

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - IPH

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO

**SIMULAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA  
EM PEQUENAS BACIAS RURAIS**

Joel Avruch Goldenfum

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Morelli Tucci

Co-orientador: Prof. Dr. Marc Pierre Bordas

Porto Alegre, maio de 1991

*A Sandra, pelo apoio, carinho e  
compreensão*

## *AGRADECIMENTOS*

*Ao professor Carlos Eduardo Morelli Tucci, pela orientação e estímulo não só durante a realização desta dissertação, mas desde minha chegada neste Instituto.*

*Ao professor Marc Pierre Bordas, pela sua orientação, intervenção na obtenção de dados e pelos úteis conhecimentos transmitidos.*

*Ao Dr. Pierre Chevallier, pelo auxílio na obtenção e utilização do programa HYDROM, cedido pela ORSTOM, e pelas oportunas sugestões que contribuíram ao bom termo do trabalho.*

*Ao professor Cassol, por ter cedido o programa ANSWERS.*

*Aos professores e funcionários do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, em especial aos colegas Bertoni, Augusto e D'Amico, pelo apoio proporcionado durante os estudos e confecção da dissertação.*

*Ao auxiliar de pesquisa Gilberto Pianezzola e ao estagiário Gilberto Oliveira, cujos trabalhos foram muito importantes para a execução da pesquisa.*

*Ao CNPq, pela bolsa concedida.*

*Aos meus pais, pelo constante e permanente incentivo.*

*A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado.*

## RESUMO

A utilização de modelos matemáticos para simular os processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas tem crescido sensivelmente nas duas últimas décadas. Estes modelos podem diferir enormemente entre si, conforme seus objetivos, estrutura ou precisão na representação dos processos, dos parâmetros e das variáveis de entrada e saída. Há necessidade de se conhecer os diferentes enfoques de modelagem para que se possa desenvolver, escolher e utilizar os modelos de forma correta.

O presente trabalho teve por objetivo estudar a aplicabilidade de diferentes enfoques de modelagem, salientando a importância e a melhor forma de utilização de cada tipo de modelo.

Os modelos selecionados foram o modelo ANSWERS e a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE), esta última com os valores de vazão de pico e volume de escoamento superficial calculados alternativamente pela metodologia do SCS (Soil Conservation Service) ou pelo modelo IPH-II.

Os modelos foram aplicados a 34 eventos em duas pequenas sub-bacias de 55 e 39,3 ha, localizadas na bacia do rio Forquetinha, no Estado do Rio Grande do Sul. Os resultados obtidos demonstraram a inadequação da MUSLE para previsão do aporte de sedimentos nas bacias estudadas e a tendência de superestimativa dos valores de vazão de pico apresentada pelo modelo do SCS. Foram observados, também, excelentes resultados do modelo IPH-II para os eventos de ajuste, o que não se verificou quando o modelo foi aplicado para previsão. O modelo ANSWERS, mesmo utilizado sem calibração, foi o que apresentou os melhores resultados para a produção de sedimentos. Sugere-se a utilização dos modelos empíricos apenas nos casos de carência de dados de campo. Quanto aos modelos conceituais, conclui-se sobre a necessidade de confirmação das suas hipóteses de funcionamento dentro da bacia, e não apenas em seu exutório, para que possam ser utilizados com maior confiabilidade.



## ABSTRACT

The use of mathematical models to simulate hydrosedimentological processes in catchments had increased in the two last decades. These models may differ widely according to their objectives, structure or precision in representing the processes, parameters and input/output data. It is important to know the different modeling approaches as to develop, choose and use them correctly.

The objective of this study work was to research the applicability of the different modeling approaches, stressing the importance and the best use for each class of model.

The models selected for this work were ANSWERS and the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE); in the latter model, the values of peak flow rate and runoff volume were calculated alternately by the methodology of the Soil Conservation Service (SCS) or by IPH-II.

The models were applied to 34 events in two small basins (55 and 39,3 ha) located in the Forquetinha river basin in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The results obtained showed the inadequacy of MUSLE to predict sediment yield in the watershed studied and the tendency to overestimating the volume and peak flow rates presented in the SCS model. Excellent results were observed with the IPH-II model applied to the adjusted events. This fact was not observed when the same model was applied to prediction. The ANSWERS model, even used without calibration, provided the best results for sediment yield. The utilization of empirical models is suggested only for situations with lack of field data. As to conceptual models, it is concluded that the working hypotheses should be confirmed inside the basin, and not only at the outlet, to use them with greater reliability.

## ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Generalidades.....	1
1.2 - Objetivos do Estudo.....	4
2 - MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA EM PEQUENAS BACIAS RURAIS... 5	5
2.1 - Pequenas Bacias Rurais.....	5
2.2 - Principais Processos Envolvidos.....	6
2.3 - Descrição e Análise Comparativa dos Principais Modelos. 12	12
2.3.1 - Classificação dos Modelos.....	12
2.3.2 - Principais Modelos Hidrossedimentológicos.....	16
2.3.2.1 - Modelos Empíricos.....	16
2.3.2.2 - Modelos Conceituais.....	18
2.3.3 - Quadro Comparativo dos Modelos.....	26
3 - MODELOS UTILIZADOS.....	30
3.1 - Considerações Iniciais.....	30
3.2 - Modelo IPH2SED.....	31
3.2.1 - Estrutura do Modelo.....	31
3.2.2 - Modelo IPH-II.....	33
3.2.3 - Metodologia do Soil Conservation Service.....	38
3.2.4 - MUSLE - Equação Universal de Perda de Solos Modificada.....	44
3.3 - Modelo ANSWERS.....	47
4 - APLICAÇÃO.....	57
4.1 - Bacia do Rio Forquetinha.....	57
4.1.1 - Descrição.....	57
4.1.2 - Sub-bacias Seleccionadas.....	60
4.1.3 - Dados Disponíveis.....	62
4.2 - Análise de Sensibilidade dos Modelos.....	64
4.3 - Ajuste e Verificação dos Modelos.....	72
4.3.1 - Modelo IPH2SED.....	72
4.3.2 - Modelo ANSWERS.....	81
4.4 - Análise dos Resultados.....	89

5 - CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	100
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

ANEXOS:

- ANEXO A - Tabelas para Estimativa dos Parâmetros dos Modelos Utilizados
- ANEXO B - Topografia, Solos e Cobertura Vegetal das Sub-bacias Selecionadas
- ANEXO C - Cálculo dos Parâmetros K, C, LS, CN e ASM
- ANEXO D - Metodologia de Cálculo da Declividade dos Elementos

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Estrutura do Modelo IPH-II.....	32
Figura 3.2 - Funções do Algoritmo de Infiltração do Modelo IPH-II.....	35
Figura 3.3 - Fluxograma Geral do Modelo IPH-II.....	39
Figura 3.4 - Hidrograma Unitário Triangular.....	41
Figura 3.5 - Modelo ANSWERS - Divisão da Bacia em Elementos de Cálculo.....	48
Figura 3.6 - Modelo ANSWERS - Partição do Fluxo Superficial.....	51
Figura 4.1 - Situação Geográfica da Bacia do Rio Forquetinha.....	58
Figura 4.2 - Localização das Sub-bacias.....	61
Figura 4.3 - Resultados da Análise de Sensibilidade do Modelo ANSWERS - Parâmetros de Baixa e Média Sensibilidades	71
Figura 4.4 - Resultados da Análise de Sensibilidade do Modelo ANSWERS - Parâmetros de Alta Sensibilidade.....	71
Figura 4.5 - Resultados da MUSLE, com Volume Superficial e Vazão de Pico Medidos.....	74
Figura 4.6 - Resultados do Modelo IPH2SED para a Vazão de Pico. Metodologia do SCS com $I_a$ obtido em Hidrograma.....	77
Figura 4.7 - Resultados do Modelo IPH2SED para Sedimentos Produzidos. Metodologia do SCS com $I_a$ obtido em Hidrograma.....	77
Figura 4.8 - Resultados do Modelo IPH2SED para o Volume Escoado. Metodologia do SCS com $I_a=0,2.Sm$ .....	79
Figura 4.9 - Resultados do Modelo IPH2SED para a Vazão de Pico. Metodologia do SCS com $I_a=0,2.Sm$ .....	79
Figura 4.10- Resultados do Modelo IPH2SED para Sedimentos Produzidos. Metodologia do SCS com $I_a=0,2.Sm$ .....	80
Figura 4.11- Resultados do Modelo IPH2SED para o Volume Escoado. Metodologia do Modelo IPH-II.....	83
Figura 4.12- Resultados do Modelo IPH2SED para a Vazão de Pico: Metodologia do Modelo IPH-II.....	83
Figura 4.13- Resultados do Modelo IPH2SED para Sedimentos Produzidos. Metodologia do Modelo IPH-II.....	84

Figura 4.14- Sub-bacia A1 - Discretização Adotada para o Modelo ANSWERS.....	85
Figura 4.15- Sub-bacia B1 - Discretização Adotada para o Modelo ANSWERS.....	86
Figura 4.16- Resultados do Modelo ANSWERS para o Volume Escoado..	88
Figura 4.17- Resultados do Modelo ANSWERS para Sedimentos Produzidos.....	88
Figura 4.18- Volume Total Escoado. Comparação dos Resultados.....	93
Figura 4.19- Sub-bacia A1. Produção de Sedimentos - Comparação de Resultados.....	94
Figura 4.20- Sub-bacia B1. Produção de Sedimentos - Comparação de Resultados.....	95

## LISTA DE TABELAS

Quadro 2.1 - Quadro Comparativo dos Modelos.....	27
Quadro 4.1 - Características Físicas das Sub-bacias.....	62
Quadro 4.2 - Dados Disponíveis.....	65
Quadro 4.3 - Valores da Formulação Básica.....	68
Quadro 4.4 - Análise de Sensibilidade do Modelo ANSWERS. Resultados.....	70
Quadro 4.5 - Resultados da MUSLE, com Valores Medidos de Volume Superficial e Vazão de Pico.....	73
Quadro 4.6 - Resultados do Modelo IPH2SED. Metodologia do SCS com Ia Obtido do Hidrograma.....	76
Quadro 4.7 - Resultados do Modelo IPH2SED. Metodologia do SCS com Ia=0,2.Sm.....	78
Quadro 4.8 - Resultados do Modelo IPH2SED. Metodologia do Modelo IPH-II.....	82
Quadro 4.9 - Resultados do Modelo ANSWERS.....	87
Quadro 4.10- Comparação dos Resultados.....	90
Quadro 4.11- Desvio Relativo dos Modelos para a Produção de Sedimentos.....	91

## 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 - Generalidades

Os processos de erosão-sedimentação são de vital importância na conservação, desenvolvimento e utilização dos recursos de água e solo. Sem estes recursos, o homem não pode existir, e quando eles são de baixa qualidade ou de quantidade insuficiente, as condições de vida decaem rapidamente.

A produção de sedimentos nas bacias hidrográficas ocorre principalmente através da erosão nas nascentes ou cabeceiras ("upland areas"). Esta erosão traz grandes prejuízos ao agricultor, através da redução da camada útil de solo, com conseqüente perda de fertilidade. A perda do solo, por si só já se constitui em um problema de enormes conseqüências e de difícil solução. Esta conjuntura implica em impactos sócio-econômicos junto às pequenas propriedades rurais, tradicionalmente as mais afetadas pela erosão nas microbacias.

O transporte de sedimentos através dos cursos d'água pode ser identificado como um importante agente poluidor do meio-ambiente. Os sedimentos em suspensão são os primeiros poluentes a agir reduzindo o nível de qualidade das águas, antes mesmo dos nutrientes e pesticidas. Eles tornam a águas lamacentas, afetando a penetração da luz e, conseqüentemente, reduzindo o crescimento das plantas aquáticas e organismos microscópicos dos quais peixes e insetos se alimentam.

Os principais impactos ligados à introdução destes poluentes sobre o meio aquático são (Kauark Leite, 1986): a alteração do habitat e os efeitos nefastos sobre a flora e a fauna aquática; o assoreamento dos cursos d'água, reservatórios e lagos; a redução da potabilidade das águas destinadas ao consumo humano; o aumento dos custos e da complexidade do tratamento das águas para uso industrial

ou municipal; entre outros.

A erosão dos solos, portanto, não é um problema específico do agricultor, como poderia parecer à primeira vista. Além de uma perda do recurso solo e uma diminuição da produtividade agrícola, danos igualmente sérios freqüentemente ocorrem depois que o solo erodido deixa as cabeceiras, passando a enlamear os cursos d'água, depositar-se nos rios e assorear os reservatórios. Ou seja, o solo erodido causa triplo prejuízo: primeiro, onde ele se origina; segundo, quando ele se desloca; e, terceiro, onde ele se deposita (Meyer, 1971).

A poluição de origem agrícola é influenciada por numerosos fatores: características do solo, práticas culturais, clima, etc. As combinações destas variáveis são numerosas e complexas, tornando difícil a compreensão do funcionamento destes sistemas. A modelagem matemática permite que se separem os complexos fenômenos físicos, químicos e biológicos envolvidos, para estudá-los como sub-sistemas mais simples e, posteriormente, reagrupá-los. Desta forma, diversos e distintos cenários podem ser simulados para se ajustar corretamente as práticas agrícolas de cada bacia, permitindo um melhor controle da poluição (Kauark Leite, 1986).

O crescente interesse no planejamento dos recursos de água e solo tem estimulado o desenvolvimento de modelos para simular a resposta de uma bacia hidrográfica. Os modelos são utilizados para estimar quantidades físicas que descrevam as principais respostas da bacia à precipitação, tais como produção de água e sedimentos (Li, 1974).

Segundo Fleming (1975), o desenvolvimento de modelos matemáticos é necessário porque precisamos integrar as teorias componentes que afetam a resposta de uma bacia hidrográfica afim de quantificar realisticamente as complexas interrelações entre os processos que são a causa desta resposta. A modelagem matemática é



uma ferramenta pela qual os blocos teóricos das componentes hidrológica e de erosão-sedimentação podem ser combinados em uma estrutura lógica, representando os conceitos do processo como um todo.

A simulação de qualquer parte do ciclo hidrológico, segundo Tucci (1986), está sempre limitada pela dificuldade de representar o sistema, uma vez que a bacia hidrográfica é fisicamente heterogênea, tornando quase impossível a sua discretização espacial para cada fenômeno. Essas dificuldades propiciaram o desenvolvimento de um grande número de modelos, que se diferenciam em função do objetivo do estudo em que é aplicado ou da precisão que se deseja para cada processo. Estes modelos estarão sempre limitados pela quantidade e qualidade dos dados históricos, a dificuldade de formular matematicamente alguns fenômenos e a simplificação da distribuição espacial de variáveis, como a precipitação e a capacidade de infiltração.

Os modelos matemáticos podem diferir enormemente entre si, conforme seus objetivos, sua estrutura, ou conforme a precisão com que tratam os diferentes processos. Assim, um modelo poderá ter o objetivo de simular os processos físicos, buscando a compreensão detalhada dos mecanismos envolvidos ou poderá tentar determinar valores para projetos de gerenciamento dos recursos de água e solo. O modelo poderá buscar representar os fenômenos de forma empírica ou conceitual, de forma concentrada ou distribuída, determinística ou estocástica, com grande precisão nos dados de entrada e de saída ou extremamente simplificado. Diversos autores (Fleming, 1975; Coutinho, 1979; Ambroise et al., 1982; Dunne, 1983; Loague e Freeze, 1985; Klemes, 1986 e 1988; Kauark Leite, 1986 e 1990; Beven, 1987 e 1989; Hoesein et al., 1989; Pilgrim, 1989) têm destacado a necessidade de se conhecer estes diferentes enfoques para que se possa desenvolver, escolher e utilizar corretamente os modelos conforme as necessidades do usuário. Eles alertam para os perigos de uma má utilização e interpretação dos resultados e até mesmo

questionam a validade dos modelos, mostrando a necessidade de novos estudos.

O modelo matemático é uma ferramenta de apoio ao planejador para tomada de decisões e avaliação dos diferentes usos dos recursos naturais. Porém, sempre deve-se lembrar que todo modelo, por mais complexo que seja, é uma simplificação, uma idealização da realidade, devendo, portanto, ser utilizado dentro das condições e limitações para as quais ele foi previsto. Os resultados de uma simulação devem ser criteriosamente analisados, o que exige um profundo conhecimento tanto dos fenômenos naturais quanto dos critérios e algoritmos de modelagem utilizados.

## 1.2 - Objetivos do Estudo

O objetivo principal deste trabalho foi o de estudar a aplicabilidade dos enfoques de modelagem empírico e conceitual e dos esquemas de cálculo concentrado e distribuído para a simulação dos processos hidrossedimentológicos em pequenas bacias rurais.

Para tanto, a metodologia semi-empírica da MUSLE (Equação Universal de Perda de Solos Modificada) foi adaptada para permitir sua aplicação alternativamente aos modelos IPH-II e SCS. Os resultados foram comparados com os do modelo conceitual e distribuído ANSWERS, salientando a importância e a melhor forma de utilização de cada tipo de modelo.

## 2 - MODELAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM PEQUENAS BACIAS RURAIS

### 2.1 - Pequenas Bacias Rurais

No contexto do presente estudo, as pequenas bacias rurais correspondem às chamadas bacias elementares, ou bacias de primeira ordem. Uma pequena bacia é a menor unidade geomorfológica onde podem ocorrer todos os processos elementares do ciclo hidrológico.

As bacias elementares apresentam, como ordem de grandeza, o tamanho de até 5 km<sup>2</sup>, o que, segundo Silveira (1982), permite que:

- possa ser considerada a ocorrência de eventos pluviosos uniformes em toda bacia;
- as características físicas sejam semelhantes em toda sua extensão;
- se tenha um maior controle sobre a entrada de sedimentos de outras áreas;
- se identifique rapidamente qualquer alteração na camada superficial do solo das sub-bacias;
- se tenha a convicção de que a produção de água e sedimentos a partir do fluxo concentrado na calha dos cursos d'água é insignificante se comparada com a produção das vertentes.

Estas características permitem uma avaliação numérica mais exata dos parâmetros representativos da bacia, possibilitando uma melhor comparação dos processos envolvidos e de sua importância relativa.

