerosas parcelas experimentais operadas no Nordeste (Leprun 1981, 1983). A determinação dos parâmetros dos modelos para condições hidrológicas diferentes podem apontar rumos para a continuidade da pesquisa sobre regionalização e extrapolação dos resultados gerados.

8 - REFERENCIAS

- Abbott, M. B.; Bathurst, J. C.; Cunge, J. A.; O'Connell, P. E. & Rasmussen, J. (1986a) An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: history and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87:45-59.
- Abbott, M. B.; Bathurst, J. C.; Cunge, J. A.; O'Connell, P. E. & Rasmussen, J. (1986b) An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87:61-77.
- 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, 745p.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), Task Committee ... (1985) Evaluation of hydrologic models used to quantify major land-use change effects. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111(1):1-17.
- Arnold, J. G. & Williams, J. R. (1987) Validation of SWRRB - simulator for water resources in rural basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2):243-256.
- Arnoldus, H. M. J. (1977) Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. In: FAO. Guidelines for watershed management, Roma, FAO, p. 99-124. FAO Conservation Guide, 1.
- 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". Relatório de andamento dos trab-

- lhos., Recife, ATP-PIREN, DRSTOM, 78 p.
- Barreto, F. H.; Leprun, J. C.; Cadier, E.; Cavalcante, N. M. da C. & Herbaud, J. J. M. (1989) Classificação hidrológica de pequenas bacias hidrográficas no Nordeste semi-árido. In: Anais VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, ABRH. Vol. 1, p. 666-677.
- Beasley, D. B. (1977) ANSWERS: A mathematical model for simulating the effects of land use and management on water quality. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette. 266 p. 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. & Benatti Jr., R. (1975) Equação de perdas de solo. *Boletim Tec. Instituto Agronômico*, (21):1-25. Campinas. Apud Bertoni & Lombardi Neto (1985).
- Bertoni, J. & Lombardi Neto, F. (1985) Conservação do solo. Piracicaba, Livroceres, 368 p.
- Beven, K. (1989) Changing Ideas in hydrology - the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105:157-172.
- Bordas, M. P.; Semmelmann, F. R.; Silveira, R. L. & D'Amico, J. J. (1983) Sub-bacias e bacia representativa do rio Forquetinha-RS. In: Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Blumenau, ABRH. Vol. 1, p. 171-194.
- Brakensiek, D. L.; Osborn, H. B. & Rawls, W. J. (1979) Field manual for research in agricultural hydrology. Washington, U.S. Department of Agriculture, 547 p. *Agriculture Handbook*, 224.
- Branson, F. A.; Gifford, G. F.; Renard K. G. & Hadley, R. F. (1981) *Rangeland hydrology*. 2nd edition, Dubuque, Kendall/Hunt Publishing Company. 340 p.
- Cadier, E. (1984) Método de avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do semi-árido. Recife, SUDENE. 75 p. Série Hidrologia 21.
- Cadier, E. & Campello, S. (1983) Avaliação dos recursos hídricos de pequenas bacias do Nordeste semi-árido. In: Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Blumenau, ABRH. Vol. 1, p.133-149.
- 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; instalação e primeiros resultados. Recife, SUDENE, 87 p.

- Cavalcante, N. M. da C.; Doherty, F. R. & Cadier, E. (1990) Bacia hidrográfica representativa de Tauá-CE; relatório final. Recife, SUDENE, 326 p. Série Hidrologia 28.
- Chevallier, P. (1988) Complexité hydrologique du petit bassin versant; exemple en savane humide Booro-Borotu (Côte d'Ivoire). Montpellier, 329 p. Thèse, Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Chow, V. T. (1959) Open-channel hydraulics. Tokyo, McGraw-Hill/Kogakusha, 680p.
- Chu, S. T. (1978) Infiltration during an unsteady rain. Water Resources Research, 14(3):461-466.
- Clarke, R. T. (1973) Mathematical models in hydrology. Rome, FAO, 282 p.
- Croley, T. E., II. (1982) Unsteady overland sedimentation. Journal of hydrology, 56:325-346.
- Davis, S. S. (1978) Deposition of nonuniform sediment by overland flow on concave slopes. West Lafayette, Purdue University, 137 p. M.Sc. Thesis.
- Dawdy, D. R. (1990) Discussion on "Kinematic wave routing and computational error". Journal of Hydraulic Engineering, 116(2):278-280.
- Dawdy, D. R. & Lichty, R.W. (1968) Methodology of hydrologic model building. Symp. on the use of analog and digital computers in hydrology. Tucson. IASH Pub. 81, Vol.2, p.347-355.
- Dawdy, D. R. & O'Donnell, T. (1965) Mathematical models of catchment behavior. Journal of the hydraulics division, Proc. ASCE, 91(HY4):123-137.
- Diskin, M. H. & Simon, E. (1977) A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models. Journal of Hydrology, 34:129-149.
- Dooge, J. C. I. (1979) Deterministic input-output models. In: Lloyd, E. H.; O'Donnell, T. & Wilkinson. The mathematics of hydrology and water resources, London, p. 1-37.
- Dubreuil, P. (1982) Estimation of water resources characteristics; introduction. In: UNESCO. Application of results from representative and experimental basins. Paris, UNESCO, p. 15-26.
- Duque, J. G. (1951) Solo e água no polígono das secas. 2. ed., Fortaleza, Depto. Nacional de Obras Contra as Secas, 220 p.
- Einstein, H. A. (1968) Deposition of suspended particles in a gravel bed. Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE,

94(HY5):1197-1205.

- Ellison, W. D. (1947) Soil erosion studies. Agricultural Engineering, Vol. 28. Apud Foster (1982).
- Engman, E. T. (1983) Roughness coefficients for routing surface runoff. In: Shen, H. W. Frontiers in hydraulic Engineering, Cambridge, Mass., ASCE/MIT, p. 560-565.
- Engman, E. T. (1986) Roughness coefficients for routing surface runoff. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 112(1):39-53.
- Ferreira Filho, W. M. & Nunes, L. A. de M. (1987) Estudo de modelos chuva x vazão no semi-árido. In: Anais VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador, ABRH, Vol. 2, p. 495-513.
- Fleming, G. (1977) Computer simulation techniques in hydrology. New York, Elsevier, 334 p.
- Fleming, G. (1979) Deterministic models in hydrology. Roma, FAO, 80 p.
- Fleming, G. & Al Kadhimi, 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, Amer. Soc. Agricultural Engineers, p. 297-380.
- Foster, G. R.; Lane, L. J.; Nowlin, J. D.; Laflen, J. M. & Young, R. A. (1980) A model to estimate sediment yield from field sized areas: Development of model. In: CREAMS - a field scale model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. Volume I: Model Documentation. Chapter 3. USDA - Science and Education Administration Conservation Report No. 26. Apud Foster (1982).
- 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.
- Gessler, J. (1971) Beginning and ceasing of sediment motion. In: Shen, H. W. River mechanics. Fort Collins, Chapter 7.
- Goldman, D. (1980) Discussion on "Kinematic wave routing and computational error". Journal of Hydraulic Engineering, 116(2):280-282.
- Gomes, H. P. (1985a) Modelo de aproveitamento hidroagrícola em

- bacias experimentais na região de Sumé; relatório de atividades, 1984. Campina Grande, UFPB.
- Gomes, H. P. (1985b) Modelo de aproveitamento hidroagrícola em bacias experimentais na região de Sumé; relatório de atividades 1985. Campina Grande, UFPB.
- 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.
- Gomes, H. P.; Srinivasan, V. S.; Galvão, C. de O. & Cadier, E. (1987b) Modelo de aproveitamento hidroagrícola em bacias experimentais na região de Sumé; relatório de atividades 1986. Campina Grande, UFPB.
- Gomes, H. P.; Srinivasan, V. S.; Galvão, C. de O.; Cadier, E. & Molinier, M. (1988) Modelo de aproveitamento hidroagrícola em bacias experimentais na região de Sumé; relatório de atividades 1987. Campina Grande, UFPB.
- 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).
- Haan, C. T.; Johnson, H. P. & Brakensiek, D. L., Ed. (1982). Hydrologic modeling of small watersheds, St. Joseph, Amer. Soc. Agricultural Engineers, 533 p.
- Henderson, F. M. (1966) Open channel flow. New York, Macmillan, 522 p.
- Hromadka II, T. V. & DeVries, J. J. (1988) Kinematic wave routing and computational error. Journal of Hydraulic Engineering, 114(2):207-217.
- Hromadka II, T. V. & DeVries, J. J. (1990) Closure on "kinematic wave routing and computational error". Journal of Hydraulic Engineering, 116(2):288-289.
- Ibbitt, R. P. & O'Donnell, T. (1971) Fitting Methods for conceptual catchment models. Journal of the hydraulics division, Proc. ASCE, 97(HY9):1331-1342.
- Ibiza, D. (1983) Un modèle simplifié de calcul des écoulements mensuels par bilan hydrique; application: variation de quelque paramètres hydrologiques d'après l'aspect des bassins. Cahiers ORSTOM, sér. Hydrologie, XX(1):3-22.
- Ibiza, D. (1985) Etude de l'infiltration au pas de temps journalier sur les petits bassins versants. Refus à l'infiltration par saturation des réserves souterraines. Cahiers ORSTOM, Sér. Hydrologie, XXI(3):17-50.

- Ibiza, D. (1988) Note complementaire pour l'utilisation du modele Modqjd (Modibi). Montpellier, ORSTOM, 5 p.
- Khan, M. H. (1989) Evaluation of rainfall-discharge models with discrimination. *Journal of Hydrology*, 108:63-78.
- Kibler, D. F & Woolhiser, D. A. (1970) The kinematic cascade as a hydrologic model. Fort Collins, Colorado State University, 27p. *Hydrologic Papers* 39.
- Kirkby, M. (1988) Hillslope runoff processes and models. *Journal of hydrology*, 100:315-339.
- Klemes, V. (1986) Dilettantism in hydrology: transition or destiny? *Water Resources Research*, 22(9):1775-1885.
- Lane, L. J. & Shirley, E. D. (1985) Erosion and sediment yield equations: solutions for overland flow. West Lafayette, 22p. Apresentado no Workshop on USLE Replacement, Nat. Soil Erosion Lab., West Lafayette. Apud Lopes (1987).
- Lane, L. J. & Woolhiser, D. A. (1977) Simplifications of watershed geometry affecting simulation of surface runoff. *Journal of Hydrology*, 35:173-190.
- Lanna, A. E. (1983) Provincias hidrológicas e bacias representativas. In: *Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, Blumenau, ABRH, Vol. 1, p. 3-24.
- Lanna, A. E. & Schwarzbach, M. (1989) Modhac - modelo hidrológico auto-calibrável. Porto Alegre, IPH/UFRS.
- 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 de fim de convênio de manejo e conservação de solo no Nordeste Brasileiro (1982-1983). Recife, SUDENE/ORSTOM, 290 p.
- Li, R. M. (1977) Water and sediment routing from watersheds. Proc. of River Mechanics Institute. Colorado State University. Fort Collins. Apud Foster (1982).
- Lichty, R. W.; Dawdy, D. R. & Bergman, J. M. (1968) Rainfall-runoff model for small basin flood hydrograph simulation. Symp. on the use of analog and digital computers in hydrology. Tucson. IASH Pub. 81, Vol. 2, p. 356-368.
- 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.
- 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, Mississippi State University.
- Lopes, V. L. (1980) Um estudo da erosão e da produção de sedimentos pelas chuvas. Campina Grande, 70 p. Dissertação de Mestrado.
- Lopes, V. L. (1987) A numerical 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 Hídricos, Salvador, ABRH, Vol. 2, p. 481-494.
- Magalhães, P. C. de. (1989) Hidrologia Superficial. In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Engenharia hidrológica. Rio de Janeiro, ABRH/Ed. UFRJ, p. 200-289.
- Marwell Filho, P. & Lanna, R. E. (1986) Mohtsar: um modelo hidrológico para o trópico semi-árido. Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Recursos Hídricos. 4(1):95-118.
- Mehta, A. J. (1983) Characterization tests for cohesive sediments. In: Shen, H. W. Frontiers in hydraulic Engineering, Cambridge, Mass., ASCE/MIT, p. 79-84.
- Mein, R. G. & Larson, C. L. (1973) Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources Research, 9(2):384-394.
- Merkel, W. H. (1990) Discussion on "Kinematic wave routing and computational error". Journal of Hydraulic Engineering, 116(2):282-284.
- Meyer, L. D. & Wischmeier, W. H. (1969) Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Transactions of the ASAE, 12(6):754-762. Apud Bennett (1974).
- 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, 15 p.
- Molinier, M.; Audry, P.; Desconnets, J. C. & Leprun, J. C. (1989a) Projeto: "Dinâmica da água e das matérias em um ecossistema representativo do Nordeste brasileiro. Condições de extrapolação espacial na escala regional". Relatório final. Recife, ATP-PIREN, ORSTOM, 27 p. e anexos.
- Molinier, M.; Audry, P. & Leprun, J. C. (1989b) Modelagem do escoamento 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 técnicas de simulação de chuva. In: Anais VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador, ABRH, Vol. 2, p. 530-544.
- Musgrave, G. W. (1947) The quantitative evaluation of factors in water erosion, a first approximation. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 2. Apud ASCE (1975).
- Naef, F. (1981) Can we model the rainfall-runoff process today? *Hydrological Sciences Bulletin*, 26:281-289.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models; Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10:282-290.
- Negev, M. (1967) A sediment model on a digital computer. Technical Report 76. Department of Civil Engineering. Stanford University. Stanford, 109 p. Apud Bennett (1974).
- Nouvelot, J. F. (1974) Planificação da implantação de bacias representativas; aplicação à área da SUDENE. Recife, SUDENE/ORSTOM, 91 p.
- Overton, D. E. & Meadows, M. E. (1976) Stormwater modeling. New York, Academic Press, 358 p.
- Pilgrim, D. H. (1986) Bridging the gap between flood research and design practice. *Water Resources Research*, 22(9):1655-1765.
- Raudkivi, A. J. (1976) Loose boundary hydraulics. 2. ed. Oxford, Pergamon Press, 397p.
- Roma, W. N. L. & Mattos, A. (1983) Bacia representativa do rio Jacaré-Guaçu-SP. In: Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, São Paulo, ABRH, Vol. 1, p. 195-219.
- Rosenbrock, H. H. (1960) An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *The Computer Journal*, 3(3):175-184.
- Rotunno Filho, O. C. & Magalhães, P. C. (1987) Comparação de dois métodos de otimização de parâmetros em modelos hidrológicos chuva-vazão. In: Anais VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador, ABRH, Vol. 2, p. 469-479.
- Rovey, E. W.; Woolhiser, D. A. & Smith, R. E. (1977) A distributed kinematic model of upland watersheds. Fort Collins, Colorado State University, 52p. Hydrologic Papers 93.
- Sanchez, J.; Tucci, C. E. M. & Lopes, M. S. (1983) Bacia representativa urbana do Arroio Dilúvio, em Porto Alegre, RS. In: Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos

- Hídricos, Blumenau, ABRH, Vol. 1, p. 91-105.
- Semmelmann, F. R.; Silveira, R. L.; D'Amico, J. J.; Silveira, G. L. & Bordas, M. P. (1985) Contribuição para o conhecimento da influência do uso do solo sobre os regimes hidrológicos e sedimentológicos. In: Anais VI Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, São Paulo, ABRH, Vol. 3, p. 202-211.
- Servat, E. (1986a) Presentation de trois modeles globaux conceptuels deterministes: Crec 5, Modglo et Modibi. Montpellier, ORSTOM, 57 p.
- Servat, E. (1986b) Notice d'utilisation du modele Modibi. Montpellier, ORSTOM, 6 p. e anexos.
- Simons, D. B. & Şentörk, F. (1977) Sediment transport technology. Fort Collins, Water Resources Publications, 807p.
- Siqueira, L. (1984) Aspectos hidrogeológicos do Cariri paraibano. SUDENE Boletim de Recursos Naturais, Recife, 2(1/4):11-44.
- Smith, R. E. (1977) Field test of a distributed watershed erosion/sedimentation model. In: Soil Erosion: Prediction and Control. Ankeny, Special Publication No. 21. Soil Conservation Society of America, p. 201-209. Apud Foster (1982).
- Smith, R. E. (1981) A kinematic model for surface mine sediment yield. Trans. of Am. Soc. Agr. Eng., 24(6):1508-1514. Apud Lopes 1987.
- Smith, R. E. & Woolhiser, D. A. (1971) Overland flow on an infiltrating surface. Water Resources Research, 7(4):899-913.
- Sorooshian, S. & Gupta, V. J. (1985) The analysis of structural identifiability: theory and application to conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research, 21(4):487-495.
- Srinivasan, V. S. & Galvão, C. de O. (1989) Modelo de aproveitamento hidroagrícola em bacias experimentais na região de Sumé; relatório de atividades 1988. Campina Grande, UFPB.
- Srinivasan, V. S. & Galvão, C. de O. (1990) Bacia experimental de Sumé; resenha dos dados coletados - 1982/1988. Campina Grande, UFPB/CNPq/SUDENE/ORSTOM. No prelo.
- Srinivasan, V. S.; Gomes, H. P.; Leprun, J. C. & Silva, I. G. (1988) Erosion studies in Sumé a semi-arid region of Brazil. In: Sediment Budgets (Proceedings of the Porto Alegre Symposium), Porto Alegre, IAHS, p. 307-314. IAHS Publ. no. 174.
- Streeter, V. L. & Wylie, E. B. (1982) Mecânica dos fluidos. 7 ed. São Paulo, McGraw-Hill, 585p.
- Todini, E. (1988) Rainfall-runoff modeling - past, present and

- future. *Journal of Hydrology*, 100:341-352.
- Tucci, C. E. M. (1975) Otimização dos parâmetros dos modelos hidrológicos. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado.
- 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.; Sánchez, J. & Lopes, M. O. S. (1981) Modelo 1PH II de simulação precipitação-vazão na bacia: alguns resultados. In: Anais do IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, ABRH, Vol. 2, p. 83-103.
- UNESCO. (1970) Les bassins représentatifs et expérimentaux; guide international des pratiques en matière de recherche. UNESCO, Paris.
- UNESCO. (1982) Application of results from representative and experimental basins. Paris, UNESCO, 477 p.
- Unkrich, C. L. & Woolhiser, D. A. (1990) Discussion on "Kinematic wave routing and computational error". *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(2):284-286.
- Viana, F. L. (1986) Comportamento hidrológico das pequenas bacias do Nordeste, Fortaleza, UFC, 166p. Dissertação de Mestrado.
- Vieira, H. J. P.; Cadier, E.; Lins, M. J. A. & Assunção, M. S. (1983) Descrição da rede de bacias representativas e experimentais do Nordeste Brasileiro. In: Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Blumenau, ABRH, Vol. 1, p. 39-67.
- Wheater, H. S.; Bishop, K. H. & Beck, M. B. (1986) The identification of conceptual hydrological models for surface water acidification. *Hydrological Processes*, 1:89-109.
- Williams, J. R. (1975) Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. ARS-S-40, USDA - Agricultural Research Service. Apud Foster (1982).
- Williams, J. R.; Nicks, A. D. & Arnold, J. G. (1985) Simulator for water resources in rural basins. *J. Hydr. Engrg.*, 111(6):970-986.
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1958) Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. AGU*. 39:285-291. Apud Sinivasan et alii (1988).
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1960) A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7th

International Congress of Soil Science, Madison, vol. 1, p. 418-425. Apud Leprun (1981).

Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1965) Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington, U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook 282. Apud Leprun (1981).

Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1978) Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation and planning. Washington, U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook 537. Apud Leprun (1981).

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.

Woolhiser, D. A. & Goodrich, D. C. (1990) Discussion on "Kinematic wave routing and computational error". Journal of Hydraulic Engineering, 116(2):268-288.

Woolhiser, D. A. & Liggett, J. A. (1967) Unsteady, one-dimensional flow over a plane - the rising hydrograph. Water Resources Research, 3(3):753-771.

Yevjevich, V. (1989) Tendências in hydrology research and its applications. Trabalho apresentado no Seminário CEHPAR 30 Anos, Curitiba, 27 p.

ANEXO A

EVAPORAÇÃO E PRECIPITAÇÃO

A.1 - EVAPORAÇÃO

Os dados de evaporação média mensal diária do tanque evaporimétrico "Classe A" para o período de 1982 a 1988 estão apresentados na Tabela A.1. O período de março a julho de 1983 apresentava lacunas que foram preenchidas com a média para os meses respectivos, calculadas com os dados dos outros anos.

Tabela A.1. Evaporação média mensal diária do tanque Classe "A".

Ano	Evaporação (mm) no mês											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1982	9.6	7.7	8.4	6.6	4.1	4.4	5.4	5.9	8.2	9.0	8.5	8.7
1983	8.4	6.4	6.5	5.5	4.8	4.7	5.1	7.4	10.6	10.9	12.3	11.5
1984	11.0	11.2	8.1	6.8	4.3	4.7	4.8	6.4	7.2	9.4	10.2	10.3
1985	8.0	6.7	5.2	4.7	4.4	3.9	4.5	5.2	7.8	10.1	11.2	7.7
1986	8.7	6.4	4.8	4.6	4.6	4.7	4.8	5.7	6.7	8.5	8.5	8.5
1987	8.3	8.3	6.5	5.7	6.7	5.0	5.0	7.1	8.3	10.6	10.4	10.4
1988	9.5	9.4	6.0	4.5	4.8	5.3	6.5	6.1	7.6	9.9	12.2	8.5

A.2 - PRECIPITAÇÃO

As alturas diárias de precipitação observadas nos cinco postos pluviométricos para os eventos utilizados neste trabalho estão apresentadas na Tabela A.2. O cálculo da precipitação média foi realizado através de média ponderada dos cinco postos para cada uma das microbacias. Os pesos aplicados estão na Tabela A.3. O cálculo da média foi realizado considerando apenas os postos sem falha no dia em questão.

Tabela A.2. Precipitação diária na Bacia Experimental de Sumé.

Data do evento	Precipitação (mm) no posto				
	49	50	51	52	57
31/03/82	16.7				
15/04/82	40.6				
23/04/82	43.7				
24/04/82	5.3				
01/05/82	11.4				
02/05/82	70.2				
05/05/82	5.3				
07/05/82	5.6				
08/05/82	6.0				
10/05/82	2.8				
12/05/82	6.9				
03/02/83	12.1	12.2	17.6	14.8	
05/02/83	13.4	14.2	14.1	15.2	
06/02/83	10.9	10.8	10.0	9.2	
07/02/83	44.4	46.0	45.6	42.0	
12/02/83	4.0	6.5	5.6	6.8	
17/02/83	8.4	9.6	9.4	10.0	
23/03/83	16.3	16.6	16.4	17.8	
27/03/83	6.3	6.7	8.8	12.7	
06/04/83	25.4	26.0	26.6	26.4	
10/05/83	8.6	8.6	8.7	5.6	
07/01/84	10.4	10.6	11.6	13.8	10.6
07/02/84	18.8	19.8	17.9	18.2	19.6
14/02/84	8.4	7.2	7.4	7.4	8.2
29/02/84	27.6	27.2	26.8	24.2	
08/03/84	5.0	5.4	4.2	3.2	
10/03/84	16.2	18.2	17.2	19.8	
11/03/84	32.2	29.8	32.4	33.8	
22/03/84	18.8	19.4	18.8	20.4	
23/03/84	9.0	8.0	9.8	11.8	
26/03/84	8.0	8.0	8.0	6.3	
02/04/84	8.7	8.5	8.6	13.8	8.8
03/04/84	22.8	27.3	25.8	24.6	24.6
04/04/84	43.8	48.6	46.4	44.0	42.2
05/04/84	16.8	18.6	15.0	16.2	18.0
14/04/84	4.6	5.5	4.7	5.4	4.5
15/04/84	8.6	8.5	9.2	9.4	9.3
18/04/84	20.6	21.9	20.2	17.4	22.6
19/04/84	12.1	12.6	10.8	14.0	12.6
20/04/84	78.4	82.8	82.4	86.2	81.4
22/04/84	5.5	3.2	3.4	2.9	5.5
23/04/84	10.7	14.6	12.0	13.4	11.0
26/04/84	6.5	7.7	8.7	7.2	6.9
19/05/84	27.1	29.6	29.3	30.2	28.8
20/05/84	11.0	11.4	11.2	8.9	11.6
23/05/84	25.3	29.4	27.3	25.4	28.6
24/05/84	16.8	18.0	17.3	16.1	18.2
25/05/84	14.2	15.6	14.4	13.9	14.4

Tabela A.2. Precipitação diária na Bacia Experimental de Sumé.

Data do evento	Precipitação (mm) no posto				
	49	50	51	52	57
17/07/84	23.4	22.2	24.6	21.2	24.6
25/08/84	26.4	29.2	26.4	27.4	28.8
30/08/84	26.6	33.0	27.6	31.4	28.8
25/01/85	28.2	35.4	32.2	28.0	30.6
27/01/85	7.8	5.2	7.6	7.6	7.2
03/02/85	14.4	10.4	12.0	17.2	13.8
04/02/85	13.6	15.6	14.8	14.6	13.2
05/02/85	36.2	35.0	32.8	32.4	37.8
10/02/85	93.6	94.8	92.8	93.4	96.8
11/02/85	39.8	40.2	35.8	45.2	41.4
12/02/85	9.2	8.2	8.2	9.4	9.2
13/02/85	31.2	31.6	28.4	27.4	32.6
14/02/85	5.1	5.8	5.4	5.4	5.4
16/02/85	5.2	6.4	5.2	2.6	5.4
17/02/85	37.8	39.2	39.0	45.4	40.2
18/02/85	52.2	43.2	47.2	47.2	52.2
19/02/85	47.6	45.2	44.0	42.4	47.8
20/02/85	32.8	34.4	29.4	19.6	34.8
21/02/85	9.8	10.8	9.6	10.6	10.2
27/02/85	30.2	29.6	32.8	40.8	30.4
02/03/85	9.0	10.2	9.8	11.2	8.4
03/03/85	10.4	9.8	9.8	10.2	10.8
04/03/85	20.6	22.1	21.6	22.4	21.2
18/03/85	20.8	19.0	19.6	19.6	19.8
19/03/85	23.0	24.2	23.8	22.4	24.2
23/03/85	31.6	38.6	36.2	30.0	31.2
24/03/85	19.8	16.6	13.4	17.0	17.2
25/03/85	4.2	3.6	2.8	2.8	3.8
26/03/85	161.2	176.4	161.8	163.6	163.8
27/03/85	2.2	2.0	2.0	4.4	2.4
29/03/85	8.0	9.8	8.0	6.2	8.4
30/03/85	20.8	20.8	19.0	18.8	21.8
31/03/85	13.4	17.0	15.8	14.9	14.6
01/04/85	22.0	22.6	21.6	19.0	23.0
03/04/85	6.0	5.8	5.6	6.2	5.2
04/04/85	18.4	18.4	17.2	15.8	17.8
05/04/85	4.2	5.2	4.4	3.8	5.0
06/04/85	14.0	11.5	13.6	20.4	12.8
07/04/85	6.8	6.8	5.4	3.6	7.0
08/04/85	31.2	33.4	27.8	28.2	31.4
10/04/85	15.8	16.4	15.8	16.4	16.2
11/04/85	18.2	19.2	17.8	19.7	18.8
12/04/85	46.4	46.8	43.4	45.2	46.8
14/04/85	28.0	39.6	32.8	27.8	28.6
15/04/85	2.8	2.8	2.6	2.4	2.6
22/04/85	27.3	29.2	28.2	27.4	27.2
24/04/85	24.4	22.8	23.4	21.0	24.0
26/04/85	74.2	66.6	63.8	68.2	73.4

Tabela A.2. Precipitação diária na Bacia Experimental de Sumé.