## 2.2 - Principais Processos Envolvidos

A produção e transporte de água e sedimentos em bacias hidrográficas envolve um conjunto de fenômenos naturais que se interrelacionam de forma às vezes bastante complexa, não se tendo domínio, em nosso atual estado de conhecimento, da maneira real e detalhada pela qual se dá esta interação. Segundo Tucci (1986), cada um destes subprocessos depende de um grande número de fatores que dificilmente são completamente conhecidos, o que dificulta ainda mais a sua análise quantitativa e qualitativa. Assim, para o estudo do fenômeno, parte-se para um processo de análise, onde cada subprocesso é estudado separadamente, dentro das condições de precisão e detalhe necessárias para o objetivo de cada trabalho e possíveis pelo conhecimento de que se dispõe.

A produção de sedimentos depende dos processos hidrológicos e sedimentológicos envolvidos na bacia. Diversas metodologias foram desenvolvidas para representar estes processos, sendo apresentado a seguir um resumo das principais técnicas de modelagem matemática descritas na literatura. Os conceitos e definições apresentados visam permitir uma melhor compreensão da terminologia utilizada.

### Processos Hidrológicos

Os principais processos envolvidos são a precipitação, a interceptação vegetal, o armazenamento nas depressões do terreno, a evaporação e evapotranspiração, a infiltração e o escoamento na bacia.

A precipitação é caracterizada por sua duração, intensidade, frequência e distribuição espacial e temporal. No contexto das bacias elementares, é possível considerar a precipitação uniforme em termos espaciais. As demais características, dentro do presente estudo, são resultado de medições de campo, não recebendo tratamento de modelagem.

A **intercepção** é constituída pelo volume de água que é retido ou armazenado pela vegetação e eventualmente perdido por evaporação. A intercepção tem distintas formulações, como as desenvolvidas por Horton, em 1935 (Miranda, 1983) e Li (1974), além do algoritmo apresentado nos modelos Stanford IV (Crawford e Linsley, 1966) e IPH II (Tucci, 1986).

O **armazenamento nas depressões do terreno** se dá quando a água fica retida nas pequenas e numerosas depressões do terreno, das quais só escapa por evaporação ou infiltração. Admite-se para ele, usualmente, uma evolução com a precipitação útil em excesso, através de formulações empíricas. É comum, em diversos modelos, englobar as perdas por intercepção e por armazenamento em depressões em um único termo, chamados de perdas iniciais, que é subtraído diretamente da precipitação total nos instantes iniciais.

A **evaporação e evapotranspiração** constituem os processos de transferência de água do solo, das massas líquidas e dos vegetais para a atmosfera. Há inúmeras equações empíricas e racionais que permitem estimar o valor deste fenômeno. Dentre elas, destacam-se os métodos de: Penman, desenvolvido em 1948; Turc, descrito em 1961; Jensen-Haise, apresentado em 1963; Thornthwaite, apresentado em 1964; Blaney e Criddle, desenvolvido em 1966; Hargreaves, descrito em 1966; Van Bavel, descrito em 1967; Christiansen, apresentado em 1968; e diversos outros (Saxton e McGuinness, 1982; Sanchez, 1987).

A **infiltração** é definida como o processo de penetração da água no solo, a partir de sua superfície. A curva da capacidade de infiltração tem sido descrita por expressões matemáticas por inúmeros pesquisadores, dentre os quais mencionam-se as mais importantes, sob o ponto de vista conceitual e histórico: Green-Ampt, desenvolvido em 1911; Kostiaikov, apresentado em 1935; Horton, descrito em 1937; Philip, desenvolvido em 1957; e Holtan, descrito em 1961 (Miranda, 1983).

Pode-se, ainda, destacar como metodologia para a separação dos escoamentos o Método dos Números-Curva do Soil Conservation Service (SCS Curve Number), a utilização de índices de perdas e os métodos de separação gráfica. Estes métodos não calculam a infiltração, prevendo diretamente o volume de escoamento superficial.

O escoamento na bacia é composto pelos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo. Trabalhos recentes (Beven, 1988; Chevallier, 1988) dividem o escoamento em superficial e interno. A subdivisão apresentada corresponde à forma de representação dos processos adotada nos modelos avaliados no presente trabalho.

O escoamento superficial ("Overland Flow"), ou escoamento em vertentes, é o movimento do excesso de precipitação (i.e. precipitação menos retenção, armazenamento e infiltração) sobre a superfície da bacia, até encontrar uma calha definida. Os principais modelos de escoamento superficial, sob o ponto de vista histórico e conceitual são: a fórmula racional, desenvolvida por Kovichling, em 1889 (Coutinho, 1979); o conceito de hidrograma unitário, apresentada por Sherman em 1932 (Coutinho, 1979; Sanchez, 1987); os modelos lineares conceituais, como o Reservatório Linear Simples, o modelo Clark apresentado em 1945, o modelo Nash, descrito em 1957, e o modelo Dooge, desenvolvido em 1959, todos modelos do tipo concentrado (Tucci, 1986); e os modelos não-lineares, dentre os quais destacam-se o modelo Stanford IV, o modelo de Onda Cinemática e o modelo de Onda Difusiva (Crawford e Linsley, 1966; Li, 1974; Tucci, 1986; Govindaraju et al., 1988a e 1988b).

O escoamento subsuperficial, ou hipodérmico, é aquele que ocorre ao nível da camada radicular do solo, com velocidade inferior à do fluxo superficial e maior que a do fluxo subterrâneo. Ele atinge os canais fluviais com relativa rapidez, razão pela qual é, em diversos modelos, englobado ao escoamento superficial (Sanchez, 1987).

O escoamento subterrâneo é formado pela água que percola até atingir o armazenamento subterrâneo, saindo mais tarde na forma de fluxo de base. A formulação básica para o escoamento subterrâneo segue a Lei de Darcy (Sanchez, 1987), mas, na grande maioria dos casos, as equações hidrodinâmicas que regem este escoamento não têm solução analítica, sendo usadas aproximações de diferenças finitas ou elementos finitos. Porém, na maior parte dos modelos, ele é tratado de forma simplificada, muitas vezes com a utilização de métodos de escoamento superficial, como o Reservatório Linear Simples, citado anteriormente.

### **Processos de Erosão - Sedimentação**

Erosão e sedimentação por água envolve os processos de desagregação (ou separação), transporte e deposição das partículas de solo (sedimentos) pelos agentes erosivos e de transporte, que são o impacto das gotas d'água (salpicadura) e o escoamento superficial (escoamento em vertentes) (Task Committee, 1965).

O conjunto da desagregação e transporte compõe a erosão, que pode ser classificada como: laminar ("sheet erosion"), em sulcos ("rill erosion"), voçorocas ("gully erosion"), canais ("stream erosion") ou deslizamentos ("landslide erosion"). Erosão laminar é a remoção de uma pequena camada fina e uniforme de partículas de solo. Erosão em sulcos é a remoção de solo por pequenas concentrações de água em movimento, com formação de pequenos canais, que são os sulcos. Quando os pequenos canais não podem ser apagados por uma lavoura normal, eles são chamados voçorocas. Erosão em canais é provocada pelo fluxo d'água nos leitos dos rios, e, finalmente, o deslizamento é o movimento de solo em massa.

**Desagregação**, ou separação ("detachment") é o destacamento das partículas de solo pelos agentes erosivos. A desagregação ou separação do solo nas terras altas se dá, nas áreas entre sulcos, principalmente pelo impacto das gotas de chuva, e, nos sulcos,

devido à ação cisalhante do escoamento.

Diversas relações empíricas foram desenvolvidas para o cálculo da desagregação do solo sendo que Hadley et al. (1985) apresentam, entre outras: as formulações de Bubenzer e Jones (desenvolvida em 1971), Kinnell (apresentada em 1973), McGregor e Mutchler (descrita em 1977) e Walker (descrita em 1975) para a desagregação por salpicadura; e os trabalhos de Onstad e Foster (apresentado em 1975), Monke (descrito em 1977), Walker (descrito em 1977) Morgan (desenvolvido em 1980) e Meyer (apresentado em 1981), para a desagregação por escoamento nos sulcos.

**Transporte** é o movimento do sedimento, deslocando-se de sua posição original. Geralmente faz-se a distinção entre três modalidades de transporte (Canali, 1981): a turbidez ("wash-load"), a suspensão e o arraste ("bed-load"). A turbidez é constituída de finas partículas de material coesivo, proveniente quase que exclusivamente da erosão em vertentes e responsável por cerca de 85% do sedimento transportado. A suspensão diz respeito, principalmente, aos pequenos grãos de areia que são continuamente mantidos em suspensão pela água, participando com aproximadamente 9% do total transportado. O arraste se refere às granulometrias maiores, carregadas por rolamento, deslizamento ou saltação, no fundo do leito, e participando com cerca de 6% do transporte global. Embora estes valores, obtidos a partir de Canali (1981), sejam apenas indicativos, já mostram a importância da erosão nas vertentes, uma vez que a maior parte dos sedimentos (turbidez e suspensão) é proveniente delas.

As equações de transporte existentes se referem a escoamentos concentrados em rios e canais. Atualmente existe a necessidade da verificação destas fórmulas para prever o transporte de sedimentos no escoamento superficial de uma bacia hidrográfica (Silveira, 1982). As relações conhecidas para canal são em grande número, apresentando resultados às vezes bastante diversos entre si



(Herbertson, 1969; Alonso, 1980; Nakato, 1990; ) e que, por sua vez, podem diferir muito dos resultados para escoamento superficial (Neibling e Foster, 1980; Silveira, 1982).

Muitas fórmulas aparecem na literatura preocupando-se com o transporte de sedimentos por arraste, destacando-se as fórmulas de Duboys, apresentada em 1879, Schoklitsch, descrita em 1930, Shields, desenvolvida em 1936, Kalinske, apresentada em 1947, Meyer-Peter e Muller, descrita em 1948, Einstein, apresentada em 1950, Einstein-Brown, descrita em 1950, Bagnold desenvolvida em 1956, e Yang, apresentada em 1971. (Graf, 1971; Bordas, 1973). Quanto às equações para transporte por suspensão, as aproximações racionais se devem, principalmente, a Lane e Kalinske, desenvolvida em 1939, e a Einstein, apresentada em 1943 (Shen, 1971).

**Deposição** é o processo de depósito dos sedimentos nas vertentes, em reservatórios e em planícies ao longo de seu trajeto através dos cursos d'água. Alguns sedimentos são depositados apenas temporariamente. Eventos subseqüentes, muitas vezes diversos anos depois, podem ressuspender novamente os sedimentos e movê-los através do sistema de transporte (Foster, 1982).

A deposição ocorre quando o aporte de sedimentos excede a capacidade de transporte. As relações mais utilizadas para a capacidade de transporte por fluxo superficial são desenvolvidas a partir dos trabalhos de Yalin (1963), Meyer e Wischmeier (1969) e Foster e Meyer (1972). Quanto ao depósito em canais, destacam-se os trabalhos de Pedroli (1963) e diversos estudos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Costa, 1974; Almeida, 1980; Garcia, 1983; Medeiros, 1986; Borges, 1987; Silvestrini, 1991) sobre depósito de sedimentos em canal de fundo fixo e móvel.

## 2.3 - Descrição e Análise Comparativa dos Principais Modelos

### 2.3.1 - Classificação dos Modelos

Dependendo do ponto de vista e das técnicas usadas na modelagem, diversas classificações de modelos de bacia podem ser aceitas (Coutinho, 1979). Os critérios utilizados são bem conhecidos e procuram ser objetivos, porém, como alguns deles apresentam certas particularidades e até mesmo pequenas contradições, alguma subjetividade pode estar envolvida quando da classificação de determinados modelos. Por este motivo, e para tornar claras as definições adotadas no presente estudo, são apresentados e brevemente discutidos a seguir os principais critérios para classificação dos modelos, tendo como base as definições e discussões de Clarke (1973), Hadley et al. (1985), Tucci (1986), Chevallier (1988), Galvão (1990) e Kauark Leite (1990).

**Modelo Linear ou Modelo Não-Linear:** Um modelo é linear se o princípio da superposição é respeitado. Este princípio afirma que, se  $y_1(t)$  e  $y_2(t)$  são as saídas de um sistema, correspondentes às entradas  $x_1(t)$  e  $x_2(t)$ , respectivamente, a resposta do sistema à entrada  $x_1(t) + x_2(t)$  será  $y_1(t) + y_2(t)$ .

**Modelo Estocástico ou Modelo Determinístico:** Um modelo é estocástico quando quaisquer variáveis de entrada, saída e erro são variáveis aleatórias, tendo uma distribuição de probabilidade. Segundo Dooge (1973), quando um modelo produz sempre a mesma saída para um mesmo conjunto de entradas, ele é dito determinístico, enquanto que será classificado como estocástico quando o relacionamento entre entradas e saídas for estatístico.

**Modelo Contínuo ou Modelo de Eventos:** Um modelo é dito contínuo quando simula continuamente uma série hidrológica, em contraposição aos modelos que realizam a simulação por evento. No primeiro caso, apesar dos intervalos de tempo serem discretos,

considera-se que o modelo simula um fenômeno contínuo. No segundo, o modelo simula apenas um evento discreto, particular.

**Modelo Dinâmico (Transitório, Não-Estacionário) ou Modelo Estático (Permanente, Estacionário):** Um modelo é dinâmico se certas variáveis evoluem ao longo do tempo. Se todas as variáveis e parâmetros são independentes do tempo, o modelo é estático.

**Modelo Concentrado (Global) ou Modelo Distribuído (Malhado, Matricial):** Um modelo é concentrado quando seus parâmetros e variáveis variam somente em função do tempo; quando variam também em função do espaço, o modelo é distribuído. Na realidade, os modelos distribuídos subdividem o sistema físico em elementos que são considerados como homogêneos quanto às propriedades avaliadas, havendo variação apenas de elemento para elemento. Portanto, os modelos distribuídos tratam o sistema como um conjunto de sub-sistemas concentrados.

**Modelo Empírico ("Caixa-Preta") ou Modelo Conceitual (de Base Física):** Um modelo é empírico quando as funções utilizadas não levam em consideração os processos físicos internos do sistema, se contentando em estabelecer relações diretas entre as variáveis de entrada e as de saída. Os modelos conceituais procuram representar os mecanismos internos do sistema, mesmo que para tanto utilizem funções empíricas.

Esta aparente contradição dos modelos conceituais utilizarem funções empíricas levou alguns autores a subdividirem os modelos conceituais em duas categorias. Assim, Galvão (1990) classifica os modelos em Empírico, Conceitual e Fundamental; Kauark Leite (1990) os classifica em Empírico, Conceitual e Mecanicista e Hadley et al. (1985) os divide em Modelos de Predição Empíricos, de Predição de Base Física e de Simulação Dinâmica. Os modelos empíricos, ou de predição empíricos correspondem aos modelos do tipo "caixa-preta", descritos anteriormente. Os modelos fundamentais, mecanicistas, ou

de simulação dinâmica procuram representar da forma mais detalhada e fiel possível todos os processos físicos, químicos e biológicos envolvidos, levando em conta sua variação no tempo e no espaço. Os modelos conceituais, ou de predição de base física correspondem àqueles que, embora procurem utilizar conceitos físicos, adotam representações simplificadas do comportamento do sistema. Estas representações, apesar de possuírem senso físico, são desprovidas de relações que identifiquem fisicamente os parâmetros.

O limite entre os modelos conceituais (de base física) e os mecanicistas (fundamentais) não é absolutamente claro e definido, uma vez que mesmo estes últimos utilizam equações empíricas para representar determinados processos. Em teoria, os modelos mecanicistas não necessitariam de ajuste, uma vez que todos seus parâmetros poderiam ser mensuráveis. Já os modelos conceituais necessitariam de calibração, pois alguns parâmetros não podem ser medidos. Na realidade os conhecimentos atuais ainda estão distantes de uma teoria causal completa e adequada dos processos hidrossedimentológicos. Mesmo nos modelos mais adaptados ao conceito de mecanicista, ou fundamental, certos parâmetros ou coeficientes utilizados, tais como a rugosidade de Manning ou a condutividade hidráulica na Lei de Darcy, não podem ser medidos.

#### **Modelo de Simulação ou Modelo de Projeto ou Modelo de Gestão:**

Os modelos de simulação tentam reproduzir os fenômenos ou prever o comportamento de um sistema submetido a solicitações conhecidas. Trata-se de um enfoque determinístico, onde as variáveis desconhecidas (saídas) são calculadas em função de variáveis conhecidas (entradas) e dos parâmetros do sistema. Já os modelos de projeto apresentam um enfoque probabilístico. Eles buscam calcular o valor de um conjunto de variáveis de saída com uma determinada probabilidade de excedência (por exemplo, uma vazão de projeto) a partir de um conjunto de variáveis de entrada com esta mesma probabilidade de excedência (por exemplo, uma chuva de projeto). Os modelos de gestão têm por objetivo a escolha entre diversas

alternativas de gestão, indicando sua influência sobre o sistema e os custos. Tratam-se de modelos de otimização ou de planificação, que utilizam um critério de escolha a partir de uma função-objetivo.

Deve-se destacar, que, conforme Hoesein et al. (1989), um mesmo modelo pode ser aplicado a dois tipos distintos de problemas: simulação ou projeto. Um resultado ruim na aplicação de um modelo para simulação não significa necessariamente que a metodologia empregada seja inadequada como ferramenta de projeto, pois, embora o procedimento computacional possa ser exatamente o mesmo em ambos os casos, a interpretação do método, sua validade e as exigências para teste são diferentes. O primeiro tipo de aplicação é um problema determinístico e, neste caso, o modelo será utilizado como um modelo determinístico. O segundo tipo é um caso de projeto, onde o valor de uma variável com determinada probabilidade de excedência deve ser determinado. Uma interpretação probabilística do método é requerida, e este deve ser o enfoque adotado neste caso.

A partir destas definições verifica-se, portanto, haver diversas aparentes contradições, como por exemplo: os modelos contínuos utilizam intervalos de tempo discretos; os modelos distribuídos tratam o sistema como um conjunto de sub-sistemas concentrados; os modelos conceituais utilizam funções empíricas; os modelos de simulação podem ser utilizados para projeto. Estas contradições poderiam levar à conclusão de que estas classificações dos modelos são meramente acadêmicas, porém segundo Kauark Leite (1990), elas servem para auxiliar o usuário de modelos a se situar nos diferentes enfoques e terminologias de modelagem, a compreender melhor as escolhas efetuadas pelos autores dos modelos e, enfim, a orientar a coleta dos dados e a interpretação dos resultados.

### 2.3.2 - Principais Modelos Hidrossedimentológicos

Conforme já apresentado anteriormente, há diversos modelos descritos na literatura. Estes modelos apresentam características e objetivos distintos, o que acarreta maior ou menor nível de precisão nos resultados e nos dados de entrada. São descritos de forma resumida, a seguir, alguns dos principais modelos existentes, destacando suas principais características, vantagens e limitações. Deve-se observar que esta apresentação não pretende esgotar o assunto, mas apenas visa fornecer uma visão geral do atual estado de conhecimento ("state-of-the-art").

#### 2.3.2.1 - Modelos Empíricos

Estes modelos correspondem aos modelos do tipo "caixa-preta", onde as funções utilizadas não levam em consideração os processos físicos internos do sistema, se contentando em estabelecer relações diretas entre as variáveis de entrada e as de saída. São, normalmente, modelos a nível anual, que devem ser utilizados somente no local para o qual foram desenvolvidos.

A maior parte dos modelos empíricos é composta por equações locais ou regionais, desenvolvidas a partir de um conjunto de dados de uma região.

Equações deste tipo são geralmente desenvolvidas utilizando técnicas de regressão múltipla e, portanto, apresentam as limitações estatísticas inerentes a estas técnicas, o que inclui dificuldade para se obter interpretações físicas dos coeficientes de regressão e a exigência de que elas sejam aplicadas estritamente dentro das condições para as quais foram desenvolvidas. Mesmo assim, elas têm, além de seu valor histórico, uma grande importância na definição dos fatores climáticos e físicos de maior influência nos processos hidrossedimentológicos.

Diversas formulações foram desenvolvidas, sendo que Hadley et al. (1985) destacam as equações de Flaxman, desenvolvida em 1974, para o Oeste dos Estados Unidos; de Hindall, apresentada em 1976, para o Estado de Wisconsin, nos Estados Unidos; de Dendy e Bolton, descrita em 1976, para os Estados Unidos; de Demmak, descrita em 1982, para o Norte da Argélia; e a Metodologia do PSIAC ("Pacific Southwest Inter-Agency Committee") apresentada em 1982.

A equação empírica mais amplamente utilizada para avaliar erosão laminar e em sulcos de um escoamento superficial é a Equação Universal de Perda de Solos (USLE). Ela foi desenvolvida a partir de um conjunto muito grande de dados de campo e de simuladores de chuva (Wischmeier e Smith, 1978), pelo National Runoff and Soil Loss Data Center, estabelecido em 1954 pelo U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service e Purdue University, sendo citada e utilizada por inúmeros autores (Meyer, 1971; Williams e Berndt, 1972; Canali, 1981; Foster, 1982; Hussein, 1982; USDA-WEPP, 1987; Wilson et al., s.d.). A versão atual da USLE abrange todas regiões geográficas dos Estados Unidos, estimando a erosão anual para áreas de campos agrícolas.

A USLE é expressa por:

$$A_m = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

onde  $A_m$  é a perda de solo média anual,  $R$  é o fator de erosividade da chuva,  $K$  é o fator de erodibilidade do solo,  $L$  é o fator comprimento de rampa,  $S$  é o fator de declividade,  $C$  é o fator de cobertura e manejo e  $P$  é o fator de prática de controle,

A USLE apresenta a vantagem de ser de fácil utilização, fornecendo resultados razoáveis para calcular a perda anual média de solos dentro dos limites dos dados para os quais foi desenvolvida. Suas maiores limitações são o fato de não poder estimar a perda de solo para um determinado evento, mas apenas um valor médio anual e

também a característica de não levar em conta os processos de deposição dos solos erodidos no interior da bacia.

Para superar a limitação de não se considerar a deposição, Renfro (1975) apresenta a utilização de uma taxa de aporte de sedimentos ("Sediment Delivery Ratio" - SDR). Esta taxa é a relação entre a produção de sedimentos (quantidade de sedimentos que passa pela seção de saída da bacia) e o total de sedimento separado (produção primária, estimada pela USLE). Assim, a produção de sedimentos é obtida pelo produto da SDR pela produção estimada pela USLE.

Porém, a estimativa da SDR apresenta problemas devido à sua grande variabilidade com as características físicas da bacia (Hadley et al., 1985). Para evitar este problema, Williams (1975a e 1975b) desenvolveu a Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE), onde o fator de erosividade da precipitação (R) é substituído por um fator de escoamento, função da vazão de pico e do volume de escoamento superficial. Uma descrição mais detalhada desta equação é apresentada no item 3.2.4.

Vários autores sugeriram modificações na USLE, nos seus vários parâmetros, para adaptá-la a uma ou outra situação. Com isto, aproveitam-se algumas de suas vantagens, principalmente para a realidade norte-americana, onde há uma grande quantidade de dados envolvendo a equação e permitindo até mesmo a regionalização dos valores de seus parâmetros. Foster (1982) e Wilson et al. (s.d.) apresentam algumas destas modificações.

#### **2.3.2.2 - Modelos Conceituais**

Os modelos conceituais são aqueles que procuram representar os mecanismos internos do sistema, podendo ser subdivididos em modelos conceituais (de base física) ou modelos mecanicistas (fundamentais ou de simulação dinâmica), conforme utilizem representações.



simplificadas do comportamento do sistema ou procurem descrever o mais detalhadamente possível os processos envolvidos. Como o limite entre os modelos conceituais e mecanicistas é pouco claro, esta subdivisão não será adotada no presente trabalho.

Alguns dos modelos apresentados a seguir incluem submodelos de nutrientes e/ou de pesticidas. Estes submodelos não serão analisados no presente estudo.

### **Modelo SWM - Negev**

O modelo SWM ("Stanford Watershed Model") foi apresentado por Crawford e Linsley (1966) na sua versão Stanford IV. Trata-se de uma aplicação do conceito de reservatórios, clássico nos modelos chuva-vazão (Kauark Leite, 1990). O modelo utiliza simplificações com bases conceituais para representar os diversos processos envolvidos na modelagem hidrológica de uma bacia. Assim, a interceptação da cobertura vegetal é simulada a partir de um parâmetro que representa a máxima capacidade de interceptação da cobertura vegetal. A infiltração é simulada de forma a se levar em conta a variabilidade espacial da capacidade de infiltração, através de uma função linear que relaciona esta variável com a percentagem de área com capacidade de infiltração maior ou igual que o valor indicado. A propagação da água na bacia é efetuada em três parcelas: escoamento superficial, através de um modelo não-linear concentrado, escoamento subsuperficial, por meio do modelo de reservatório linear simples, e o escoamento subterrâneo, a partir de uma adaptação do modelo de reservatório linear simples.

Negev, em 1967 (Fleming, 1968 e 1975; Coutinho, 1979; Foster, 1982) desenvolveu um modelo de propagação paramétrica de sedimentos, acoplado ao modelo Stanford. O modelo utiliza equações empíricas para incluir os processos de salpicadura de gotas de chuva, destacamento de sedimentos em sulcos e calhas de cabeceira e usa uma simples relação de potência para estimar a carga de material de

fundo.

Este modelo apresenta como vantagens a representação de quase todos processos envolvidos, a subdivisão da bacia e o fato de ser aplicável a bacias de características distintas. Suas grandes limitações são o grande número de parâmetros e o empirismo dos mesmos.

#### **Modelo ACTMO**

O modelo ACTMO ("Agricultural Chemical Transport Model") foi desenvolvido pelo Agricultural Research Service do U.S. Department of Agriculture (Kauark Leite, 1986). Seu objetivo principal é de prever a concentração de uma substância química orgânica dissolvida, como, por exemplo, um pesticida. O modelo é constituído de três submodelos: hidrologia, erosão e produtos químicos. No presente trabalho, serão discutidos os submodelos de hidrologia e erosão.

Para representar espacialmente a bacia, o modelo a subdivide em zonas, tubos, compartimentos e camadas. Esta discretização não permite a sua aplicação a grandes bacias, estando limitado o tamanho pela hipótese de distribuição uniforme de chuva e pela não consideração dos fenômenos de transporte em canal.

O modelo hidrológico utilizado foi o USDAHL-74. Este modelo, segundo Coutinho (1979), é baseado em relações empíricas, onde é calculada a média de precipitação para toda a bacia, e a chuva em excesso é propagada até a rede por um modelo de armazenamento não-linear. A unidade de base do modelo é a zona, que se constitui de um grupo de campos com a mesma cultura, ou o mesmo tipo de solos ou as mesmas características físicas. O modelo calcula, para cada zona, o escoamento superficial, utilizando a equação de Manning e a equação da continuidade; a infiltração, pela equação de Holtan; a evapotranspiração, a partir do estágio de desenvolvimento da cultura da umidade do solo e de dados de evaporação em tanque; o escoamento

subsuperficial e o escoamento no canal pela equação da continuidade e uma lei de esvaziamento; e o escoamento subterrâneo pela lei de Darcy.

O modelo de erosão prevê a perda de solos através da MUSLE (item 3.2.4), levando em conta a erosão em sulcos e entre sulcos e calculando também a distribuição granulométrica das partículas erodidas. A unidade de base do modelo é o compartimento, admitindo, ainda, que todos os sedimentos que chegam ao canal atingem a saída da bacia.

A principal vantagem deste modelo é a representação de quase todos os fenômenos envolvidos. Suas limitações se devem a: excessivo número de parâmetros, sendo grande parte deles obtido a partir de mapas geográficos, de culturas e de solos; a impossibilidade de utilização em bacias de grande porte; e a não consideração dos fenômenos de transporte em canal.

#### **Modelo ARM**

O modelo ARM ("Agricultural Runoff Management Model") foi desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency (Kauark Leite, 1986). O modelo pode ser esquematizado como um conjunto de quatro submodelos: hidrologia, erosão, nutrientes e pesticidas.

O modelo hidrológico é uma versão do modelo Stanford, e o modelo de erosão simula a perda de solos a partir dos processos de desagregação pelas gotas de chuva e pelo escoamento superficial. Ele não considera a deposição, e a distribuição granulométrica dos sedimentos é suposta igual à do solo original. Os algoritmos do modelo são derivados do modelo Negev, seguindo a mesma filosofia.

Trata-se de um modelo concentrado, que deve ser aplicado a bacias de tamanho inferior a  $5 \text{ km}^2$ , o que limita sua aplicação. Outras limitações são as implícitas do modelo Stanford: grande

número de parâmetros e empirismo dos mesmos. Sua maior vantagem é a representação de quase todos os fenômenos envolvidos .

#### Modelos da Cornell University: CPM e CNS

Os dois modelos foram desenvolvidos pela Universidade Cornell, nos Estados Unidos, apresentando como submodelos: hidrologia, erosão e nutrientes, para o CNS ("Cornell Nutrient Simulation Model"); e temperatura, hidrologia, erosão e pesticidas para o modelo CPM ("Cornell Pesticide Model") (Kauark Leite, 1986).

O modelo hidrológico do CNS utiliza o método SCSCN ("Soil Conservation Service Curve Number", o Método dos Números-Curva, descrito no item 3.2.3) para calcular o escoamento superficial, determinando a vazão de pico pela aplicação de um hidrograma trapezoidal. O modelo hidrológico do CPM prevê três opções para o cálculo do escoamento superficial: o SCSCN, a equação de Green-Ampt ou o modelo USDAHL-74. Os modelos determinam, ainda, a evaporação, a evapotranspiração e a umidade do solo, através de relações empíricas.

O submodelo erosão de ambos os modelos utiliza a MUSLE para prever a perda de solos em um intervalo de tempo diário.

Os modelos são aplicáveis a bacias com boa rede de drenagem e consideradas como homogêneas, o que limita a sua aplicação a bacias de superfície máxima de 5 km<sup>2</sup>.

Ambos os modelos têm seus parâmetros determinados diretamente a partir das características físicas da bacia, o que torna bastante simples sua aplicação. São, portanto, modelos simples, de fácil aplicação, não necessitando calibração dos parâmetros. Sua principal desvantagem está na subjetividade para determinação dos parâmetros.

## Modelo CREAMS

O modelo CREAMS ("Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems") foi desenvolvido pelo U.S. Department of Agriculture, estando composto por três submodelos: hidrologia, erosão e produtos químicos (Estados Unidos-SCS, 1984; Foster et al., 1980).

O modelo hidrológico calcula o escoamento superficial, a vazão de pico, a infiltração, a evapotranspiração, a umidade do solo e a percolação para um intervalo de tempo diário. O modelo oferece duas opções de cálculo para o escoamento: a equação de Green-Ampt ou o SCSCN. A percolação é obtida a partir da utilização da água disponível no solo, abaixo da capacidade de campo. A vazão de pico é calculada por uma equação empírica no caso da utilização do SCSCN e através de um modelo de onda cinemática no caso de utilização da equação de Green-Ampt.

O modelo de erosão considera três processos para descrever a perda de solos: a desagregação, o transporte e o depósito. A concentração dos sedimentos na água é limitada pela capacidade de transporte do escoamento superficial ou pela quantidade de sedimento separada. O modelo representa o escoamento sobre a superfície do solo, nos canais e nas planícies de inundação e simula, também, a distribuição granulométrica das partículas de sedimentos erodidas. A desagregação é descrita pela USLE modificada por Onstad e Foster (1975), e a capacidade de transporte do escoamento superficial é estimada pela equação de transporte de Yalin. O modelo utiliza o método de variação da capacidade de transporte ("Method of Shifting Transport Capacity") para distribuir o excesso de capacidade de transporte de algumas partículas da mistura.

Trata-se de um modelo baseado na teoria de Meyer e Wischmeier (1969), aplicável a lotes do tipo de campos agrícolas, definido como uma unidade de gerenciamento homogênea no que se refere a solos,

tipo de uso da terra e com distribuição espacial uniforme da precipitação. Suas principais vantagens são o fato de poder simular uma ampla variedade de práticas conservacionistas e de poder ser aplicado a bacias com carência de dados hidrológicos, já que o modelo não necessita de calibração. Suas principais limitações são o fato de não fornecer informações durante a tormenta, a aproximação de estado permanente e só poder apresentar variações na direção da declividade.

### **Modelo ANSWERS**

O modelo ANSWERS ("Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation") foi implementado para estudar o impacto de uso do solo, prática conservacionista e manejo de bacia na qualidade de água (Beasley e Huggins, 1981). A descrição do modelo é apresentada no item 3.3.

Trata-se de um modelo distribuído, considerando a bacia dividida em uma malha de pequenos elementos, nos quais os parâmetros de hidrologia e erosão são considerados uniformes. Comprovando a dificuldade de classificação dos modelos dentro dos critérios de empírico, conceitual ou mecanicista, pode-se destacar que Kauark Leite (1990) o classifica como modelo conceitual, enquanto que Hadley et al. (1985) o cita entre os modelos de simulação dinâmica.

O modelo apresenta como vantagem principal a possibilidade de representar com grande precisão as variações espaciais dos parâmetros e variáveis do sistema. Sua grande desvantagem é justamente a complexidade de seu arquivo de entrada e a dificuldade de se discretizar a bacia.

### **Modelo CSU**

O modelo CSU ("Colorado State University") foi desenvolvido por Li, Simons e Stevens em 1977, a partir do modelo de Li (1974). O

modelo CSU é um modelo distribuído de erosão e produção de sedimentos para fluxo superficial não-permanente. Ele fornece a erosão e a produção de sedimentos distribuídas no tempo e no espaço, além da distribuição granulométrica dos sedimentos.

A intercepção é suposta proporcional à percentagem da cobertura e só ocorre no início da chuva. A infiltração é avaliada pelo método de Green-Ampt. O escoamento superficial do excesso de precipitação é descrito pela aproximação de onda cinemática, resolvida pelo método de diferenças finitas.

A equação de conservação de massa para sedimentos é resolvida numericamente para cada tipo de partícula. A separação por impacto de gota de chuva é admitida proporcional ao quadrado da intensidade de chuva. A desagregação através do escoamento superficial é avaliada proporcionalmente à diferença entre a capacidade de transporte e a perda de solo pela precipitação.

O transporte de sedimentos para cada partícula é dividido em transporte de fundo, calculado pela fórmula de Meyer-Peter e Muller, e transporte em suspensão, calculado pela fórmula de Einstein modificada. A capacidade de transporte para o conjunto dos sedimentos é o somatório de todas as taxas de transporte das partículas.

O modelo CSU foi desenvolvido para eventos independentes, mas, acoplado a um modelo hidrológico mais geral, pode trabalhar com simulação contínua de produção de sedimentos.

Este modelo é extremamente poderoso, utilizando fórmulas de diferenças finitas para propagar água e sedimentos (Hussein, 1982). Porém, a suposição de onda cinemática pode restringir o seu uso nos casos em que houver controle de jusante, e a utilização de formulações empíricas como Meyer-Peter e Muller reduzem a sua aplicabilidade.

### 2.3.3 - Quadro Comparativo dos Modelos

É apresentado, a seguir, um quadro comparativo dos modelos anteriormente descritos, destacando os elementos de classificação sugeridos por Kauark Leite (1986), ou seja, estrutura (ESTRUT), esquema de cálculo (ESQUEM CALCUL), elementos simulados (ELEMEN SIMUL), intervalo de tempo (INTERV TEMPO) e calibração (CALIB). Apresentam-se, também, os modelos utilizados na componente hidrológica (COMPONEN HIDROLOG) e na componente de erosão-sedimentação (COMPONEN EROS-SED).

A estrutura se refere ao fato do modelo ser conceitual ou empírico, conforme ele considere ou não os processos físicos do sistema. Os primeiros são, ainda, subdivididos em semi-conceituais e conceituais, conforme preservem principalmente a continuidade de volume ou levem em conta também os efeitos dinâmicos dos fenômenos. O esquema de cálculo divide os modelos em três categorias: concentrado, quando considera a bacia como um todo, com os parâmetros e variáveis sofrendo alterações somente em função do tempo; distribuído, quando estes componentes variam também segundo o espaço; e modelos distribuídos de campo, quando são desenvolvidos para representar um campo agrícola. Quanto aos elementos simulados, o autor destaca os principais subprocessos que envolvem o fenômeno como um todo. O intervalo de tempo se refere à precisão utilizada na simulação, ou seja, se o modelo é anual, mensal, diário, etc. Finalmente, a calibração se refere à necessidade ou não de calibrar os parâmetros do modelo.