Data do evento	Precipitação (mm) no posto				
	49	50	51	52	57
27/04/85	3.2	3.2	3.2	3.2	2.4
29/04/85	19.8	29.6	20.6	18.6	21.4
03/05/85	5.3	4.6	4.2	1.8	5.0
04/05/85	4.4	5.4	5.2	4.6	4.2
08/05/85	5.0	4.8	5.2	5.2	5.4
05/06/85	33.8	34.2	35.2	37.8	33.6
11/06/85	38.8	44.4	39.8	41.0	39.4
12/06/85	13.5	10.5	11.9	8.8	13.4
13/07/85	12.0	11.8	23.6	11.4	12.2
07/12/85	25.8	26.0	25.8	28.6	26.2
14/12/85	47.2	45.2	45.2	46.2	48.2
02/01/86	14.8	6.8	12.0	12.2	11.4
05/02/86	8.4	8.6	8.6	8.2	8.4
06/02/86	8.2	8.8	8.6	9.0	8.0
07/02/86	5.8	6.0	6.2	9.6	5.6
12/02/86	88.6	86.5	84.6	81.6	91.6
13/02/86	30.2	28.4	30.6	32.2	30.0
26/02/86	32.2	33.2	32.4	34.2	33.6
28/02/86	37.2	36.2	38.8	40.2	36.4
02/03/86	18.0	17.6	16.4	17.4	18.2
03/03/86	10.0	10.0	10.8	12.8	10.0
04/03/86	10.6	9.0	10.0	9.2	10.4
05/03/86	12.6	14.0	12.8	14.2	13.2
08/03/86	32.4	36.0	35.2	29.4	33.2
13/03/86	52.4	54.0	53.6	54.2	53.2
21/03/86	128.2	127.3	128.5	133.0	137.2
22/03/86	19.0	19.0	16.4	17.2	19.4
23/03/86	4.2	4.2	4.3	4.0	3.6
30/03/86	12.0	11.6	11.4	12.2	11.6
07/04/86	51.6	52.6	52.0	53.6	53.0
08/04/86	4.2	4.8	5.2	5.4	4.0
09/04/86	26.2	27.3	28.6	27.2	26.5
13/04/86	8.2	8.8	8.6	8.6	8.8
14/04/86	8.6	9.0	8.8	8.9	9.0
15/04/86	8.0	7.4	7.8	8.6	8.4
21/04/86	33.8	33.6	34.2	36.8	34.0
22/04/86	10.2	9.8	10.4	10.6	10.6
30/04/86	45.6	46.8	45.8	48.3	47.6
06/05/86	18.8	19.2	19.0	19.8	19.6
12/06/86	14.4	15.0	14.6	15.2	13.8
16/07/86	29.0	29.4	29.2	30.0	25.6
20/07/86	13.2	13.8	14.2	14.0	13.8
24/11/86	24.2	25.0	24.6	25.2	26.6
07/02/87	11.0	11.6	11.0	12.4	11.4
08/02/87	32.8	28.6	28.6	27.2	33.8
12/02/87	9.8	11.2	8.0	7.8	10.2
13/02/87	3.4	2.2	3.0	3.0	3.4
02/03/87	8.4	10.8	10.6	12.0	9.8

Tabela B.2. Precipitação diária na Bacia Experimental de Sumé.

Data do evento	Precipitação (mm) no posto				
	49	50	51	52	57
03/03/87	41.2	41.0	39.0	36.8	42.8
10/03/87	14.8	16.0	16.0	17.2	16.8
12/03/87	4.6	4.8	4.6	6.4	4.6
15/03/87	24.6	25.8	26.2	32.8	26.4
28/03/87	62.2	62.8	63.4	64.6	64.8
04/04/87	3.9	5.7	3.8	4.6	4.6
02/05/87	19.4	19.2	19.0	19.4	21.2
01/06/87	5.4	2.5	4.5	3.6	4.5
06/06/87	3.7	4.7	4.2	4.6	3.2
28/06/87	24.8	23.6	24.6	24.8	26.6
29/06/87	4.1	5.5	5.5	5.6	5.3
04/07/87	4.6	5.0	5.2	5.2	5.2
09/07/87	23.6	26.2	27.6	27.8	26.6
20/01/88	24.2	21.8	21.6	30.4	25.2
14/02/88	72.0	67.2	69.6	74.8	72.8
15/02/88	30.6	32.8	31.2	35.2	30.6
23/02/88	11.8	12.2	12.6	12.6	11.8
24/02/88	49.4	49.8	50.8	56.2	52.4
25/02/88	15.6	16.0	16.4	20.6	16.0
02/03/88	20.2	22.8	19.0	19.6	21.6
09/03/88	16.4	15.6	14.4	15.2	15.6
11/03/88	44.2	49.2	45.2	42.2	47.0
12/03/88	4.2	5.4	4.7	4.6	4.4
14/03/88	13.6	14.0	13.8	14.2	13.2
15/03/88	30.2	32.0	30.4	31.6	32.2
19/03/88	6.6	8.2	7.3	7.2	7.0
21/03/88	24.4	24.6	22.6	24.4	25.0
23/03/88	2.3	1.8	2.2	1.8	2.0
24/03/88	20.9	22.2	22.2	23.4	22.0
05/04/88	22.0	24.8	23.4	16.6	23.8
08/04/88	17.8	18.0	15.4	16.8	14.2
12/04/88	4.0	3.5	2.8	3.5	4.1
13/04/88	30.4	27.4	31.0	30.4	29.6
15/04/88	6.8	7.4	6.9	6.8	7.6
19/04/88	22.6	23.2	23.2	22.8	23.0
20/04/88	4.6	5.6	6.2	6.2	5.0
22/04/88	29.4	31.0	29.6	25.8	31.0
30/04/88	16.0	14.8	13.8	13.6	16.0
06/05/88	15.0	16.4	16.4	17.6	14.8
23/06/88	32.0	34.6	31.6	39.6	33.8
09/07/88	55.2	57.2	54.4	53.4	55.4
13/07/88	10.2	10.0	9.4	11.0	11.0
16/07/88	5.6	5.8	5.5	5.6	6.0
25/07/88	4.2	4.4	4.2	4.3	4.0

Tabela A.3. Pesos para cálculo da precipitação média.

Microbacia	Peso para o posto				
	49	50	51	52	57
1	0,025	0,025	0,025	0,900	0,025
2	0,025	0,025	0,025	0,900	0,025
3	0,100	0,100	0,600	0,100	0,100
4	0,200	0,100	0,400	0,100	0,200

ANEXO B

RESULTADOS DA MODELAGEM DO MODIBI

A seguir estão listados os resultados das simulações com o modelo MODIBI para cada conjunto de parâmetros calibrados. Notação utilizada:

- Prec - altura de precipitação no evento,
- Ag_i - estoque de água no solo no início do dia,
- Ag_f - estoque de água no solo no fim do dia,
- Evap - evapotranspiração real,
- Fuga - fuga lateral e profunda,
- Qobs - lâmina escoada observada,
- Ect - lâmina total escoada calculada pelo modelo,
- Ec - componente da lâmina total escoada Ect,
- Rs - componente da lâmina total escoada Ect.

B.1 - MICROBACIA 1

Tabela B.1. Resultados (em mm) da simulação para a microbacia 1 no período 1982-1988.

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs
1982									
2 5	70.2	45.0	66.4	3.1	43.2	0.7	2.6	0.0	2.6
1983									
--									
1984									
11 3	33.6	19.0	43.3	6.1	3.3	0.2	0.0	0.0	0.0
20 4	85.7	57.3	66.4	5.1	66.4	4.7	5.2	0.0	5.2
1985									
10 2	93.5	41.0	66.4	5.0	58.8	6.7	4.3	0.0	4.3
11 2	44.6	66.4	66.4	5.0	37.6	0.0	2.0	0.0	2.0
13 2	27.8	66.4	66.4	5.0	22.5	0.0	0.3	0.0	0.3
17 2	44.8	59.5	66.4	5.0	31.6	0.1	1.3	0.0	1.3
18 2	47.4	66.4	66.4	5.0	40.1	9.3	2.2	0.0	2.2
27 2	39.8	44.8	66.4	5.0	13.2	0.1	0.0	0.0	0.0
8 4	28.5	66.4	66.4	3.5	24.5	0.0	0.5	0.0	0.5
12 4	45.3	66.4	66.4	3.5	39.6	3.5	2.2	0.0	2.2
14 4	28.2	63.8	66.4	3.5	21.8	1.0	0.2	0.0	0.2
24 4	21.3	63.7	66.4	3.5	15.1	0.4	0.0	0.0	0.0
26 4	68.3	62.9	66.4	3.5	57.1	2.3	4.1	0.0	4.1
29 4	19.0	62.3	66.4	3.5	11.3	0.1	0.0	0.0	0.0
1986									
12 2	82.2	8.9	66.4	4.8	19.9	0.1	0.0	0.0	0.0
13 2	32.0	66.4	66.4	4.8	26.5	0.0	0.7	0.0	0.7
8 3	29.9	61.4	66.4	3.6	21.2	0.0	0.1	0.0	0.1
13 3	54.1	61.7	66.4	3.6	43.2	0.2	2.6	0.0	2.6
21 3	132.7	48.8	66.4	3.6	86.0	25.5	25.5	18.1	7.3
9 4	27.2	66.4	66.4	3.5	23.4	0.0	0.4	0.0	0.4
21 4	36.5	51.8	66.4	3.5	18.5	0.5	0.0	0.0	0.0
30 4	48.1	57.3	66.4	3.5	34.0	2.0	1.6	0.0	1.6
1987									
--									
1988									
15 2	34.8	61.7	66.4	7.1	22.7	0.0	0.3	0.0	0.3
11 3	42.6	41.4	66.4	4.5	13.1	0.1	0.0	0.0	0.0
13 4	30.3	47.0	66.4	3.4	7.5	0.1	0.0	0.0	0.0
22 4	26.2	64.5	66.4	3.4	20.8	0.0	0.1	0.0	0.1

X=0,902	DEFCD=66,4mm			HO=80,3mm		Q=0,100		FN=20,0mm	

B.2 - MICROBACIA 2

Tabela B.2. Resultados (em mm) da simulação para a microbacia 2 no período 1982-1988 (a).