Além destes modelos, descritos no item 2.3.2 do presente trabalho, diversos outros poderiam ainda ser citados. Dentre eles, destacam-se, por ordem cronológica: Modelo USDAHL, apresentado em 1969, por Glymph e Holtan (Knisel e Nicks, 1980); Modelo USGS, apresentado em 1969, por Dawdi et al. (Li, 1974); Modelo de Schaake, apresentado em 1971 (Li, 1974); Modelo PTR, desenvolvido pela Hydrocomp, em 1973 (Knisel e Nicks, 1980); Modelo WASCH, apresentado



Quadro 2.1 -Quadro Comparativo dos Modelos

INOME DO MODELO	ANO	ESTRUT	ESQUEM CALCUL	ELEMEN SIMUL	INTERV TEMPO	CALIB	COMPONEN HIDROLOG	COMPONEN EROS-SEDI
USLE	54	Empir.	Concen	ERSP	Ano	Não	-	USLE
MUSLE	75	Semi- Concei	Concen	ERS	Evento	Não	H1	MUSLE
SWM-Neg	66	Semi- Concei	Distri	ES,EH, PE,ERS	Hora	Sim	Stanford	Negev
ACTMO	75	Semi- Concei	Concen	ES,EH, PE,ERS	Hora	Sim	USDAHL	MUSLE
CSU	77	Concei	Distri	ES,EH, PE,ERS	15 min	Sim	Infiltr, O.Cinem, Pr.Canal	E1,E2, E3,E4, E5
ARM	78	Semi- Concei	Concen	ES,EH, PE,ERS	15 min	Sim	Stanford	Negev
CPM-CNS	79	Concei	Concen	ES,PE, ERS	Mês	Não	SCSCN, Gr.-Ampt USDAHL	MUSLE
CREAMS	80	Concei	Distri de Campo	ES,PE, ERS	Dia	Não	SCSCN, Infiltr.	E2,E3, E4,E5, E6
ANSWERS	80	Concei	Distri	ES,EH, PE,ERS	15 min	Mínim	USDAHL, Infiltr, O.Cinem, Pr.Canal	E1 E2 E4 E5

Legenda:

ES = Escoamento Superficial; H1 = Qualquer modelo de predição;  
 EH = Escoamento Hipodérmico; E1 = Desagregação por Salpicadura;  
 PE = Percolação; E2 = Desagregação por Fluxo Superf.;  
 ERS = Erosão; E3 = Desagregação por Fluxo Concen.;  
 ERSP = Erosão Primária; E4 = Cap.de Transp.do Fluxo Superf.;  
 O.Cinem = Onda Cinemática; E5 = Cap.de Transp.do Fluxo Concen.;  
 Pr.Canal = Propagação em Canal; E6 = Deposição

em 1975, por Bruce et al. (Knisel e Nicks, 1980); Modelo NPS, apresentado em 1976, por Donigian e Crawford (Knisel e Nicks, 1980); Modelo SPNM, apresentado em 1978, por Williams e Haan (Kauark Leite, 1986); Hussein (1982); Akan e Ezen (1982); Moore (1984); Modelo HSPF, apresentada por Donigian et al. em 1984 (Kauark Leite, 1986); Modelo SWRRB, apresentado por Arnold e Williams, em 1985 (Kauark Leite, 1986); Hrissantou (1986); WEPP (USDA, 1987 e 1989; Chaves e Nearing, 1990); Modelo ACRU (Schulze e George, 1989); Modelo MULTSED; Modelo SEDIMOT II (Wilson et al., n.d.). Além destes, Marsalek (1989) ainda cita os seguintes modelos: AGNPS, GAMES/P, GWLF, LANDRUN, LANDS, SWAM, UNIT AREA LOADS e UTM-TOX.

Diante deste quadro, surge naturalmente a pergunta:

o que diferencia e justifica tantos modelos?

Na realidade, os modelos são a composição de algoritmos que retratam diferentes processos. A combinação destes algoritmos pode gerar um infinito número de modelos. Cada autor procurou estabelecer uma variante em função da sua familiaridade com cada algoritmo, de seu conhecimento sobre os parâmetros e conforme o tipo específico de problema a ser enfrentado. Este problema poderia ser desde carência de dados até a necessidade de se procurar contemplar de forma diversa um processo que não estivesse bem representado nos modelos disponíveis.

Diante da grande quantidade de modelos existentes, torna-se discutível a necessidade de criação e desenvolvimento de novos modelos. É cada vez mais justificada a opção de selecionar um dos modelos já existentes e/ou modificá-lo para satisfazer as necessidades específicas do usuário. Esta seleção deverá ser efetuada, principalmente, em função do conhecimento que se dispõe sobre cada um dos modelos. Faz-se necessário, portanto, salientar as diferenças existentes entre os diversos enfoques que podem norteá-los para que sua utilização possa ser efetuada adequadamente.

Dois trabalhos efetuando este tipo de análise comparativa foram recentemente apresentados por Galvão (1990) e Kauark Leite (1990).

No trabalho de Galvão (1990), três modelos de enfoques distintos foram aplicados a pequenas bacias em Sumé, no Estado da Paraíba: o modelo BAC400, de abordagem empírica, através do ajuste de três curvas hiperbólicas, que procuram relacionar a lâmina escoada com a precipitação; o modelo MODIBI, de abordagem conceitual, determinística e global, a nível diário; e o modelo WESP, distribuído e dito de abordagem fundamental. Os razoáveis ajustes dos três modelos a Sumé não desaconselham o uso de nenhum deles, mas as relações empíricas para estimativa da erosão não apresentaram resultados satisfatórios.

No trabalho de Kauark Leite (1990), dois modelos são aplicados a sub-bacias da bacia do rio Orgeval, na França: um modelo empírico, baseado nos modelos CREAMS e SWRRB; e o modelo conceitual HSPF. Suas conclusões são de que os modelos conceituais são por demais complexos para simular cargas e concentrações na saída de bacias rurais. A informação disponível não é suficiente para calibrar os modelos e os resultados das simulações são geralmente ruins. Estes modelos, como ferramenta de gestão, não são mais eficientes que outros modelos mais simples. Além disto, ele observa que, a princípio, estes modelos seriam capazes de simular o impacto na qualidade da água devido à modificação de práticas agrícolas. Esta característica pressupõe o realismo na representação dos processos dentro da bacia (e não apenas no seu exutório). Este realismo nunca é verificado, mesmo porque os dados necessários dificilmente são disponíveis. Portanto, o autor conclui que estes modelos não podem ser utilizados com confiabilidade para tomada de decisão.

O presente estudo procura justamente comparar e analisar a aplicabilidade de diferentes enfoques de modelagem, buscando trazer novos subsídios para responder à pergunta formulada.

### 3 - MODELOS UTILIZADOS

#### 3.1 - Considerações Iniciais

Conforme salientado anteriormente, há, atualmente, um grande número de modelos para simular os processos de produção e transporte de água e sedimentos em bacias hidrográficas. Estes modelos apresentam maior ou menor nível de precisão nos resultados e nos dados de entrada, conforme suas características e objetivos.

Assim, tendo-se em vista o objetivo de comparar e destacar as diferenças de utilização dos enfoques de modelagem empírico e conceitual e dos esquemas de cálculo concentrados e distribuídos nos processos de produção e transporte de água e sedimentos em pequenas bacias rurais, procurou-se selecionar metodologias que atendessem a estas características. O principal critério para esta seleção foi o de adotar metodologias disponíveis, consagradas e, dentro do possível, bem conhecidas.

O modelo empírico utilizado foi a Equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MUSLE), com os valores de volume de escoamento superficial e vazão de pico estimados alternativamente pela Metodologia do Soil Conservation Service (SCS) ou pelo modelo IPH-II. O modelo conceitual distribuído escolhido foi o ANSWERS.

São apresentadas, a seguir, as formulações dos modelos utilizados e a metodologia adotada para estimativa dos valores de seus parâmetros. No item 3.2 é apresentado o Modelo IPH2SED, montado utilizando as metodologias dos modelos IPH-II, SCS e MUSLE. No item 3.3 é descrito o modelo ANSWERS.

## 3.2 - Modelo IPH2SED

### 3.2.1 - Estrutura do Modelo

O modelo IPH2SED, montado no presente estudo, é uma adaptação do modelo determinístico semi-conceitual IPH-II para permitir a predição de valores de perda de solos em eventos de pequenas bacias rurais através da MUSLE. Ele possui como opção a Metodologia do Soil Conservation Service, possibilitando a sua utilização em bacias com carência de dados de campo. Não se trata, portanto, de um novo modelo, mas sim de uma adaptação de modelos disponíveis, consagrados pelo uso e perfeitamente conhecidos, reunidos com o intuito de possibilitar a comparação de diferentes enfoques de modelagem. A denominação teve o objetivo de sintetizar o conjunto de algoritmos utilizados.

O modelo possui dois submodelos principais:

- submodelo hidrológico e
- submodelo de erosão.

O submodelo hidrológico possui como opções a utilização do modelo IPH-II ou da metodologia do Soil Conservation Service. Quando não houver dados suficientes para ajuste e verificação do modelo IPH-II, o volume de escoamento superficial e de sua vazão de pico podem ser estimados pela metodologia do SCS, utilizando o Método dos Números-Curva para predição do volume e o Hidrograma Unitário Triangular para cálculo da vazão de pico. O submodelo de erosão utiliza estas estimativas como dado de entrada para prever o aporte de sedimentos ao final do evento, através da MUSLE.

Um fluxograma simplificado apresentando a estrutura do modelo é apresentado na figura 3.1, e os algoritmos dos modelos utilizados como submodelos hidrológico e de erosão, IPH-II, SCS e MUSLE, são descritos nos itens seguintes.

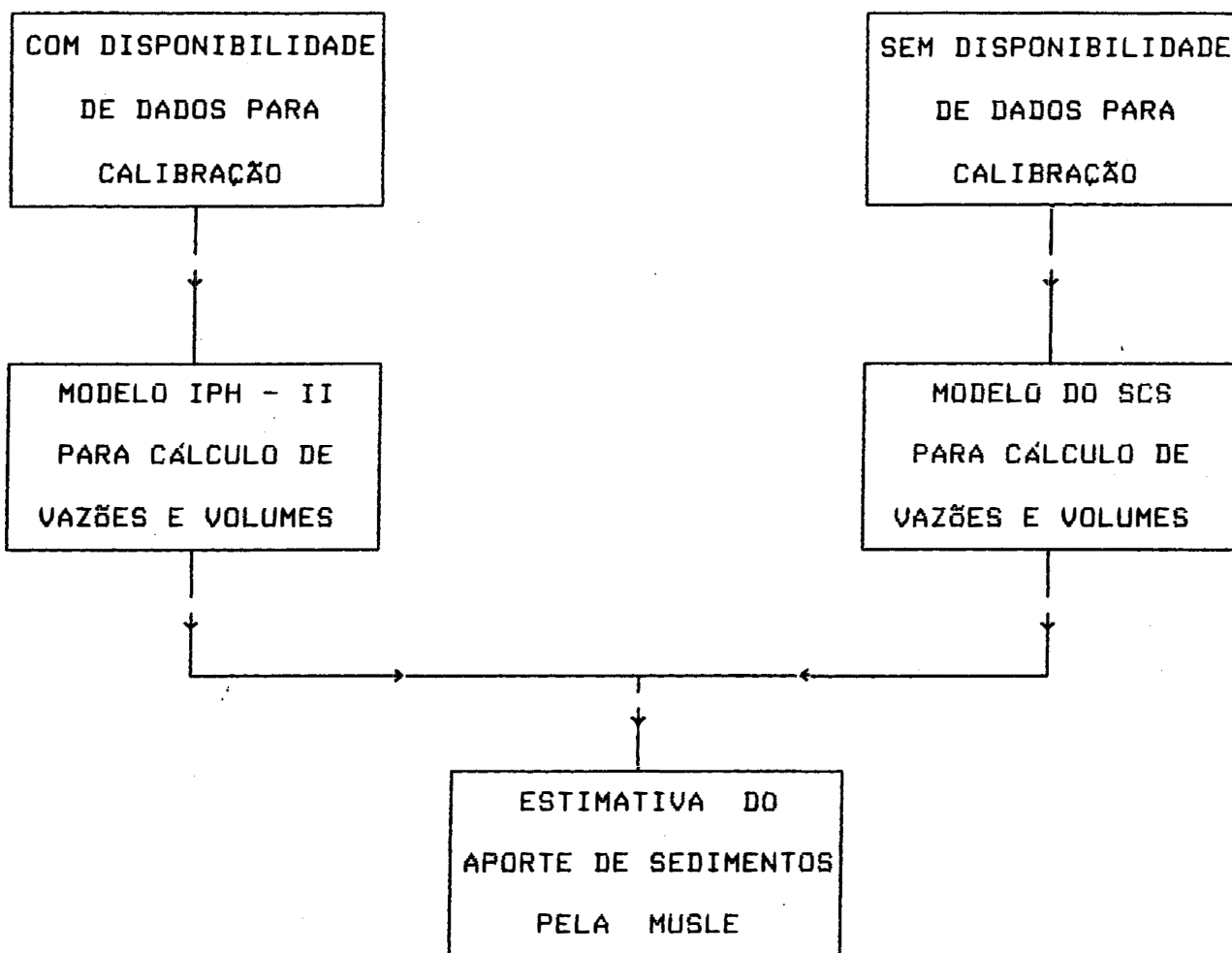


Figura 3.1 - Estrutura do Modelo IPH2SED

### 3.2.2 - Modelo IPH-II

Este modelo foi desenvolvido por Tucci et al. (1983) no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com o objetivo de permitir seu uso para projetos de engenharia em bacias rurais e urbanas.

O modelo é simples, com poucos parâmetros, baseado em metodologias amplamente difundidas e tem a finalidade de facilitar seu uso para bacias de diferentes características. O mesmo deve ser utilizado em bacias que não necessitem de propagação no leito do rio ou naquelas em que este efeito não é importante no processo, já que o modelo se refere somente ao escoamento na superfície da bacia. Sua principal desvantagem é o empirismo dos parâmetros.

O modelo baseia-se num algoritmo de separação de escoamento desenvolvido originalmente por Berthelot (1970) com base na equação de Horton, e estendido posteriormente por Tucci (1979).

Segundo Bertoni (1989), o modelo é do tipo concentrado, utilizando como entradas dados relativos a precipitação e evaporação potencial média sobre a bacia. A saída corresponde ao hidrograma estimado na seção de controle da bacia.

Na versão utilizada para microcomputador do tipo PC, três algoritmos básicos são utilizados na composição deste modelo:

- perdas por evaporação e interceptação;
- separação do escoamento;
- propagação dos escoamentos superficial e subterrâneo;

A seguir é apresentada uma breve síntese destes algoritmos. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em Tucci et al. (1983) e Tucci (1979 e 1986).

### **Algoritmo de Perdas por Evaporação e Intercepção:**

Se a precipitação excede a evaporação potencial, esta última é subtraída daquela para determinar a lâmina efetiva na camada superior do solo. A diferença é retida por intercepção até que sua capacidade máxima (Rmax) seja satisfeita. Quando a precipitação é menor que a evaporação potencial, este volume não satisfeito é atendido pelo reservatório de intercepção (cobertura vegetal e depressões). Se este reservatório for totalmente esgotado, o déficit de evaporação potencial passa a ser atendido pela água contida no solo, através da relação

$$Est = Ept \cdot S(t)/Smax$$

onde: Est = evaporação do solo no tempo t;

Ept = evaporação potencial;

S(t) = Armazenamento no tempo t;

Smax = Teor máximo de umidade do solo.

Uma parcela da precipitação remanescente do algoritmo de perdas, associada às áreas impermeáveis (Aimp), é escoada apenas superficialmente, sem passar pelo algoritmo de infiltração.

### **Algoritmo de Separação do Escoamento (Infiltração):**

A versão utilizada no modelo é uma simplificação do algoritmo desenvolvido por Berthelot para o cálculo da infiltração e da percolação. Berthelot, utilizando a equação da continuidade em combinação com a equação de Horton e uma função empírica para a percolação, solucionou o problema do uso da equação de Horton quando a intensidade da precipitação é inferior à capacidade de infiltração do solo. As equações que regem a versão simplificada utilizada no modelo IPH-II são:



$$\text{Eq. de Horton: } I(t) = I_b + (I_o - I_b) \cdot h^t \quad (3.1)$$

$$\text{Equação de percolação: } T(t) = I_b \cdot (1 - h^t) \quad (3.2)$$

Combinando as duas últimas equações resulta:

$$S(t) = bt \cdot T(t) \quad (3.3)$$

$$S(t) = ai + bi \cdot I(t) \quad (3.4)$$

$$S_{\max} = \dots - I_o / \ln h \quad (3.5)$$

sendo:  $bt = -I_o / (I_b \cdot \ln h)$

$$ai = - I_o^2 / ((I_o - I_b) \cdot \ln h)$$

$$bi = I_o / ((I_o - I_b) \cdot \ln h)$$

$$h = e^{-k}$$

onde:  $I(t)$  = Infiltração no tempo  $t$ ;

$I_b$  = Capacidade mínima de infiltração do solo;

$I_o$  = Capacidade inicial de infiltração do solo;

$T(t)$  = Percolação no tempo  $t$ ;

$k$  = Constante, característica do solo;

A figura 3.2 ilustra as funções  $I(t)$  e  $T(t)$  como funções do tempo  $t$  e do armazenamento  $S(t)$ .

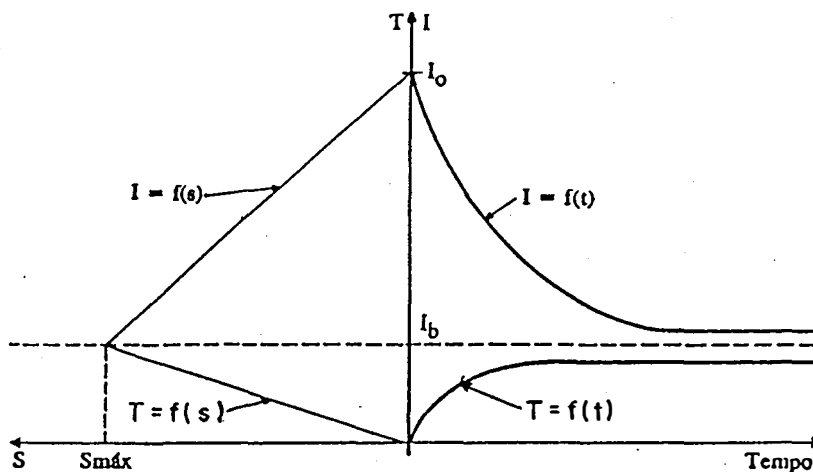


Figura 3.2 - Funções do Algoritmo de Infiltração do Modelo IPH-II (Tucci et al., 1983)

Quando a precipitação ( $P(t)$ ) é maior que a infiltração, a equação de Horton é utilizada para cálculo da infiltração no próximo intervalo de tempo. Neste caso, o armazenamento é determinado em função da infiltração, o volume infiltrado ( $VI$ ) é calculado pela integração da infiltração ao longo do intervalo de tempo de cálculo, o volume escoado superficialmente ( $VS$ ) é obtido como o volume precipitado menos o infiltrado, e o volume percolado ( $VP$ ) é estimado pelo balanço do armazenamento e do volume infiltrado. Assim:

$$I(t+1) = I_b + [I(t) - I_b] \cdot h^{\Delta t} \quad (3.6)$$

$$S(t+1) = a_i + b_i \cdot I(t) \quad (3.7)$$

$$VI = I_b \cdot \Delta t + [I(t) - I_b] \cdot (h^{\Delta t} - 1) / \ln h \quad (3.8)$$

$$VS = P_t \cdot \Delta t - VI \quad (3.8)$$

$$VP = S(t) - S(t+1) + VI \quad (3.9)$$

Quando a precipitação é menor que a infiltração, a equação de Horton não pode ser utilizada. Neste caso, o armazenamento é determinado em função do armazenamento anterior, do volume precipitado e da percolação. A infiltração é obtida em função do armazenamento. Assim:

$$S(t+1) = S(t) + P_t \cdot \Delta t - [T(t) + T(t+1)] \cdot \Delta t / 2 \quad (3.10)$$

$$T(t+1) = S(t+1) / b_t \quad (3.11)$$

$$I(t+1) = [S(t+1) - a_i] / b_i \quad (3.12)$$

Os volumes infiltrado, escoado superficialmente e percolado são determinados em função da relação entre a precipitação e a infiltração no tempo  $t+1$ . Se a precipitação for menor que a infiltração, o volume escoado será nulo, o volume infiltrado será igual ao precipitado e o percolado será calculado pelo balanço do armazenamento e do volume infiltrado. Se a precipitação for maior que a infiltração, deve-se determinar o instante em que estes dois valores se igualaram, calculando os volumes em função deste tempo, de forma análoga aos casos anteriores.

## Algoritmo de Propagação Superficial e Subterrânea:

O volume de escoamento superficial determinado no algoritmo anterior é propagado até o exutório da bacia pelo método de Clark.

O método de Clark é composto por dois processos: o armazenamento superficial, mediante um Reservatório Linear Simples; e o efeito de translação, mediante o Histograma Tempo-Área (HTA).

O Histograma Tempo-Área representa os diferentes tempos com que cada parte da bacia contribui para a seção principal. Ele pode ser determinado pelo conhecimento detalhado da bacia ou, quando não houver informações suficientes por métodos sintéticos (HEC, 1974), em função do tempo de concentração da bacia ( $t_c$ ), da área (A), da forma da bacia e do tempo de percurso de cada área contribuinte.

A chuva efetiva, após considerado o efeito de translação na bacia é obtida pela convolução das parcelas de chuva efetiva com as ordenadas do HTA.

Como o HTA contempla unicamente a translação, aplica-se ao histograma resultante um modelo de Reservatório Linear Simples, para levar em conta o efeito de armazenamento, resultando na seguinte expressão:

$$Q(t) = Q(t-1) \cdot e^{-\Delta t/k_{sup}} + P_e \cdot (1 - e^{-\Delta t/k_{sup}}) \quad (3.13)$$

onde:  $Q(t)$  = vazão superficial no tempo  $t$ ;

$\Delta t$  = intervalo de tempo na simulação;

$P_e$  = chuva efetiva após a aplicação do HTA;

$k_{sup}$  = parâmetro do modelo.

A propagação subterrânea é calculada pelo modelo Reservatório Linear Simples, sendo que a entrada no aquífero é o volume percolado, resultando na equação

$$Q_{sub}(t) = Q_{sub}(t-1) \cdot e^{-\Delta t/k_{sub}} + V_p \cdot (1 - e^{-\Delta t/k_{sub}}) \quad (3.14)$$

onde:  $Q_{sub}(t)$  = vazão subterrânea no tempo  $t$ ;  
 $V_p$  = volume percolado;  
 $k_{sub}$  = parâmetro do modelo.

O fluxograma geral do modelo é apresentado na figura 3.3.

### **Estimativa dos Parâmetros:**

Os parâmetros utilizados pelo modelo são:  $t_c$ ,  $A_{imp}$ ,  $HTA$ ,  $I_o$ ,  $I_b$ ,  $h$ ,  $R_{max}$ ,  $k_{sup}$ ,  $k_{sub}$  e as condições iniciais (percolação, vazão de base e vazão superficial). Devido ao empirismo dos parâmetros, praticamente todos eles, exceto  $A_{imp}$ , são obtidos por calibração. O valor de  $t_c$  pode ser estimado a partir de fórmulas empíricas ou por análise do hidrograma.

A calibração dos parâmetros pode ser efetuada manualmente, por tentativas, ou a partir de algoritmos de otimização automática. No presente trabalho foi adotada a técnica de otimização manual, devido ao maior ganho de sensibilidade sobre o comportamento do escoamento na bacia.

### **3.2.3 - Metodologia do Soil Conservation Service**

A metodologia do Soil Conservation Service é composta pela combinação do Método dos Números-Curva do Soil Conservation Service (SCSCN - "Soil Conservation Service Curve Number") com um Hidrograma Unitário Triangular (HUT). O Método dos Números-Curva é utilizado para separação dos escoamentos e cálculo do volume de escoamento superficial e o Hidrograma Unitário Triangular tem o objetivo de determinar o valor da vazão de pico.

Trata-se de um modelo de projeto, concentrado, que utiliza

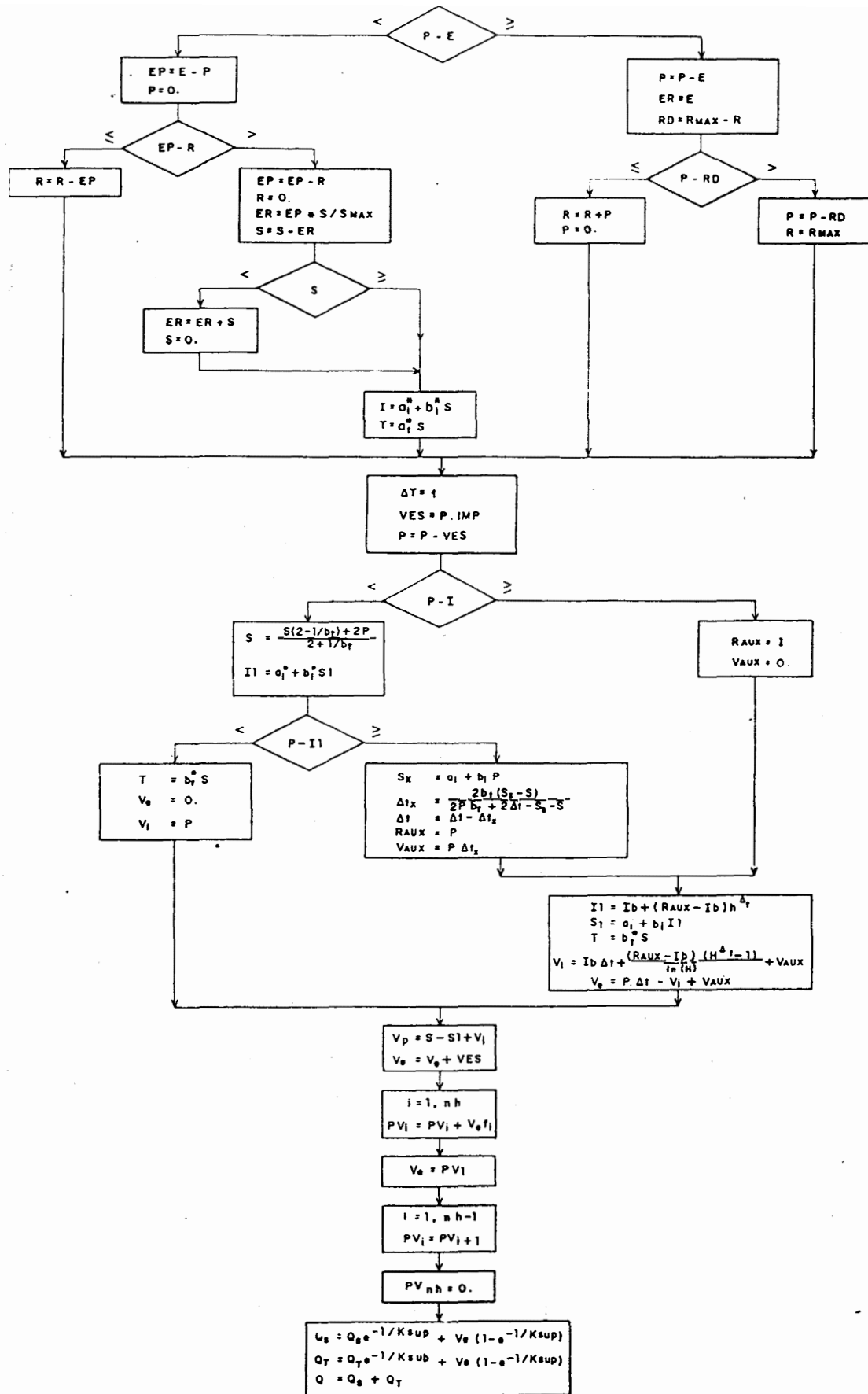


Figura 3.3 - Fluxograma Geral do Modelo IPH-II (Tucci et al., 1983)

formulações obtidas de forma empírica com o objetivo de ser aplicado a pequenas bacias com carência de dados de campo.

#### Método dos Números-Curva (SCSCND):

O Método dos Números-Curva do Soil Conservation Service (USDI, 1977; Sanchez, 1987; Chaves, 1991) foi desenvolvido a partir de informações de bacias agrícolas em diversas regiões dos Estados Unidos. Trata-se de um método empírico para determinar o escoamento superficial acumulado em função da precipitação acumulada, supondo que o escoamento é proporcional ao escoamento máximo potencial, assim como o volume de infiltração é proporcional ao máximo armazenamento possível. Assim, obtém-se a formulação:

$$Q_{ac} = \frac{(P_{ac} - I_a)^2}{P_{ac} - I_a + S_m} \quad \text{para } P_{ac} \geq I_a$$

(3.15)

$$Q_{ac} = 0 \quad \text{para } P_{ac} < I_a$$

onde:  $P_{ac} - I_a$  = Escoamento máximo potencial;  
 $S_m$  = Máximo armazenamento possível;  
 $Q_{ac}$  = Escoamento superficial acumulado;  
 $P_{ac}$  = Precipitação acumulada;  
 $I_a$  = Perdas iniciais.

De forma empírica, define-se:

$$S_m = \frac{25400}{CN} - 254 ; \quad I_a = 0,2 \cdot S_m \quad (3.16)$$

onde CN é um Número-Curva ("Curve Number"), ou Número de Escoamento, que varia de 0 a 100. O parâmetro CN é estimado a partir de

informações sobre o tipo, manejo, permeabilidade e umidade antecedente do solo.

### Hidrograma Unitário Triangular (HUT):

O método do hidrograma unitário é um procedimento para determinar o hidrograma superficial advindo de uma chuva efetiva, uniformemente distribuída na área de drenagem e com intensidade uniformemente distribuída no tempo, durante a duração do evento chuvoso (Canedo, 1989). Para sua determinação, são necessários registros simultâneos de chuva e vazão nem sempre disponíveis, motivo pelo qual são utilizados hidrogramas unitários sintéticos, obtidos a partir de características físicas da bacia hidrográfica.

O método do Hidrograma Unitário Triangular (Canedo, 1989) é um hidrograma unitário sintético, baseado em relações geométricas obtidas na figura 3.4.

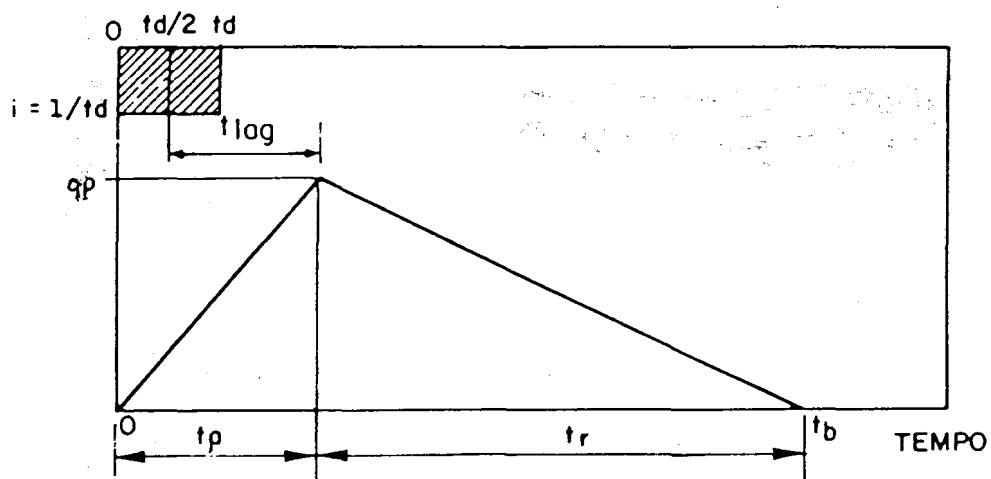


Figura 3.4 - Hidrograma Unitário Triangular (Canedo, 1989)

Assim, para uma precipitação de 1 mm, considerando que a área é dada em km<sup>2</sup>, os tempos em horas, a vazão de pico em m<sup>3</sup>/s e que o volume do HUT é igual a 1, obtém-se

$$q_p = \frac{20 \cdot A}{36 \cdot t_b} \quad (3.17)$$

$$t_b = t_p + t_r$$

$$t_p = t_d/2 + t_{lag}$$

onde:  $q_p$  = Vazão de pico;  
 $t_b$  = Tempo de base do HUT;  
 $t_p$  = Tempo de ascensão do HUT;  
 $t_r$  = Tempo de recessão do HUT;  
 $t_{lag}$  = Tempo de pico do HUT;  
 $t_d$  = Tempo de duração da chuva efetiva;  
 $A$  = Área da bacia.

O Soil Conservation Service, após estudos em diversas bacias de pequeno e médio porte sugere que se adote

$$t_r = 1,67 \cdot t_p \quad (3.18)$$

$$t_{lag} = 0,6 \cdot t_c \quad (3.19)$$

onde  $t_c$  é o tempo de concentração da bacia.

A vazão superficial é calculada através do princípio da superposição, válido para modelos lineares. Assim:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^t P(i) \cdot HUT(t - i + 1) \quad \text{para } t \leq t_b$$

e

$$Q(t) = \sum_{i=t-t_b}^t P(i) \cdot HUT(t - i + 1) \quad \text{para } t > t_b \quad (3.20)$$



onde:  $P(i)$  = precipitação efetiva no bloco  $i$ ;  
 $HUT(j)$  = ordenada do HUT no tempo  $j$ .

A vazão de pico corresponde à máxima vazão superficial calculada.

#### Estimativa dos Parâmetros:

Este modelo apresenta apenas quatro parâmetros a serem determinados: CN,  $I_a$ ,  $t_d$  e  $t_{lag}$ .

No presente estudo, o valor de  $t_{lag}$  foi sempre adotado conforme a recomendação do SCS (Equação 3.19), mas o valor de  $I_a$  foi testado alternativamente como o valor de 20 % do armazenamento máximo, ou como valor estimado a partir de análise do hidrograma. O valor de  $t_c$  corresponde ao valor ajustado no modelo IPH-II, para cada um dos eventos.

O valor de CN correspondente a  $I_a = 0,2.S_m$  foi extraído das tabelas A1, A2 e A3, reproduzidas, a partir de Sanchez (1987), no Anexo A. A tabela A1 apresenta os valores de CN para a condição II de umidade do solo, equivalente a condições médias para cheias e correspondente a valores próximos da capacidade de campo. A tabela A2 fornece os fatores de correção para as condições I e III, correspondentes, respectivamente, a solo seco, mas não até o ponto de murcha, e à situação de saturação do solo. A tabela A3 apresenta o critério sugerido pelo SCS para decidir sobre a condição de umidade antecedente que deve ser considerada, com base na precipitação total ocorrida nos cinco dias anteriores ao evento e no estágio de desenvolvimento da cultura.

O valor de CN correspondente a  $I_a$  estimado com base no hidrograma observado é determinado pela fórmula

$$CN = 25400 / ( (Pac - I_a) * [ (Pac - I_a) / Q_{ac} - 1 ] + 254 ) \quad (3.21)$$

### 3.2.4 - MUSLE - Equação Universal de Perda de Solos Modificada

A Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE) (Williams, 1975a e 1975b) é um modelo de predição do aporte de sedimentos oriundos de pequenas bacias rurais ao exutório da bacia, após a ocorrência de um evento chuvoso.

Ela difere da Equação Universal de Perda de Solos (USLE) (Wischmeier e Smith, 1978) pela substituição do fator de erosividade da precipitação por um fator de escoamento. Segundo Williams e Berndt (1977), o fator de erosividade da precipitação representa a energia utilizada apenas para o destacamento das partículas, enquanto que o fator de escoamento representa a energia utilizada para o destacamento e transporte de sedimentos. Com isto, segundo os autores, ela dispensa a utilização de relações empíricas adicionais de aporte de sedimentos e é aplicável a eventos isolados.

A MUSLE é expressa por

$$Y = R_w \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \quad (3.22)$$

onde: Y = Aporte de sedimentos para um evento isolado;;  
Rw = Fator de escoamento;  
K = Fator de erodibilidade do solo da USLE;  
C = Fator de cobertura e manejo da USLE;  
P = Fator de prática de controle da USLE;  
LS = Fator topográfico da USLE.

O fator Rw avalia o potencial erosivo do escoamento superficial. O fator K avalia a suscetibilidade do solo à erosão, dependendo de propriedades dos solos que praticamente não variam com o tempo, como a distribuição granulométrica, a percentagem de matéria orgânica, a estrutura, etc. Os fatores L e S podem ser englobados em um único fator topográfico, o fator LS, que avalia os efeitos de comprimento e declividade da vertente sobre a erosão. O

fator C leva em conta três subfatores: um, relativo à cobertura vegetal; outro, relativo à cobertura do solo; e o terceiro relacionado com efeitos subsuperficiais devidos a incorporação de resíduos, lavoura, consolidação do solo e rugosidade. O fator P leva em conta as práticas conservacionistas mais comuns, como terraços, curvas de nível, faixas de vegetação, etc. (Hussein, 1982; Wilson et al., n.d.).