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs
1982									
2 5	70.2	52.9	105.1	3.1	14.9	0.8	0.0	0.0	0.0
1983									
--									
1984									
20 4	85.7	81.0	105.1	5.1	38.1	18.1	18.3	0.0	18.3
1985									
10 2	93.5	44.8	105.1	5.0	23.4	4.7	4.8	0.0	4.8
13 2	27.8	105.1	105.1	5.0	20.6	0.8	2.2	0.0	2.2
17 2	44.8	97.7	105.1	5.0	25.6	5.6	6.8	0.0	6.8
20 2	20.9	105.1	105.1	5.0	15.9	3.8	0.0	0.0	0.0
21 2	10.6	105.1	105.1	5.0	5.6	0.7	0.0	0.0	0.0
27 2	39.8	82.3	105.1	5.0	11.9	1.0	0.0	0.0	0.0
4 3	22.3	105.1	105.1	3.9	18.3	0.0	0.1	0.0	0.1
31 3	14.9	105.1	105.1	3.9	11.0	0.2	0.0	0.0	0.0
4 4	16.0	103.2	105.1	3.5	10.6	0.2	0.0	0.0	0.0
8 4	28.5	104.9	105.1	3.5	21.6	8.8	3.1	0.0	3.1
12 4	45.3	105.1	105.1	3.5	30.5	27.5	11.3	0.0	11.3
14 4	28.2	102.4	105.1	3.5	20.2	6.1	1.8	0.0	1.8
24 4	21.3	101.9	105.1	3.5	14.5	0.7	0.0	0.0	0.0
29 4	19.0	100.8	105.1	3.5	11.2	0.3	0.0	0.0	0.0
1986									
12 2	82.2	10.9	75.9	4.8	12.3	0.1	0.0	0.0	0.0
8 3	29.9	100.0	105.1	3.6	19.8	0.2	1.4	0.0	1.4
13 3	54.1	99.7	105.1	3.6	32.2	2.3	12.9	0.0	12.9
21 3	132.7	86.3	105.1	3.6	58.9	51.7	51.3	13.9	37.5
7 4	53.5	81.6	105.1	3.5	22.6	2.3	4.0	0.0	4.0
21 4	36.5	89.9	105.1	3.5	17.8	0.3	0.0	0.0	0.0
30 4	48.1	94.4	105.1	3.5	26.4	1.2	7.5	0.0	7.5
1987									
--									
1988									
15 3	31.6	105.1	105.1	4.5	22.8	1.7	4.3	0.0	4.3
22 4	26.2	103.1	105.1	3.4	19.6	0.0	1.3	0.0	1.3

X=0,850	DEFCO=105,1mm			HQ=76,5mm		Q=0,479		FN=18,2mm	

Tabela B.3. Resultados (em mm) da simulação para a microba-
cia 2 no período 1982-1988 (b).

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs
1982									
2 5	70.2	58.5	110.0	3.1	15.1	0.8	0.6	0.0	0.6
1983									
--									
1984									
20 4	85.7	91.4	110.0	5.1	44.7	18.1	17.3	0.0	17.3
1985									
10 2	93.5	50.0	110.0	5.0	23.2	4.7	5.2	0.0	5.2
13 2	27.8	110.0	110.0	5.0	19.6	0.8	3.2	0.0	3.2
17 2	44.8	103.1	110.0	5.0	26.1	5.6	6.8	0.0	6.8
20 2	20.9	110.0	110.0	5.0	15.2	3.8	0.7	0.0	0.7
21 2	10.6	110.0	110.0	5.0	5.6	0.7	0.0	0.0	0.0
27 2	39.8	87.1	110.0	5.0	11.8	1.0	0.0	0.0	0.0
4 3	22.3	110.0	110.0	3.9	16.8	0.0	1.6	0.0	1.6
31 3	14.9	110.0	110.0	3.9	11.0	0.2	0.0	0.0	0.0
4 4	16.0	108.5	110.0	3.5	11.0	0.2	0.0	0.0	0.0
8 4	28.5	110.0	110.0	3.5	21.0	8.8	4.0	0.0	4.0
12 4	45.3	110.0	110.0	3.5	31.8	27.5	10.0	0.0	10.0
14 4	28.2	107.4	110.0	3.5	19.2	6.1	2.9	0.0	2.9
24 4	21.3	107.3	110.0	3.5	14.7	0.7	0.4	0.0	0.4
29 4	19.0	105.9	110.0	3.5	11.4	0.3	0.0	0.0	0.0
1986									
12 2	82.2	13.5	83.5	4.8	7.4	0.1	0.0	0.0	0.0
8 3	29.9	105.0	110.0	3.6	18.7	0.2	2.6	0.0	2.6
13 3	54.1	105.1	110.0	3.6	34.2	2.3	11.4	0.0	11.4
21 3	132.7	91.4	110.0	3.6	58.4	51.7	52.1	27.1	25.0
7 4	53.5	87.8	110.0	3.5	22.8	2.3	5.0	0.0	5.0
21 4	36.5	94.8	110.0	3.5	16.5	0.3	1.4	0.0	1.4
30 4	48.1	100.1	110.0	3.5	27.3	1.2	7.5	0.0	7.5
1987									
--									
1988									
15 3	31.6	110.0	110.0	4.5	22.4	1.7	4.7	0.0	4.7
22 4	26.2	108.1	110.0	3.4	18.4	0.0	2.5	0.0	2.5

X=0,910	DEFCO=110,0mm			HO=71,5mm		Q=0,360		FN=14,0mm	

B:3 - MICROBACIA 3.

Tabela B.4. Resultados (em mm) da simulação para a microbacia 3 no período 1982-1983.

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Obs	Ect	Ec	Rs	
1982										
8 2	15.4	0.0	8.7	5.8	0.8	0.0	0.1	0.0	0.1	
31 3	16.7	0.0	9.5	6.3	0.9	0.0	0.1	0.0	0.1	
15 4	40.6	1.1	34.4	5.0	2.1	1.1	0.2	0.0	0.2	
23 4	43.7	13.0	34.5	5.0	15.5	6.7	1.7	0.0	1.7	
2 5	70.2	23.3	34.5	3.1	43.0	12.9	12.9	8.2	4.7	
5 5	5.3	28.6	30.5	3.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	
12 5	6.9	26.8	30.3	3.1	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	
1983										
27 1	16.7	0.0	9.4	6.3	0.9	0.0	0.1	0.0	0.1	
3 2	16.1	4.8	15.2	4.8	0.9	0.0	0.1	0.0	0.1	
5 2	14.2	14.2	22.8	4.8	0.8	0.0	0.1	0.0	0.1	
7 2	45.1	27.5	34.5	4.8	30.0	0.5	3.3	0.0	3.3	
23 3	16.6	0.2	11.0	4.9	0.9	0.0	0.1	0.0	0.1	
27 3	8.7	10.7	14.1	4.9	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	
6 4	26.4	4.0	24.8	4.1	1.4	1.5	0.1	0.0	0.1	
X=0,943		DEFCO=34,5mm		HQ=43,7mm		Q=0,099		FN=0,3mm		

Tabela B.5. Resultados (em mm) da simulação para a microba-
cia 3 no período 1984-1986.