O fator de escoamento é calculado por

$$Rw = a \cdot (Qs \cdot qp)^b \quad (3.23)$$

onde:  $Qs$  = Volume de escoamento superficial;  
 $qp$  = Vazão de pico do escoamento superficial;  
 $a, b$  = Coeficientes.

Obs.:  $Qs$  e  $qp$  obtidos com qualquer modelo de predição de escoamento.

Para  $Y$  em toneladas,  $Qs$  em  $m^3$ ,  $qp$  em  $m^3/s$  e  $K$  em  $(t \cdot ha \cdot h)/(ha \cdot MJ \cdot mm)$ , tem-se (Williams, 1975a e 1975b):

$$a = 89,6 \quad e \quad b = 0,56$$

#### Estimativa dos Parâmetros

Os parâmetros a estimar para a MUSLE são  $K$ ,  $LS$ ,  $C$  e  $P$ .

O valor de  $K$  é obtido, para cada tipo de solo, pela equação (Wischmeier e Smith, 1978)

$$K = [2,1 \cdot M^{1,14} \cdot 10^{-4} (12 - ka) + 3,25(kb - 2) + 2,5(kc - 3)] \cdot 1,313/100 \quad (3.24)$$

onde:  $M$  = (% de Silte + Areia Muito Fina)/(100 - % de Argila);  
 $ka$  = % de matéria orgânica;  
 $kb$  = coeficiente relativo à estrutura do solo;

$k_c$  = classe de permeabilidade.

K em (t.ha.h)/(MJ.ha.cm)

No caso de existir mais de um tipo de solo, o valor de K para toda a bacia é obtido pela média ponderada dos valores de cada solo, tendo como ponderador a área.

O valor de LS é obtido pela equação (Williams e Berndt, 1977)

$$LS = (L/22,1)^{0,5} (0,065 + 0,0454 S + 0,0065 S^2) \quad (3.25)$$

onde: L = comprimento médio de rampa em metros, calculado como a metade do menor lado do retângulo equivalente, ou seja (Heras, 1972; Canali, 1981):

$$L = 0,5 [ Per/4 - \sqrt{(Per/4)^2 - A} ] \quad (3.26)$$

Per = perímetro da bacia;

S = declividade média da bacia em percentagem, obtida a partir de amostragem nos vértices das quadrículas que formam a malha do modelo ANSWERS (metodologia descrita no Anexo D). Os valores de declividade assim obtidos foram praticamente iguais àqueles determinados por

$$S = (LC \cdot \Delta h) / A \quad (3.27)$$

onde LC é a soma dos comprimentos das curvas de nível da bacia e  $\Delta h$  é desnível entre duas curvas adjacentes.

O valor de C é estimado, para cada cultura e cada época do ano, a partir da tabela A4, reproduzida, a partir de Bertoni e Lombardi Neto (1985), no Anexo A.

No caso de existir mais de uma cultura, o valor de C para toda a bacia é obtido pela média ponderada dos valores de cada cultura, tendo como ponderador a área.

O valor de P é obtido em função das práticas conservacionistas utilizadas. Ele é igual a 1 para o caso de plantio morro abaixo ou

quando a declividade média da bacia é maior que 24 % ; vale 0,5 para plantio em contorno; tem o valor de 0,4 para alternância de capinas e plantio em contorno; e vale 0,2 quando da utilização de cordões de vegetação permanente (Wischmeier e Smith, 1978; Bertoni e Lombardi Neto, 1985).

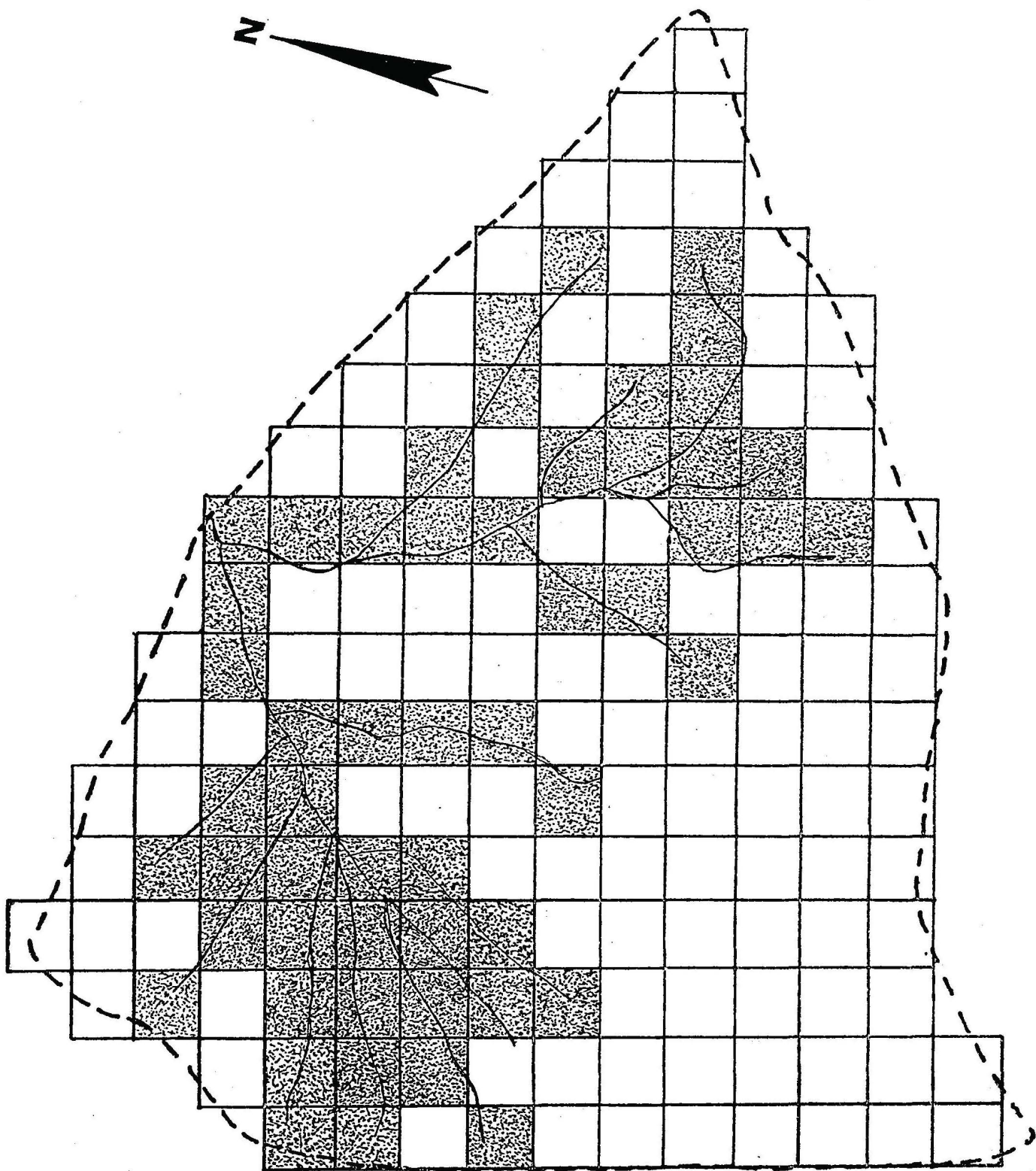
### 3.3 - Modelo ANSWERS

O modelo ANSWERS ("Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation"), desenvolvido por Beasley et al. (1980) é um modelo conceitual, distribuído, capaz de simular a distribuição de sedimentos e concentração de poluentes agrícolas nos diferentes pontos da bacia. Uma visão geral do modelo foi fornecida no item 2.3.2.2. Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta de suas principais características. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em Beasley et al. (1980) e Beasley e Huggins (1981).

O modelo ANSWERS é um modelo determinístico baseado na hipótese de que em cada ponto da bacia existem relações funcionais entre o fluxo de água e os parâmetros hidrológicos que o governam. Este fluxo pode ser utilizado conjuntamente com relações apropriadas para modelar outros fenômenos de transporte relacionados, tais como a erosão do solo.

Uma bacia, para ser modelada, é suposta como um conjunto de vários elementos, conforme apresentado na figura 3.5. Um elemento é definido como sendo uma área onde todos os parâmetros hidrológicamente significativos são considerados constantes. Neste modelo, a forma quadrada dos elementos foi adotada. Os parâmetros podem variar irrestritamente entre os elementos, possibilitando assim que a variabilidade espacial possa ser representada.

O modelo é composto por quatro módulos principais: precipitação efetiva, infiltração, caracterização do escoamento e desagregação e transporte de sedimentos.



**Figura 3.5 - Modelo ANSWERS**  
**Divisão da Bacia em Elementos de Cálculo**

### Módulo de Precipitação Efetiva:

A precipitação efetiva depende da chuva medida pelos pluviógrafos e da taxa de intercepção vegetal. O volume de intercepção vegetal é subtraído dos registros de precipitação especificados para cada elemento a partir do parâmetro de intercepção potencial máxima (PIT). As perdas por evaporação durante a ocorrência de uma tormenta são consideradas desprezíveis.

A intercepção potencial máxima (PIT), fornecida como dado de entrada, representa a capacidade de retenção das folhas em unidade de profundidade (volume por unidade de área). Em cada intervalo de tempo em que o volume de intercepção não for satisfeito, a precipitação retida é computada como o produto da taxa de precipitação pela área coberta pela vegetação. Quando todo o volume de intercepção está satisfeito, PIT é tomada como sendo zero e a precipitação efetiva é igual à precipitação medida.

### Módulo de Infiltração:

A relação de infiltração utilizada pelo modelo é a desenvolvida por Holtan (1961) e Overton (1965). Esta relação pode ser expressa da seguinte forma:

$$F_{MAX} = FC + AI * \left( \frac{PIV}{TP} \right)^p \quad (3.28)$$

- onde:  $F_{MAX}$  = capacidade de infiltração no tempo  $t$ ;  
 $FC$  = capacidade de infiltração mínima do solo;  
 $AI$  = capacidade de infiltração máxima em excesso a  $FC$ ;  
 $PIV$  = volume de água que pode ser armazenada dentro do volume de controle de infiltração antes da saturação;  
 $p$  = coeficiente adimensional relacionando o decréscimo da taxa de infiltração com o aumento da umidade do solo.;  
 $TP$  = porosidade total do solo.

Durante os períodos de precipitação nula, a infiltração deve ser suprida pela água existente na superfície do solo. Uma vez que raramente toda a superfície dos elementos de cálculo está inundada, a capacidade de infiltração calculada é reduzida na direta proporção da percentagem de superfície não inundada. A condição inicial de umidade do solo é informada ao modelo através do parâmetro ASM, umidade anterior do solo.

Na camada superior do solo, uma zona de controle da infiltração, definida pela profundidade DF, determina a taxa de infiltração em função do volume de água contido nesta zona. Assim, quando o volume de água é menor que a capacidade de campo (FC), nenhuma água sai desta zona; quando o volume de água excede a capacidade de campo, a água sai desta zona segundo a relação

$$DR = FC \cdot (1 - PIV / GW)^2 \quad (3.29)$$

onde: DR = taxa de drenagem da água da zona de controle;  
GW = TP - FC

A infiltração se dá, portanto, a esta taxa de drenagem, até o limite máximo determinado por FMAX.

#### **Módulo de Caracterização do Escoamento:**

Cada um dos elementos quadrados da malha que representa a bacia age como um plano de escoamento. A declividade e direção de escoamento são fornecidas pelo usuário, indicando como a água produzida em cada elemento escoar para os elementos adjacentes.

Os fluxos superficial e subsuperficial de cada elemento são dirigidos para os elementos vizinhos de acordo com a direção de escoamento, determinada pelo ângulo ANG. O fluxo é particionado entre os elementos adjacentes de forma proporcional à sua área de influência, determinada conforme apresentado na figura 3.6.



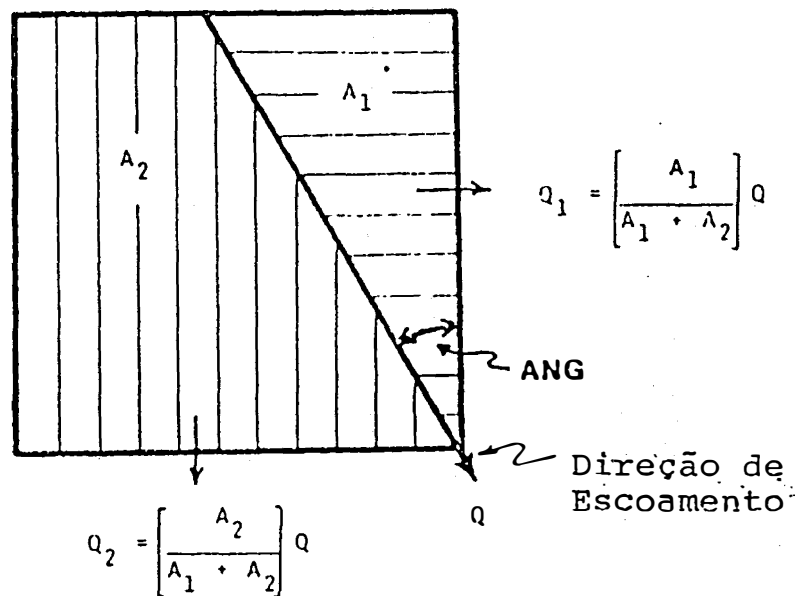


Figura 3.6 - Modelo ANSWERS  
Partição do Fluxo Superficial (Beasley et al, 1980)

Cada elemento pode conter um canal. Neste caso, os elementos têm um comportamento duplo: se comportam como um elemento de fluxo superficial, porém com a diferença de que todo este fluxo é dirigido para o canal. O fluxo de um canal se dirige para o próximo elemento de canal a jusante. Este elemento de jusante também receberá escoamento de qualquer outro segmento de canal dirigido a ele e de seu próprio elemento de fluxo superficial.

A resposta hidráulica de cada elemento, como uma função do tempo, é calculada através de uma solução explícita, em diferenças finitas da equação da continuidade. A teoria de onda cinemática é utilizada para calcular o hidrograma total para a bacia, a cada incremento de tempo. Assim:

$$\frac{dSt}{dt} = I - Qd \quad (3.30)$$

onde: I = fluxo afluente a um elemento, proveniente da chuva e de elementos adjacentes;

Qd = fluxo defluente;

St = volume de água armazenado num elemento;

t = tempo.

Esta equação é resolvida em combinação com uma relação de descarga, que é a equação de Manning, aplicada, com coeficientes diferentes, tanto para escoamento superficial quanto para escoamento concentrado em canais. No caso de fluxo concentrado em canais, as características da seção transversal e declividade são fornecidas pelo usuário, e o modelo calcula a profundidade necessária para conduzir o escoamento. No caso de escoamento superficial, o raio hidráulico é suposto como igual à profundidade média de detenção superficial, e a largura é igual à máxima largura do elemento, ou seja, a largura medida na direção perpendicular à direção de escoamento.

A detenção superficial, definida como o volume de água no fluxo superficial, é estimada a partir da equação

$$DEP = HU \cdot RC \cdot (H / HU)^{1/RC} \quad (3.31)$$

onde: DEP = volume de água armazenado (detenção superficial);

H = nível a partir de uma referência (datum);

HU = parâmetro de rugosidade da superfície;

RC = coeficiente de rugosidade superficial.

Todo o volume de um elemento deve ser preenchido antes que a água esteja disponível para escoamento superficial.

A água que deixa a zona de controle, conforme definido no módulo de infiltração, contribui para os escoamentos subsuperficial e/ou subterrâneo. Para que a contribuição se dê para o escoamento subsuperficial, alguns elementos devem ser especificados como

elementos de drenagem, que dirigirão este fluxo para elementos de drenagem vizinhos. A taxa total de drenagem de cada elemento é a soma da sua taxa com a contribuição dos elementos de montante, até o limite máximo especificado por um coeficiente de drenagem (igual a zero para elementos sem drenagem subsuperficial). O volume em excesso a este limite é dirigido ao escoamento subterrâneo. Tanto o escoamento subsuperficial como o subterrâneo voltam à superfície através dos elementos de canal. Em bacias que não têm canais definidos, somente o escoamento superficial aparecerá na seção de saída.

O fluxo de base, proveniente do fluxo subterrâneo, é estimado de forma simplificada. É suposto que toda água infiltrada que atravessa a zona de drenagem entre em um reservatório de armazenamento subterrâneo, de onde sairá para os segmentos de canal a uma taxa proporcional ao volume de armazenamento acumulado.

#### **Módulo de Desagregação e Transporte de Sedimentos:**

A erosão de solo é modelada como dois processos separados: o destacamento de partículas da massa de solo e o transporte dessas partículas para os rios e lagos. O destacamento pode ocorrer devido ao impacto da chuva ou devido ao escoamento superficial. Esses mesmos fatores podem causar o deslocamento das partículas destacadas.

O destacamento de partículas de solo pelo impacto das gotas de chuva é calculado usando a relação descrita por Meyer e Wischmeier (1969)

$$DETR = 0,108 * C * K * A_i * R_c^2 \quad (3.32)$$

onde: DETR = taxa de desagregação pela chuva em kg/min;

C = fator de cobertura e manejo da USLE;

K = fator de erodibilidade do solo da USLE em t.ha.h/ha.MJ.cm;

$A_i$  = incremento de área em m<sup>2</sup>

Rc = intensidade da chuva efetiva em mm/h.

O destacamento das partículas de solo pelo escoamento superficial foi descrito por Meyer e Wischmeier (1969) e modificado por Foster (1976) como segue:

$$DETF = 0.90 * C * K * A_l * S * Q_l \quad (3.33)$$

onde: DETF = taxa de destacamento pelo escoamento em kg/min;

$Q_l$  = vazão do escoamento superficial por unidade de largura em  $m^3/min$ .

Uma vez que uma partícula tenha sido destacada, ela será transportada a jusante se houver energia suficiente para tal; caso contrário ela será depositada. Assim, se a entrada de sedimentos excede a capacidade de transporte, ocorre deposição; se a entrada de sedimentos é menor que a capacidade de transporte, e se as forças erosivas são maiores que as de resistência, ocorre erosão. Este é basicamente o modelo teórico de Meyer e Wischmeier (1969).