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs	
1984										
3	4	25.4	5.0	20.0	5.1	3.9	3.2	1.4	0.0	1.4
4	4	45.7	20.0	20.0	5.1	19.3	9.3	21.3	8.3	13.0
5	4	16.0	20.0	20.0	5.1	7.1	3.7	3.8	0.0	3.8
15	4	9.1	4.1	7.6	5.1	0.5	2.2	0.0	0.0	0.0
18	4	20.4	5.7	20.0	5.1	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0
19	4	11.6	20.0	20.0	5.1	4.5	3.8	1.9	0.0	1.9
20	4	82.3	20.0	20.0	5.1	20.3	39.4	56.9	43.1	13.8
23	4	12.2	13.8	20.0	5.1	0.9	2.3	0.0	0.0	0.0
26	4	8.0	12.1	14.6	5.1	0.4	0.9	0.0	0.0	0.0
19	5	29.2	1.7	20.0	3.2	5.2	2.2	2.4	0.0	2.4
20	5	11.0	20.0	20.0	3.2	5.3	2.6	2.5	0.0	2.5
23	5	27.2	17.3	20.0	3.2	13.0	5.1	8.3	0.0	8.3
24	5	17.3	20.0	20.0	3.2	8.9	2.0	5.2	0.0	5.2
25	5	14.4	20.0	20.0	3.2	7.2	0.2	3.9	0.0	3.9
17	7	23.9	1.8	20.0	3.6	2.1	0.2	0.0	0.0	0.0
25	8	27.0	6.3	20.0	4.8	5.7	0.2	2.8	0.0	2.8
30	8	28.5	8.8	20.0	4.8	8.0	1.9	4.5	0.0	4.5
1985										
25	1	31.5	0.0	20.0	6.0	4.0	0.2	1.5	0.0	1.5
27	1	7.4	15.3	16.4	6.0	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0
4	2	14.6	9.3	18.2	5.0	0.7	3.8	0.0	0.0	0.0
5	2	33.8	18.2	20.0	5.0	16.2	16.8	10.7	0.0	10.7
10	2	93.5	6.7	20.0	5.0	20.6	54.6	54.5	40.5	14.1
11	2	38.1	20.0	20.0	5.0	19.0	9.2	14.0	1.2	12.9
12	2	8.5	20.0	20.0	5.0	2.8	0.0	0.6	0.0	0.6
13	2	29.3	20.0	20.0	5.0	14.7	10.7	9.6	0.0	9.6
16	2	5.1	15.3	15.1	5.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
17	2	39.7	15.1	20.0	5.0	17.8	9.0	11.9	0.0	11.9
18	2	47.8	20.0	20.0	5.0	19.3	32.5	23.5	10.4	13.1
19	2	44.7	20.0	20.0	5.0	19.2	13.9	20.4	7.4	13.0
20	2	29.8	20.0	20.0	5.0	15.0	9.8	9.8	0.0	9.8
21	2	9.9	20.0	20.0	5.0	3.6	0.9	1.2	0.0	1.2
27	2	32.8	4.7	20.0	5.0	8.0	12.7	4.5	0.0	4.5
2	3	9.8	12.1	17.5	3.9	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0
3	3	10.0	17.5	20.0	3.9	2.9	0.9	0.7	0.0	0.7
4	3	21.6	20.0	20.0	3.9	10.9	6.0	6.8	0.0	6.8
19	3	23.7	16.4	20.0	3.9	10.1	7.1	6.1	0.0	6.1
23	3	34.9	13.4	20.0	3.9	14.8	0.9	9.6	0.0	9.6
24	3	15.1	20.0	20.0	3.9	7.2	0.0	4.0	0.0	4.0
8	5	5.2	9.4	11.1	3.3	0.3	0.9	0.0	0.0	0.0
5	6	35.1	0.2	20.0	2.9	7.9	4.6	4.5	0.0	4.5
11	6	40.2	9.1	20.0	2.9	15.9	21.7	10.5	0.0	10.5
12	6	11.8	20.0	20.0	2.9	5.9	3.2	3.0	0.0	3.0
X=0,950		DEFCO=20,0mm		HO=30,0mm		Q=0,430		FN=2,0mm		

Tabela B.5. Resultados (em mm) da simulação para a microba-
cia 3 no período 1984-1986 (cont.)

Data	Prec	Hg_i	Hg_f	Evap	Fuga	Obs	Ect	Ec	Rs	
1986										
2	1	11.7	0.0	4.6	6.5	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0
6	2	8.6	4.7	8.0	4.8	0.4	1.7	0.0	0.0	0.0
12	2	85.6	3.1	20.0	4.8	20.4	44.9	43.5	29.6	13.9
13	2	30.4	20.0	20.0	4.8	15.5	4.6	10.1	0.0	10.1
26	2	32.8	0.7	20.0	4.8	5.8	1.1	2.9	0.0	2.9
28	2	38.3	15.2	20.0	4.8	17.2	7.8	11.5	0.0	11.5
2	3	17.0	16.4	20.0	3.6	6.4	0.3	3.4	0.0	3.4
3	3	10.8	20.0	20.0	3.6	5.0	1.1	2.2	0.0	2.2
4	3	9.9	20.0	20.0	3.6	4.5	2.5	1.8	0.0	1.8
5	3	13.1	20.0	20.0	3.6	6.3	5.0	3.2	0.0	3.2
8	3	34.2	15.1	20.0	3.6	15.5	17.4	10.2	0.0	10.2
21	3	129.7	6.8	20.0	3.6	21.7	94.2	91.2	76.4	14.8
24	3	3.5	20.0	19.7	3.6	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0
30	3	11.6	10.8	18.2	3.6	0.6	2.2	0.0	0.0	0.0
7	4	52.3	6.3	20.0	3.5	19.5	22.6	15.7	2.5	13.2
9	4	27.9	20.0	20.0	3.5	14.8	8.6	9.7	0.0	9.7
13	4	8.6	11.3	16.1	3.5	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0
14	4	8.8	16.1	20.0	3.5	1.4	0.4	0.0	0.0	0.0
15	4	7.9	20.0	20.0	3.5	3.4	1.4	1.1	0.0	1.1
21	4	34.3	8.5	20.0	3.5	11.9	18.3	7.5	0.0	7.5
22	4	10.4	20.0	20.0	3.5	4.8	4.2	2.1	0.0	2.1
30	4	46.3	15.8	20.0	3.5	19.3	28.8	19.4	6.3	13.0
6	5	19.1	8.6	20.0	3.5	3.3	0.2	1.0	0.0	1.0
16	7	28.9	0.1	20.0	3.6	3.9	0.5	1.5	0.0	1.5
20	7	14.0	11.0	20.0	3.6	1.4	1.3	0.0	0.0	0.0
X=0,950		DEFCD=20,0mm		HD=30,0mm		Q=0,430		FN=2,0mm		

Tabela B.6. Resultados (em mm) da simulação para a microba-
cia 3 no período 1987-1988.

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs	
1987										
4 1	13.1	0.0	5.6	6.2	0.7	0.0	0.6	0.0	0.6	
5 2	10.4	0.0	3.1	6.2	0.6	0.0	0.4	0.0	0.4	
7 2	11.2	0.7	4.6	6.2	0.7	0.2	0.5	0.0	0.5	
12 2	8.7	0.1	1.7	6.2	0.6	0.1	0.3	0.0	0.3	
2 3	10.5	0.0	4.6	4.9	0.6	0.1	0.4	0.0	0.4	
10 3	16.1	0.0	8.0	4.9	1.4	0.3	1.8	0.0	1.8	
12 3	4.8	6.2	5.6	4.9	0.4	0.4	0.1	0.0	0.1	
15 3	26.7	1.6	8.0	4.9	5.7	14.0	9.7	0.0	9.7	
21 3	5.2	0.1	0.1	4.7	0.4	0.0	0.1	0.0	0.1	
28 3	63.5	0.0	8.0	4.9	18.3	27.7	32.3	0.0	32.3	
26 4	7.0	0.0	2.0	4.3	0.5	0.0	0.2	0.0	0.2	
2 5	19.3	0.0	8.0	5.0	2.5	2.3	3.8	0.0	3.8	
28 6	24.7	0.0	8.0	3.8	4.9	1.2	8.1	0.0	8.1	
29 6	5.4	8.0	8.0	3.8	0.8	1.4	0.8	0.0	0.8	
4 7	5.1	1.1	1.9	3.8	0.4	0.0	0.1	0.0	0.1	
9 7	27.0	0.3	8.0	3.8	5.8	9.8	9.8	0.0	9.8	
1988										
12 1	7.5	0.0	0.0	6.8	0.5	0.0	0.2	0.0	0.2	
20 1	23.1	0.0	8.0	7.1	3.1	5.7	4.9	0.0	4.9	
23 2	12.4	0.0	4.1	7.1	0.7	1.6	0.5	0.0	0.5	
25 2	16.7	8.0	8.0	7.1	3.7	6.5	6.0	0.0	6.0	
2 3	19.8	0.0	8.0	4.5	2.9	4.6	4.4	0.0	4.4	
9 3	14.9	0.1	8.0	4.5	1.1	3.4	1.3	0.0	1.3	
12 3	4.7	8.0	7.7	4.5	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	
14 3	13.8	3.4	8.0	4.5	1.9	5.7	2.8	0.0	2.8	
19 3	7.3	0.7	2.7	4.5	0.5	1.7	0.2	0.0	0.2	
24 3	22.2	2.4	8.0	4.5	4.6	13.5	7.5	0.0	7.5	
5 4	22.8	0.0	8.0	3.4	4.3	10.6	7.1	0.0	7.1	
15 4	7.0	4.6	7.6	3.4	0.5	0.0	0.2	0.0	0.2	
19 4	23.1	3.1	8.0	3.4	5.5	9.6	9.3	0.0	9.3	
20 4	5.9	8.0	8.0	3.4	1.2	1.8	1.4	0.0	1.4	
22 4	29.5	5.9	8.0	3.4	8.8	13.0	15.2	0.0	15.2	
30 4	14.3	0.6	8.0	3.4	1.5	5.4	2.0	0.0	2.0	
6 5	16.2	0.5	8.0	3.6	2.1	7.8	3.0	0.0	3.0	
23 6	33.0	0.0	8.0	4.0	7.7	14.4	13.3	0.0	13.3	
24 6	4.7	8.0	8.0	4.0	0.5	0.0	0.2	0.0	0.2	
13 7	9.9	0.5	4.5	4.9	0.6	0.4	0.4	0.0	0.4	
15 7	9.4	2.1	5.7	4.9	0.6	0.0	0.3	0.0	0.3	
16 7	5.6	5.7	5.9	4.9	0.5	0.2	0.1	0.0	0.1	

X=0,900	DEFCD=8,0mm			HO=44,3mm		Q=0,644		FN=0,4mm		

B.4 - MICROBACIA 4

Tabela B.7. Resultados (em mm) da simulação para a microbacia 4 no período 1982-1983 (a).

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs	
1982										
15 4	40.6	3.9	34.1	5.0	4.2	1.1	1.2	0.0	1.2	
23 4	43.7	24.4	57.3	5.0	4.5	4.5	1.3	0.0	1.3	
2 5	70.2	49.8	87.5	3.1	19.4	9.9	10.0	0.0	10.0	
1983										
7 2	44.9	26.4	60.5	4.8	4.6	0.3	1.4	0.0	1.4	
6 4	26.2	12.6	31.1	4.1	3.0	0.1	0.5	0.0	0.5	
X=0,866		DEFCO=87,5mm		HO=20,0mm		Q=0,369		FN=2,2mm		

Tabela B.8. Resultados (em mm) da simulação para a microbacia 4 no período 1982-1983 (b).

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs	
1982										
8 2	15.4	0.0	8.0	5.8	1.5	0.0	0.1	0.0	0.1	
17 2	14.0	3.0	9.7	5.8	1.4	0.0	0.1	0.0	0.1	
31 3	16.7	0.0	8.6	6.3	1.7	0.0	0.1	0.0	0.1	
15 4	40.6	1.6	32.9	5.0	3.9	1.1	0.4	0.0	0.4	
23 4	43.7	15.8	44.4	5.0	9.0	4.5	1.1	0.0	1.1	
1 5	11.4	23.9	31.0	3.1	1.1	0.0	0.1	0.0	0.1	
2 5	70.2	31.0	44.4	3.1	43.8	9.9	9.9	4.2	5.6	
12 5	6.9	35.7	38.7	3.1	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	
1983										
27 1	16.6	0.0	8.5	6.3	1.6	0.0	0.1	0.0	0.1	
3 2	15.2	5.2	14.0	4.8	1.5	0.0	0.1	0.0	0.1	
5 2	14.1	13.6	21.4	4.8	1.4	0.0	0.1	0.0	0.1	
6 2	10.2	21.4	25.7	4.8	1.0	0.0	0.1	0.0	0.1	
7 2	44.9	25.7	44.4	4.8	19.0	0.3	2.4	0.0	2.4	
17 2	9.2	18.7	22.1	4.8	0.9	0.0	0.1	0.0	0.1	
23 3	16.6	0.8	10.7	4.9	1.6	0.0	0.1	0.0	0.1	
6 4	26.2	5.1	24.4	4.1	2.6	0.1	0.3	0.0	0.3	
26 12	9.3	0.0	0.0	8.3	0.9	0.0	0.1	0.0	0.1	
X=0,892		DEFCO=44,4mm		HO=41,9mm		Q=0,115		FN=0,5mm		

Tabela B.9. Resultados (em mm) da simulação para a microba-
cia 4 no período 1984-1986 (a).

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs	
1984										
3	4	25.0	9.0	26.4	5.1	2.3	0.8	0.2	0.0	0.2
4	4	45.0	26.4	35.0	5.1	21.3	5.4	10.0	0.0	10.0
5	4	16.4	35.0	35.0	5.1	8.1	1.1	3.2	0.0	3.2
19	4	11.9	27.4	33.0	5.1	1.2	1.6	0.0	0.0	0.0
20	4	81.8	33.0	35.0	5.1	30.5	30.2	44.2	29.5	14.7
19	5	28.9	5.1	27.9	3.2	2.6	0.0	0.3	0.0	0.3
23	5	27.2	32.3	35.0	3.2	14.7	0.1	6.6	0.0	6.6
25	5	14.4	35.0	35.0	3.2	8.1	0.0	3.1	0.0	3.1
17	7	23.8	3.7	21.5	3.6	2.3	0.1	0.1	0.0	0.1
25	8	27.3	7.7	27.4	4.8	2.5	0.1	0.2	0.0	0.2
30	8	28.6	17.6	35.0	4.8	4.9	0.4	1.5	0.0	1.5
1985										
25	1	31.0	0.0	21.9	6.0	2.7	0.0	0.4	0.0	0.4
4	2	14.3	13.7	21.5	5.0	1.4	0.9	0.0	0.0	0.0
5	2	34.7	21.5	35.0	5.0	11.4	11.4	4.8	0.0	4.8
10	2	94.0	19.4	35.0	5.0	31.3	55.4	42.1	27.0	15.1
11	2	39.1	35.0	35.0	5.0	23.2	5.3	10.9	0.0	10.9
12	2	8.7	35.0	35.0	5.0	3.1	0.0	0.6	0.0	0.6
13	2	30.0	35.0	35.0	5.0	17.2	7.0	7.8	0.0	7.8
17	2	39.7	29.7	35.0	5.0	20.1	4.0	9.3	0.0	9.3
18	2	48.8	35.0	35.0	5.0	28.3	23.9	15.5	1.9	13.6
19	2	45.4	35.0	35.0	5.0	27.3	10.5	13.0	0.0	13.0
20	2	30.7	35.0	35.0	5.0	17.6	8.6	8.0	0.0	8.0
21	2	10.0	35.0	35.0	5.0	4.0	0.3	1.0	0.0	1.0
27	2	32.3	16.1	35.0	5.0	6.2	6.1	2.2	0.0	2.2
3	3	10.2	31.3	35.0	3.9	2.4	0.0	0.2	0.0	0.2
4	3	21.5	35.0	35.0	3.9	12.3	1.5	5.3	0.0	5.3
19	3	23.6	22.2	35.0	3.9	5.2	2.2	1.7	0.0	1.7
23	3	33.9	28.0	35.0	3.9	15.9	0.1	7.2	0.0	7.2
24	3	16.1	35.0	35.0	3.9	8.7	0.0	3.5	0.0	3.5
5	6	34.8	2.6	31.0	2.9	3.0	3.5	0.5	0.0	0.5
11	6	40.1	20.0	35.0	2.9	15.3	9.8	6.9	0.0	6.9
12	6	12.1	35.0	35.0	2.9	6.7	4.2	2.4	0.0	2.4
13	7	16.6	5.8	17.3	3.4	1.7	0.2	0.0	0.0	0.0
7	12	26.2	0.0	17.8	5.8	2.4	3.5	0.2	0.0	0.2
X=0,900		DEFCO=35,0mm		HO=37,0mm		Q=0,340		FN=2,0mm		

Tabela B.9. Resultados (em mm) da simulação para a microba-
cia 4 no período 1984-1986 (a) (cont.).

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Obs	Ect	Ec	Rs	
1986										
6 2	8.5	4.1	7.0	4.8	0.9	1.0	0.0	0.0	0.0	
13 2	30.3	35.0	35.0	4.8	17.5	3.5	8.0	0.0	8.0	
26 2	32.9	6.0	30.8	4.8	2.9	5.3	0.4	0.0	0.4	
28 2	37.9	26.6	35.0	4.8	16.9	9.7	7.7	0.0	7.7	
2 3	17.3	31.4	35.0	3.6	7.3	0.2	2.8	0.0	2.8	
3 3	10.6	35.0	35.0	3.6	5.3	0.4	1.7	0.0	1.7	
4 3	10.0	35.0	35.0	3.6	4.9	5.6	1.5	0.0	1.5	
5 3	13.1	35.0	35.0	3.6	7.0	4.0	2.6	0.0	2.6	
8 3	33.7	29.9	35.0	3.6	17.2	17.6	7.8	0.0	7.8	
13 3	53.4	31.2	35.0	3.6	28.6	19.7	17.4	3.7	13.7	
21 3	130.5	18.9	35.0	3.6	33.7	76.6	77.1	60.8	16.3	
22 3	17.9	35.0	35.0	3.6	10.1	0.7	4.2	0.0	4.2	
24 3	3.6	35.0	34.6	3.6	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	
7 4	52.3	17.5	35.0	3.5	21.4	13.4	10.0	0.0	10.0	
9 4	27.4	35.0	35.0	3.5	16.5	5.6	7.5	0.0	7.5	
15 4	8.0	34.4	35.0	3.5	3.3	0.9	0.7	0.0	0.7	
21 4	34.3	21.8	35.0	3.5	12.3	15.8	5.3	0.0	5.3	
22 4	10.4	35.0	35.0	3.5	5.3	3.5	1.7	0.0	1.7	
30 4	46.5	27.4	35.0	3.5	24.1	31.9	11.4	0.0	11.4	
6 5	19.2	21.7	35.0	3.5	2.3	0.0	0.2	0.0	0.2	
16 7	28.5	0.9	23.0	3.6	2.6	0.0	0.3	0.0	0.3	
24 11	25.0	0.0	16.1	6.4	2.3	0.0	0.2	0.0	0.2	

X=0,900	DEFCO=35,0mm			HO=37,0mm		Q=0,340		FN=2,0mm		

Tabela B.10. Resultados (em mm) da simulação para a microba-
cia 4 no período 1984-1986 (b).