As relações de transporte de sedimentos por escoamento são apresentadas para duas faixas de validade:

$$\begin{aligned} TF &= 161 * S * Q_l^{0,5} && \text{se } Q_l \leq 0,046 \text{ m}^2/\text{min} \\ TF &= 16\ 320 * S * Q_l^2 && \text{se } Q_l \geq 0,046 \text{ m}^2/\text{min} \end{aligned} \quad (3.34)$$

onde TF é a taxa potencial de transporte de sedimento em kg/min.m, que reflete a capacidade de transporte de sedimentos.

A metodologia do modelo ANSWERS para o cálculo da erosão admitiu as seguintes simplificações:

1. Drenagem subterrânea não produz sedimento;
2. sedimento destacado em um ponto e depositado em outro é reincorporado à superfície do solo;

3. o redestacamento de sedimentos requer a mesma quantidade de energia requerida para o destacamento inicial;
4. em canais, o destacamento pela chuva é considerado igual a zero e somente sedimentos depositados estão disponíveis para o destacamento pelo escoamento.

O transporte de partículas pela chuva foi considerado desprezível pelo modelo.

### Estimativa dos Parâmetros

Os parâmetros a estimar são: TP (porosidade total do solo), FP (capacidade de campo), FC (capacidade mínima de infiltração), AI (capacidade de infiltração máxima em excesso a FC), p (expoente da equação de infiltração), DF (profundidade da zona de controle da infiltração), ASM (umidade anterior do solo), K (fator de erodibilidade do solo da USLE), PIT (intercepção potencial máxima), RC (coeficiente de rugosidade superficial), HU (altura máxima das irregularidades da superfície) e C (fator de cobertura e manejo da USLE).

Os valores destes parâmetros, à exceção de ASM, são obtidos conforme metodologia e tabelas apresentadas por Beasley e Huggins (1981). Estas tabelas são reproduzidas no Anexo A.

Assim, os valores de TP, FP, p, PIT, RC e HU são estimados a partir das tabelas A5, A6 e A7. Os valores de K e C seguem a mesma metodologia descrita no item 3.2.4, para a MUSLE. O valor de DF é suposto como a metade da profundidade do horizonte A do solo. A determinação dos valores de FC e AI é efetuada dividindo-se a faixa de valores de permeabilidade do solo em três partes e adotando o valor de FC como o ponto médio do terço inferior e o valor de AI como a diferença entre o ponto médio dos dois terços superiores e FC (Beasley e Huggins, 1981).

O único parâmetro cuja determinação não seguiu os critérios sugeridos por Beasley e Huggins (1981) foi ASM. Isto porque o critério sugerido, de se efetuar um balanço hídrico diário dos trinta dias anteriores a cada evento, incluindo precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e percolação é absolutamente inviável com os dados disponíveis. Assim, utilizou-se o critério do SCS para determinar a condição de umidade antecedente que deve ser considerada, com base na precipitação total ocorrida nos cinco dias anteriores ao evento e no estágio de desenvolvimento da cultura, apresentada na tabela A3, conforme descrito no item 3.2.3. Assim, para a condição I, de solo seco, foi adotado  $ASM=35\%$ , correspondendo a pouco acima do ponto de murcha (adotado como  $31\%$ ); para a condição II, de solo em condições médias, foi adotado  $ASM=70\%$ , correspondendo a pouco mais que a capacidade de campo (adotada como  $66\%$ ); para a condição III, de solo saturado, foi adotado  $ASM=90\%$  .

Deve-se, ainda, ressaltar que estes parâmetros podem variar espacialmente, adotando-se valores distintos para cada elemento de cálculo da malha que representa a bacia.

## 4 - APLICAÇÃO

### 4.1 - Bacia do Rio Forquetinha

#### 4.1.1 - Descrição

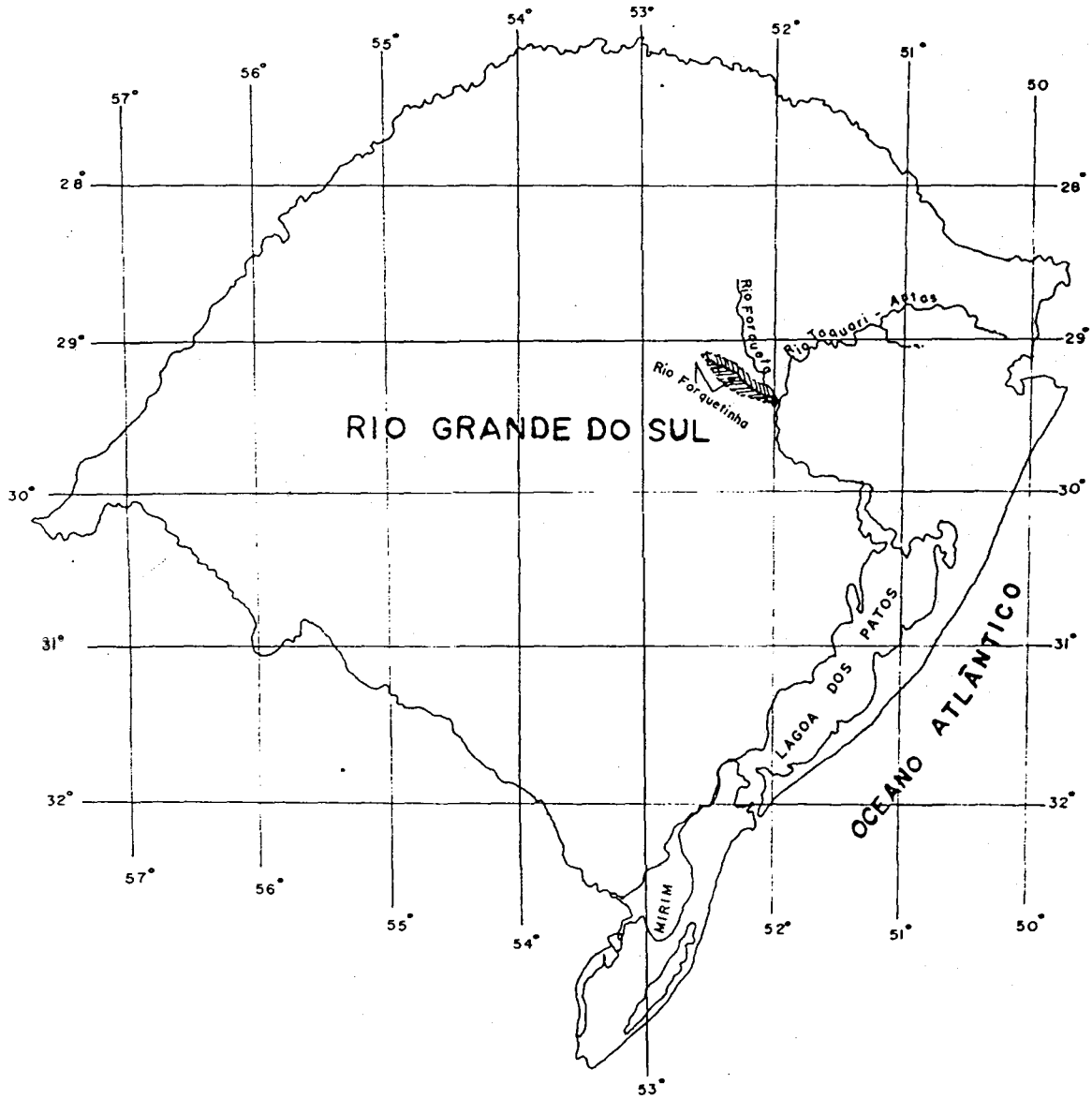
O rio Forquetinha é um importante afluente da margem direita do rio Forqueta, pertencente à bacia do rio Taquari-Antas, como pode-se observar na figura 4.1, a seguir.

A bacia hidrográfica do rio Forquetinha localiza-se na região centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul, e está compreendida entre os paralelos 29°15' e 29°30' Sul e entre os meridianos 52°00' e 52°30' Oeste. Tem uma superfície total de cerca de 450 km<sup>2</sup>, até a foz no rio Forqueta.

A bacia do rio Forquetinha pode ser considerada como uma bacia representativa de uma vasta região dos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, cobrindo 77300 km<sup>2</sup> sobre a encosta do planalto, assentada sobre formação basáltica (Borges e Bordas, 1988).

O regime do rio Forquetinha é bastante irregular, caracterizando-se por bruscas e violentas variações de suas descargas, ocorrendo cheias e estiagens alternadas na região. A baixa permeabilidade média dos solos da bacia, a pequena espessura e a deficiente drenagem dos mesmos, aliadas às fortes declividades e aos efeitos do desmatamento, propiciam coeficientes de escoamento altos e, conseqüentemente, pequenas parcelas de água se infiltrando. Agravando ainda mais esta situação, as fortes declividades do rio Forquetinha e de seus afluentes concentram em pouco tempo os volumes de água escoados superficialmente, que se propagam com rapidez.

Quanto à climatologia, a bacia hidrográfica do rio Forquetinha se situa na Zona Intermediária Subtropical, tendo um clima mesotérmico do tipo temperado, com um índice pluviométrico médio




 BACIA DO FORQUETHINA

Figura 4.1 - Situação Geográfica da Bacia do Rio Forquethina



anual elevado, da ordem de 1700 mm, e regime bastante uniforme. A evapotranspiração efetiva média anual é de cerca de 810 mm (Canali, 1981; Silveira, 1982).

Quanto à geologia, a bacia do rio Forquetinha está totalmente assentada sobre o derrame de lava que cobre a quase totalidade da bacia geológica do Paraná. Na região em exame, a espessura do derrame é da ordem de 650 m. O basalto aflora na superfície de toda a bacia, exceto no fundo dos vales, cobertos pelos depósitos aluvionares normais (Canali, 1981; Silveira, 1982).

Quanto à pedologia, a bacia do rio Forquetinha se encontra praticamente toda sobre solos da associação Ciríaco-Charrua. A unidade taxonômica Ciríaco é classificada como solo Brunizem Avermelhado raso, de textura argilosa, relevo forte ondulado e substrato basalto. São solos medianamente profundos (80 a 120 cm), moderadamente drenados, com horizontes A e B bem desenvolvidos. O horizonte A é espesso (47 a 55 cm), de coloração bruno avermelhado escura e o horizonte B é pouco espesso (30 a 60 cm), de coloração vermelho escura. A unidade de mapeamento Charrua é classificada como solo Litólico Eutrófico, de textura média, relevo montanhoso e substrato basalto amigdalóide. São solos pouco desenvolvidos, rasos (20 a 40 cm) com horizonte A de espessura variável entre 20 e 40 cm, de coloração bruno avermelhado escura e horizonte B raro e incipiente. Os solos Charrua, em geral, encontram-se nas escarpas dos vales, ocupando a posição mais íngreme do relevo geral, situando-se os solos Ciríaco nas áreas menos acidentadas e nas partes inferiores do declive (Brasil, 1973).

Quanto à cobertura vegetal, a bacia do rio Forquetinha apresenta como vegetação natural a mata subtropical alta e alta mista com araucárias e, também, as matas de galeria e os campos mistos. A mata subtropical está desaparecendo paulatinamente, cedendo lugar a áreas ocupadas por cultivos de minifúndios, onde predominam milho, soja, feijão e mandioca (Canali, 1981; Silveira, 1982).

#### 4.1.2 - Sub-bacias Selecionadas

Em estudos anteriores do IPH (Bordas, 1981; Canali, 1981; Silveira, 1982; Silveira et al. 1983) em convênio com a FINEP, foram identificadas na região em estudo onze tipos de bacias vertentes, classificadas em função de sua declividade (A, correspondente a declividades de 40 %; B, correspondente a declividades de 20%; e C, correspondente a declividades de 50%) e cobertura vegetal (1, correspondente a lavoura; 2, correspondente a campos; e 3, correspondente a mata nativa). Como a operação destas onze sub-bacias piloto se tornaria muito onerosa, foram inicialmente operadas apenas três sub-bacias: A1, B1 e A3.

A escolha destas sub-bacias foi efetuada para permitir o estudo comparativo de características físicas como a declividade e a cobertura vegetal na variação da produção efetiva dos sedimentos de uma bacia em relação a outra. Assim, a comparação das produções das bacias A1 e A3 permitiria verificar a influência da cobertura vegetal e a comparação das produções das bacias A1 e B1 permitiria verificar a influência da declividade.

No presente estudo, foram utilizados dados referentes às bacias A1 e B1. A bacia A3 não foi aproveitada porque sua produção de sedimentos era muito pequena. A localização das bacias estudadas é apresentada na figura 4.2.

Em 1987 foi efetuado um levantamento detalhado da topografia, solos e cobertura vegetal destas sub-bacias, em cooperação IPH/ORSTOM (Leprun, 1987). No Anexo B é apresentado, nas figuras B1 e B2, o levantamento planialtimétrico, com delimitação das áreas de mata nativa, e, nas figuras B3 e B4, o levantamento pedológico.

No quadro 4.1 são apresentadas as principais características físicas das duas sub-bacias. Foram utilizadas plantas na escala 1:2500, com curvas de nível espaçadas de 10 m. A declividade foi calculada pelo método de amostragem nos vértices de uma malha



quadrada de quadrículas com 50 m de lado, conforme descrito no Anexo D.

Quadro 4.1 - Características Físicas das Sub-bacias

CARACTERÍSTICA FÍSICA	SUB - BACIA	
	A1	B1
ÁREA (km <sup>2</sup> )	0,55	0,393
PERÍMETRO (km)	3,00	2,625
COEF. COMPACIDADE	1,14	1,18
DECLIVIDADE MÉDIA (%)	32,5	28,9

#### 4.1.3 - Dados Disponíveis

Além dos levantamentos planialtimétricos e pedológicos das bacias, foram utilizados registros linigráficos, pluviográficos e sedimentométricos referentes ao período de dezembro de 1978 a dezembro de 1979.

As medições hidrométricas foram realizadas com a utilização, por bacia operada, de um pluviógrafo, um pluviômetro e um linígrafo. Os pluviógrafos utilizados foram do tipo Jules Richard, semanais, com área de captação de 400 cm<sup>2</sup> e precisão de leitura de 0,5 mm a intervalos de tempo de 1 hora. Os linígrafos foram do tipo IH mensal, permitindo uma precisão de leitura de 1 cm a intervalos de tempo de 10 minutos.

As estruturas e equipamentos de coleta de sedimentos e medição de vazões, descritas por Semmelmann et al. (1978) e Canali (1981), foram montadas em um reservatório de tranquilização com vertedor. A vazão líquida foi avaliada através dos registros dos níveis nos vertedores. A avaliação da descarga sólida foi efetuada, para o

material transportado por arraste, por medição do material retido, e, para o material transportado em suspensão, através da medição da concentração de sedimentos em vários níveis durante a passagem de uma onda de cheia.

As técnicas utilizadas não garantem, na realidade, uma boa qualidade dos dados. A curva-chave adotada é uma curva teórica de vertedor, que não foi verificada por medições, trazendo, conseqüentemente, uma qualidade ruim para os dados de descarga líquida e sólida. Além disto, a técnica de coleta dos sedimentos não garante que o local de amostragem reflita corretamente a real distribuição dos sedimentos.

Somente estavam disponíveis registros de chuva com precisão horária, período demasiado grande para simular as sub-bacias. Havia, também, dados do posto de Araguari, distante 10 km das sub-bacias, com um pluviógrafo do tipo SIAP mensal, de área de captação de 1000 cm<sup>2</sup> e precisão de leitura de 0,2 mm de chuva a intervalos de tempo de 10 minutos. Assim, foi utilizada a distribuição temporal do posto de Araguari para se distribuir proporcionalmente os dados de chuva horária disponíveis para as sub-bacias, obtendo-se dados com precisão de 15 minutos. Com isto, foi necessário descartar alguns eventos, para os quais esta distribuição não foi possível, seja por incompatibilidade dos dados ou por falta de registros em um dos postos. Deve-se observar que, em uma região com relevo de encostas, como é o caso em estudo, a distância de 10 km pode ser suficiente para que exista uma distribuição temporal da precipitação bastante distinta entre os postos, o que reduz a confiabilidade dos dados.

A partir destes dados, foi possível obter-se um conjunto de 17 eventos com dados completos de pluviografia, linigrafia e sedimentometria, sendo 12 para a bacia A1 e 5 para a bacia B1. Deve-se ainda destacar que eram disponíveis os sedimentogramas de 6 destes eventos.

Além destes 17 eventos, foram ainda identificados outros 17,

sendo 6 na bacia A1 e 11 na bacia B1, para os quais eram disponíveis apenas o total precipitado nas sub-bacias, o registro pluviográfico em Araguari e o total de produção de sedimentos. Para estes eventos, dispunha-se, ainda, do volume escoado superficialmente e da vazão superficial de pico, obtidos a partir de Silveira (1982), porém sem o volume total escoado. Foi adotado, para a precipitação, o total precipitado na sub-bacia com a distribuição temporal de Araguari. Desta forma, chegou-se a um total de 34 eventos, sendo 18 na bacia A1 e 16 na bacia B1.

No quadro 4.2 são apresentados os dados disponíveis dos eventos selecionados para utilização no presente estudo.

Deve-se, ainda, destacar que os linigramas foram digitalizados, consistidos e armazenados em banco de dados através da utilização do programa HYDROM, desenvolvido pela ORSTOM (Cochonneau, 1989). Embora esta tarefa tenha sido de importância vital para o trabalho, não será apresentada sua descrição, uma vez que a metodologia utilizada segue fielmente os manuais do programa, não sendo necessária sua repetição.

#### **4.2 - Análise de Sensibilidade dos Modelos**

Análise de sensibilidade é uma técnica para se avaliar o efeito relativo da mudança dos parâmetros ou variáveis de entrada nos resultados obtidos com um determinado modelo (Lane e Ferreira, 1980). Para modelos simples, explícitos, é possível se obter as expressões das saídas em função dos dados de entrada expressando a sensibilidade do modelo como funções explícitas. Porém, à medida que os modelos se tornam mais complexos, a sensibilidade é expressa mais facilmente na forma de mudanças relativas, gráficos e tabelas, ao invés de funções.