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs	
1984										
3	4	25.0	3.4	9.6	5.1	11.2	0.8	2.5	0.0	2.5
4	4	45.0	9.6	9.6	5.1	27.6	5.4	12.3	5.3	7.0
5	4	16.4	9.6	9.6	5.1	9.3	1.1	2.0	0.0	2.0
19	4	11.9	9.6	9.6	5.1	5.8	1.6	1.0	0.0	1.0
20	4	81.8	9.6	9.6	5.1	29.9	30.2	46.8	39.2	7.6
19	5	28.9	0.3	9.6	3.2	13.4	0.0	3.1	0.0	3.1
20	5	11.0	9.6	9.6	3.2	6.6	0.0	1.2	0.0	1.2
23	5	27.2	6.9	9.6	3.2	17.2	0.1	4.1	0.0	4.1
25	5	14.4	9.6	9.6	3.2	9.2	0.0	1.9	0.0	1.9
17	7	23.8	0.2	9.6	3.6	9.0	0.1	1.9	0.0	1.9
25	8	27.3	2.4	9.6	4.8	12.4	0.1	2.8	0.0	2.8
30	8	28.6	1.2	9.6	4.8	12.6	0.4	2.8	0.0	2.8
1985										
25	1	31.0	0.0	9.6	6.0	12.6	0.0	2.8	0.0	2.8
4	2	14.3	7.2	9.6	5.0	5.8	0.9	1.0	0.0	1.0
5	2	34.7	9.6	9.6	5.0	23.8	11.4	5.9	0.0	5.9
10	2	94.0	0.6	9.6	5.0	30.6	55.4	49.3	41.5	7.8
11	2	39.1	9.6	9.6	5.0	27.2	5.3	6.9	0.0	6.9
12	2	8.7	9.6	9.6	5.0	3.4	0.0	0.3	0.0	0.3
13	2	30.0	9.6	9.6	5.0	20.1	7.0	4.9	0.0	4.9
17	2	39.7	4.5	9.6	5.0	23.7	4.0	5.9	0.0	5.9
18	2	48.8	9.6	9.6	5.0	27.8	23.9	15.9	8.9	7.0
19	2	45.4	9.6	9.6	5.0	27.6	10.5	12.8	5.8	7.0
20	2	30.7	9.6	9.6	5.0	20.6	8.6	5.0	0.0	5.0
21	2	10.0	9.6	9.6	5.0	4.4	0.3	0.6	0.0	0.6
27	2	32.3	0.2	9.6	5.0	14.5	6.1	3.4	0.0	3.4
3	3	10.2	7.6	9.6	3.9	3.8	0.0	0.4	0.0	0.4
4	3	21.5	9.6	9.6	3.9	14.3	1.5	3.3	0.0	3.3
18	3	19.8	0.0	9.6	3.9	5.4	0.0	0.9	0.0	0.9
19	3	23.6	9.6	9.6	3.9	15.9	2.2	3.8	0.0	3.8
23	3	33.9	3.7	9.6	3.9	19.4	0.1	4.7	0.0	4.7
24	3	16.1	9.6	9.6	3.9	10.1	0.0	2.2	0.0	2.2
5	6	34.8	0.0	9.6	2.9	18.0	3.5	4.3	0.0	4.3
11	6	40.1	1.6	9.6	2.9	23.3	9.8	5.8	0.0	5.8
12	6	12.1	9.6	9.6	2.9	7.7	4.2	1.5	0.0	1.5
13	7	16.6	0.0	9.6	3.4	3.3	0.2	0.3	0.0	0.3
7	12	26.2	0.0	9.6	5.8	9.0	3.5	1.9	0.0	1.9
X=0,921		DEFCO=9,6mm		HO=31,0mm		Q=0,215		FN=2,2mm		

Tabela B.10. Resultados (em mm) da simulação para a microba-
cia 4 no período 1984-1986 (b) (cont.).

Data	Prec	Hg_i	Hg_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs
1986									
6 2	8.5	3.5	6.5	4.8	0.7	1.0	0.0	0.0	0.0
13 2	30.3	9.6	9.6	4.8	20.5	3.5	5.0	0.0	5.0
26 2	32.9	0.0	9.6	4.8	15.0	5.3	3.5	0.0	3.5
28 2	37.9	4.8	9.6	4.8	22.7	9.7	5.6	0.0	5.6
2 3	17.3	6.0	9.6	3.6	8.4	0.2	1.7	0.0	1.7
3 3	10.6	9.6	9.6	3.6	6.0	0.4	1.0	0.0	1.0
4 3	10.0	9.6	9.6	3.6	5.5	5.6	0.9	0.0	0.9
5 3	13.1	9.6	9.6	3.6	7.9	4.0	1.6	0.0	1.6
8 3	33.7	5.0	9.6	3.6	20.5	17.6	5.0	0.0	5.0
13 3	53.4	8.5	9.6	3.6	28.1	19.7	20.6	13.5	7.1
21 3	130.5	1.1	9.6	3.6	32.9	76.6	85.5	77.1	8.4
22 3	17.9	9.6	9.6	3.6	11.7	0.7	2.6	0.0	2.6
24 3	3.6	9.6	9.3	3.6	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0
7 4	52.3	0.7	9.6	3.5	28.1	13.4	11.9	4.9	7.1
9 4	27.4	9.6	9.6	3.5	18.3	5.6	4.7	0.0	4.7
14 4	8.8	7.0	9.6	3.5	2.6	0.1	0.1	0.0	0.1
15 4	8.0	9.6	9.6	3.5	4.0	0.9	0.5	0.0	0.5
21 4	34.3	1.5	9.6	3.5	18.3	15.8	4.4	0.0	4.4
22 4	10.4	9.6	9.6	3.5	5.9	3.5	1.0	0.0	1.0
30 4	46.5	9.6	9.6	3.5	27.7	31.9	15.3	8.3	7.0
6 5	19.2	1.5	9.6	3.5	6.5	0.0	1.2	0.0	1.2
16 7	28.5	0.0	9.6	3.6	12.5	0.0	2.8	0.0	2.8
20 7	13.9	2.3	9.6	3.6	2.9	0.1	0.2	0.0	0.2
24 11	25.0	0.0	9.6	6.4	7.6	0.0	1.5	0.0	1.5

X=0,921	DEFCO=9,6mm			HO=31,0mm		Q=0,215		FN=2,2mm	

Tabela B.11. Resultados (em mm) da simulação para a microba-
cia 4 no período 1987-1988.

Data	Prec	Ag_i	Ag_f	Evap	Fuga	Qobs	Ect	Ec	Rs
1987									
4 1	13.0	0.0	5.5	6.2	0.8	0.0	0.5	0.0	0.5
5 2	10.2	0.0	3.0	6.2	0.7	0.0	0.3	0.0	0.3
7 2	11.3	1.3	5.2	6.2	0.8	0.1	0.4	0.0	0.4
12 2	9.1	1.1	3.1	6.2	0.7	0.0	0.2	0.0	0.2
2 3	10.2	0.0	4.3	4.9	0.7	0.0	0.3	0.0	0.3
10 3	16.0	0.3	9.9	4.9	0.9	0.1	0.7	0.0	0.7
15 3	26.5	3.2	11.0	4.9	5.8	7.6	8.0	0.0	8.0
28 3	63.5	0.0	11.0	4.9	19.4	19.2	28.3	0.0	28.3
26 4	7.0	0.0	2.0	4.3	0.6	0.0	0.1	0.0	0.1
2 5	19.6	0.2	11.0	5.0	1.8	1.1	1.9	0.0	1.9
28 6	25.0	0.0	11.0	3.8	4.4	0.2	5.9	0.0	5.9
29 6	5.2	11.0	11.0	3.8	0.9	0.3	0.6	0.0	0.6
9 7	26.5	1.0	11.0	3.8	5.4	5.1	7.4	0.0	7.4
1988									
12 1	7.4	0.0	0.0	6.7	0.6	0.0	0.1	0.0	0.1
20 1	23.7	0.0	11.0	7.1	2.5	5.4	3.0	0.0	3.0
23 2	12.2	0.0	3.9	7.1	0.8	1.8	0.4	0.0	0.4
25 2	16.5	11.0	11.0	7.1	4.1	5.0	5.4	0.0	5.4
2 3	20.2	0.1	11.0	4.5	2.2	1.7	2.6	0.0	2.6
9 3	15.2	0.5	9.7	4.5	0.9	6.0	0.6	0.0	0.6
14 3	13.7	6.3	11.0	4.5	2.1	6.1	2.4	0.0	2.4
19 3	7.2	2.3	4.2	4.5	0.6	1.2	0.1	0.0	0.1
24 3	22.0	5.0	11.0	4.5	4.9	8.8	6.6	0.0	6.6
5 4	22.7	0.1	11.0	3.4	3.7	10.5	4.7	0.0	4.7
8 4	16.0	7.9	11.0	3.4	4.1	5.0	5.4	0.0	5.4
13 4	30.2	3.7	11.0	3.4	8.1	13.5	11.4	0.0	11.4
15 4	7.1	7.6	10.6	3.4	0.6	0.0	0.1	0.0	0.1
19 4	23.0	5.9	11.0	3.4	6.1	8.6	8.4	0.0	8.4
20 4	5.6	11.0	11.0	3.4	1.2	1.6	1.0	0.0	1.0
22 4	29.6	8.7	11.0	3.4	9.9	12.1	14.1	0.0	14.1
30 4	14.8	1.8	11.0	3.4	1.2	5.4	1.0	0.0	1.0
6 5	15.9	1.8	11.0	3.6	1.5	6.7	1.5	0.0	1.5
23 6	33.2	0.0	11.0	4.0	7.6	13.7	10.6	0.0	10.6
24 6	4.7	11.0	11.0	4.0	0.6	0.0	0.1	0.0	0.1
13 7	10.1	1.9	6.1	4.9	0.7	0.1	0.3	0.0	0.3
15 7	9.5	4.0	7.6	4.9	0.7	0.0	0.3	0.0	0.3
16 7	5.7	7.6	7.9	4.9	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0
X=0,900 DEFCO=11,0mm HQ=41,4mm Q=0,600 FN=0,5mm									