O procedimento numérico para efetuar-se esta análise consiste basicamente de duas etapas. Na primeira, são selecionados os valores base para os parâmetros e variáveis que compõem a formulação

Quadro 4.2 - Dados Disponíveis

SUBI   BA-   CIAI	DATA   DO   EVENTO	PRECIPITAC.   TOT   mm	IPAI   dia	Ia   mm	QTOT   m <sup>3</sup>	Qs   m <sup>3</sup>	qp   m <sup>3</sup> /s	SEDIMENTO PRODUZ. (t)			DADOS   PARA   USO
								SUSPENSI	ARRAST	TOTAL	
	24/12/78	46	9	32,0	821	440	0,180	2,407	4,000	6,407	PLSS
	12/02/79	29	5	13,5	700	512	0,100	0,675	3,630	4,305	PLSS
	03/08/79	73	13	2,5	9364	5087	0,150	5,274	15,660	20,934	PLSS
	04/10/79	102	4	8,0	22960	11454	0,230	42,660	72,255	114,915	PLSS
	18/05/79	41	10	2,5	1290	351	0,037	0,920	0,000	0,920	PLS
	04/06/79	40	13	8,0	967	164	0,018	0,320	0,000	0,320	PLS
	23/06/79	33	20	30,0	1440	133	0,023	0,000	0,000	0,000	PLS
	08/08/79	38	1	6,2	24768	7038	0,063	3,955	0,000	3,955	PLS
	11/08/79	34	3	3,7	7188	1659	0,021	0,014	2,475	2,489	PLS
A1	31/08/79	23	6	5,3	1788	420	0,065	1,156	1,650	2,806	PLS
	28/09/79	17	3	6,2	620	123	0,020	0,059	0,000	0,059	PLS
	29/09/79	23	1	6,0	9890	737	0,019	2,547	0,000	2,547	PLS
	04/04/79	90	26	nd	nd	13585	0,078	0,780	0,000	0,780	PS
	15/04/79	96	11	nd	nd	15675	0,069	1,309	0,791	2,100	PS
	08/05/79	44	10	nd	nd	2090	0,004	0,382	0,787	1,169	PS
	22/05/79	61	4	nd	nd	15345	0,237	0,890	9,255	10,115	PS
	06/07/79	67	12	nd	nd	7425	0,024	1,793	2,970	4,763	PS
	25/08/79	13	14	nd	nd	nd	0,028	0,180	0,000	0,180	PS
	12/02/79	29	5	13,5	121	58	0,030	0,634	0,000	0,634	PLSS
	22/05/79	47,5	4	2,0	13812	6063	0,130	11,412	9,832	21,244	PLSS
	23/06/79	36	20	7,4	2489	675	0,049	1,033	0,000	1,033	PLS
	03/08/79	59	13	26,0	7973	3448	0,179	9,810	1,372	11,182	PLS
	08/08/79	36	5	18,8	15527	6302	0,119	1,215	0,630	1,845	PLS
	04/04/79	97	26	nd	nd	14894	nd	1,595	0,000	1,595	PS
	15/04/79	62	11	nd	nd	2004	nd	2,248	0,787	3,035	PS
B1	08/05/79	47	10	nd	nd	629	0,016	0,648	1,955	2,643	PS
	18/05/79	46	10	nd	nd	629	0,025	1,790	0,000	1,790	PS
	04/06/79	38	13	nd	nd	118	nd	0,043	0,000	0,043	PS
	06/07/79	65	12	nd	nd	3065	0,117	1,579	1,687	3,266	PS
	25/08/79	11	14	nd	nd	707	0,007	0,000	0,000	0,000	PS
	31/08/79	12	6	nd	nd	118	0,007	0,000	0,000	0,000	PS
	28/09/79	10	3	nd	nd	2319	0,014	0,014	0,000	0,014	PS
	29/09/79	29	1	nd	nd	3694	0,055	0,535	0,000	0,535	PS
	04/10/79	105	4	nd	nd	131204	0,198	48,600	130,877	79,477	PS

LEGENDA:

IPA = N° de dias anteriores sem chuva; Ia = Perdas iniciais;  
 Qs = Volume escoado superficialmente; QTOT = Volume total escoado;  
 qp = Vazão superficial de pico; nd = Dado não disponível;

PLSS = Dados de pluviografia, linigrafia e sedimentogramas;  
 PLS = Dados de pluviografia, linigrafia e total de sedimentos;  
 PS = Dados de pluviografia e total de sedimentos.

básica. Os cálculos são efetuados para esta formulação, obtendo-se uma saída. Na segunda etapa, as variáveis e parâmetros de entrada têm seus valores alterados dentro de uma determinada faixa e novos cálculos são efetuados. A sensibilidade relativa é dada pelo quociente

$$Sr = \frac{(RES - RES_{base})/RES_{base}}{(VAR - VAR_{base})/VAR_{base}} \quad (4.1)$$

onde: Sr = sensibilidade relativa;  
RES = resposta do modelo na simulação;  
RES<sub>base</sub> = resposta do modelo na formulação básica;  
VAR = valor do parâmetro ou variável na simulação;  
VAR<sub>base</sub> = valor do parâmetro ou variável na formulação básica.

Os resultados obtidos permitem que se verifique como as saídas do modelo variam com as mudanças nos parâmetros e variáveis de entrada.

Pode-se, assim, compreender o funcionamento do modelo e qual a importância que cada um dos parâmetros tem na determinação dos resultados. Esta análise, portanto, auxilia o usuário a determinar quais parâmetros devem ser estimados com cautela e quais não requerem grande precisão em suas estimativas.

Ao se adotar apenas um cenário básico e avaliar o efeito da modificação isolada de cada um dos parâmetros, pode-se estar sendo tendencioso, pois o cenário escolhido pode não ser representativo. Para evitar o perigo desta tendenciosidade, Chaves (1991) apresenta uma metodologia para análise de sensibilidade onde, através de técnicas estatísticas, a importância da variação de cada um dos parâmetros pode ser estabelecida para diversos cenários de aplicação. Neste caso, deve-se procurar garantir que não será criado um cenário inviável ou muito pouco provável. Nos casos estudados, os resultados para as duas técnicas (cenário base único ou múltiplo) têm sido semelhantes, desde que sejam tomados os devidos cuidados no que se refere a evitar cenários inviáveis ou não representativos.



No presente trabalho, quatro modelos ou metodologias distintas são utilizadas: IPH-II, SCS, MUSLE e ANSWERS. A análise de sensibilidade de cada um destes modelos tem grande importância, pois permite um melhor conhecimento sobre os mecanismos dos modelos e sobre os parâmetros e variáveis de entrada de maior influência nos resultados. Com este conhecimento, torna-se mais fácil e de melhor qualidade o ajuste dos modelos.

As análises de sensibilidade do modelo IPH-II e da associação das metodologias do SCS e da MUSLE já foram efetuadas por Tucci (1979) e Chaves (1991), respectivamente. A análise de sensibilidade do modelo ANSWERS foi efetuada neste estudo.

Tucci (1979) apresenta como conclusões mais importantes quanto à sensibilidade dos parâmetros  $I_0$ ,  $I_b$  e  $k$  com relação ao volume escoado no modelo IPH-II que:

- os parâmetros  $I_0$  e  $I_b$ , considerando o caso  $P > I_t$ , não apresentam dependência entre si;
- a variação de  $I_0$  e de  $I_b$  é dependente do valor de  $k$ ;
- $I_b$  apresenta pequena sensibilidade, aumentando para períodos de longa duração da precipitação;
- $I_0$  apresenta grande sensibilidade, diminuindo para períodos com precipitações longas;
- o volume escoado é mais sensível a  $k$  quando este diminui ( $k < 0,5$ ).

Do trabalho de Chaves (1991) pode-se concluir que, para a associação das metodologias do SCS e da MUSLE, três grupos de variáveis podem ser identificados quanto à sensibilidade para a produção de sedimentos. No primeiro grupo, de alta sensibilidade ( $S_r > 3$ , em média), estão os fatores hidrológicos, compostos pelo parâmetro CN e pela variável Pac. No segundo grupo, de sensibilidade média ( $0,5 < S_r < 1,1$ , em média), estão os parâmetros de manejo e erodibilidade,  $K$ ,  $C$  e  $P$  e a área da bacia. No terceiro grupo, de baixa sensibilidade ( $S_r < 0,5$ , em média), estão os fatores

topográficos, L e S, e os parâmetros  $t_d$  e  $t_c$ . Como tanto  $t_d$  quanto  $t_c$  são função da dimensão e da declividade da bacia, representadas por L e S, pode-se dizer que este grupo é composto por variáveis topográficas.

Para a análise de sensibilidade do modelo ANSWERS quanto à produção de sedimentos (PS) e ao volume escoado ( $Q_s$ ), foi adotado apenas um cenário base e avaliado o efeito da modificação isolada de cada um dos parâmetros. Para evitar que a possível tendenciosidade na escolha do cenário base acarretasse em resultados pouco representativos para o estudo, adotou-se uma situação semelhante à realidade das sub-bacias, ou seja, um solo argilo-arenoso, com uma cobertura vegetal de uma cultura de milho. Para cada um dos parâmetros avaliados, foram computados quatro valores distintos dos da formulação básica: 2 casos com valores menores e 2 casos com valores maiores que os da formulação base. Os valores dos parâmetros da formulação básica são apresentados no quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Valores da Formulação Básica

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	VALOR
TP	Porosidade total do solo	47 %
FP	Capacidade de campo	66 %
FC	Taxa de infiltração em regime permanente	10 mm/h
AI	Capacidade de infiltração máx em excesso a FC	20 mm/h
p	Expoente da equação de infiltração	0,6
DF	Profundidade da zona de controle da infiltr.	300 mm
ASM	Umidade anterior do solo	70 %
K	Fator de erodibilidade da USLE	0,30
PIT	Intercepção potencial máxima	0,6 mm
RC	Coefficiente de rugosidade superficial	0,43
HU	Altura máx das irregularidades da superfície	60 mm
N	Coefficiente de Manning para escoam. superf.	0,06
C	Fator de cobertura e manejo da USLE	0,50

Neste trabalho, foi estudada a sensibilidade de 9 parâmetros do modelo ANSWERS: 3 parâmetros de caracterização do solo (TP, FP e K); 2 parâmetros de uso e manejo (PIT e N); e 4 parâmetros de infiltração (p, AI, ASM e FC). Os dados sintéticos foram aplicados a

uma bacia fictícia de 57,7 ha de área, formada por 29 elementos quadrados de área igual a 1,99 ha. Todos os casos estudados foram computados com uma precipitação constante de 20 mm/h, com duração de 3 horas.

Os resultados das simulações efetuadas para a análise de sensibilidade do modelo ANSWERS são apresentadas no quadro 4.4. Neste quadro, a variação percentual de um parâmetro ou variável é dada pelo quociente

$$\Delta\% = (VAR - VAR_{base}) \cdot 100 / VAR_{base} \quad (4.2)$$

onde  $\Delta\%$  = variação percentual

Através da análise destes resultados, observa-se que a sensibilidade para a produção de sedimentos e para o volume escoado foram quase sempre praticamente iguais entre si, para cada cenário simulado. A única exceção foi para a hipótese de variação do valor de K (erodibilidade do solo), para o qual o volume escoado mostra-se insensível.

Verifica-se haver dois grupos de parâmetros: o primeiro, de baixa e média sensibilidade, reúne os parâmetros TP, FP, K, PIT e N, para os quais  $|Sr| \leq 1,1$ ; o segundo, de alta sensibilidade, reúne os parâmetros de infiltração (p, AI, ASM e FC), para os quais  $|Sr| \geq 1,4$ . O primeiro grupo é apresentado na figura 4.3 e o segundo na figura 4.4.

Analisando-se o conjunto dos modelos, verifica-se que os parâmetros para os quais os modelos são mais sensíveis estão relacionados com a precipitação (Pac), a infiltração (k, Io, CN, p, AI, ASM e FC) e as condições iniciais (CN e ASM). Estes parâmetros são os que, conseqüentemente, exigem maior cautela e precisão nas estimativas.

Quadro 4.4 - Análise de Sensibilidade do Modelo ANSWERS - Resultados

PARÂMETRO	VALOR DO PARÂMETRO	Δ % DO PARÂMETRO	PS (kg/ha)	Δ % DE PSI	Qs (mm)	Δ % DE Qs	Sr (para PSI)
TP	0,40	- 15,0	5032	+ 17,49	10,223	+ 18,86	- 1,2
	0,43	- 8,5	4693	+ 9,57	9,479	+ 10,21	- 1,2
	0,49	+ 4,3	4102	- 4,23	8,205	- 4,60	- 1,1
	0,51	+ 8,5	3932	- 8,20	7,836	- 8,89	- 1,0
FP	0,38	- 42,0	3638	- 15,06	7,204	- 16,24	+ 0,4
	0,52	- 21,0	3930	- 8,24	7,834	- 8,92	+ 0,4
	0,74	+ 12,0	4506	+ 5,21	9,061	+ 5,35	+ 0,4
	0,82	+ 24,0	4718	+ 10,16	9,518	+ 10,66	+ 0,4
P	0,50	- 16,7	2892	- 32,48	6,003	- 30,21	+ 1,9
	0,55	- 8,3	3593	- 16,11	7,308	- 15,03	+ 1,9
	0,65	+ 8,3	4898	+ 14,36	9,813	+ 14,09	+ 1,7
	0,70	+ 16,7	5428	+ 26,73	10,935	+ 27,14	+ 1,6
K	0,15	- 50,0	2271	- 46,98	8,601	-	+ 0,9
	0,22	- 27,0	3225	- 24,70	8,601	-	+ 0,9
	0,38	+ 27,0	5248	+ 22,53	8,601	-	+ 0,8
	0,45	+ 50,0	5972	+ 39,43	8,601	-	+ 0,8
PIT	0,30	- 50,0	4342	+ 1,38	8,712	+ 1,29	- 0,03
	0,45	- 25,0	4316	+ 0,77	8,655	+ 0,63	- 0,03
	0,95	+ 58,0	4216	- 1,56	8,472	- 1,50	- 0,03
	1,30	+ 117,0	4444	+ 3,76	8,725	+ 1,44	+ 0,03
N	0,030	- 50,0	5306	+ 23,89	9,988	+ 16,13	- 0,5
	0,045	- 25,0	4762	+ 11,18	9,255	+ 7,60	- 0,4
	0,075	+ 25,0	3858	- 9,92	8,002	- 6,96	- 0,4
	0,090	+ 50,0	3482	- 18,70	7,450	- 13,38	- 0,4
AI	10	- 50,0	7789	+ 81,86	16,012	+ 86,16	- 1,6
	18	- 10,0	4959	+ 15,78	9,911	+ 15,23	- 1,6
	22	+ 10,0	3605	- 15,83	7,425	- 13,67	- 1,6
	30	+ 50,0	1985	- 53,65	4,517	- 47,48	- 1,1
ASM	66	- 5,7	3245	- 24,24	6,610	- 23,15	+ 4,3
	68	- 2,9	3762	- 12,16	7,587	- 11,79	+ 4,2
	80	+ 14,3	6727	+ 57,06	13,737	+ 59,71	+ 4,0
	90	+ 28,6	9168	+ 114,06	19,028	+ 121,23	+ 4,0
FC	5	- 50,0	9975	+ 132,90	20,708	+ 140,76	- 2,7
	9	- 10,0	5464	+ 27,57	11,000	+ 27,89	- 2,8
	11	+ 10,0	3061	- 28,53	6,291	- 26,86	- 2,9
	15	+ 50,0	163	- 96,19	0,329	- 100,00	- 1,9
FORMULAÇÃO BASE		-	4283	-	8,601	-	-

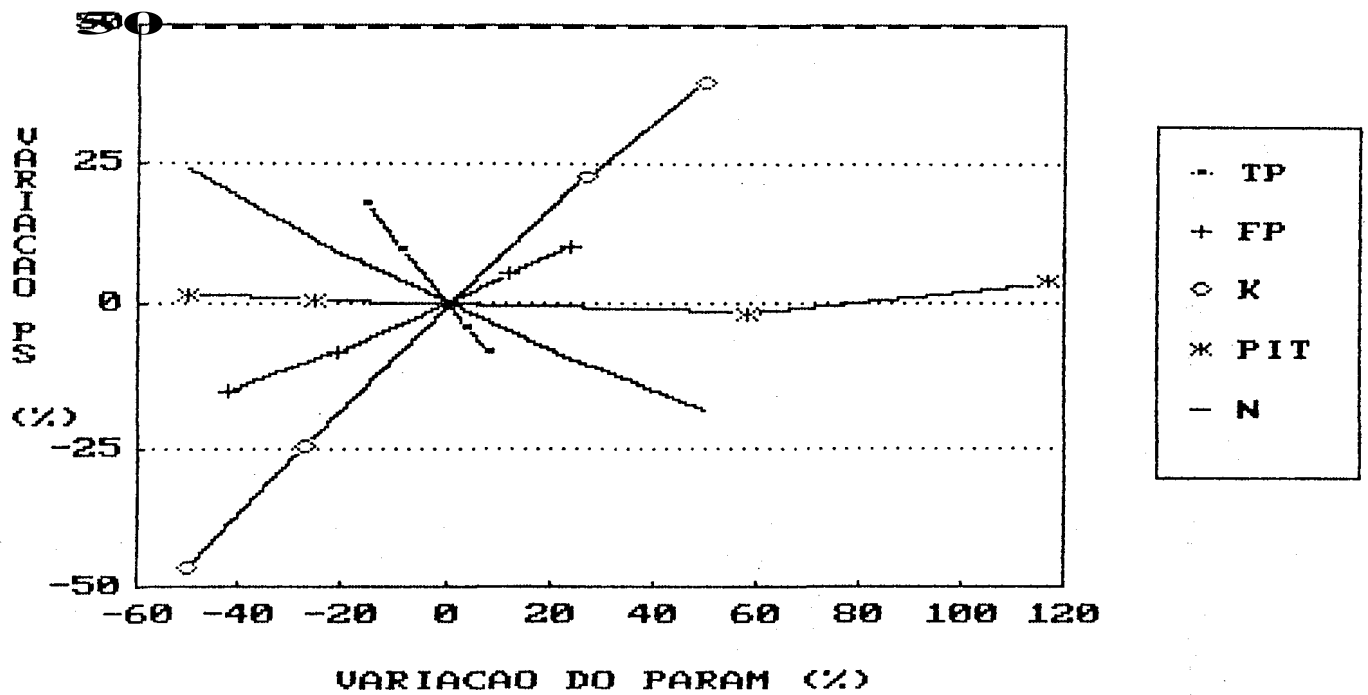


Figura 4.3 - Resultados da Análise de Sensibilidade do Modelo ANSWERS Parâmetros de Baixa e Média Sensibilidade

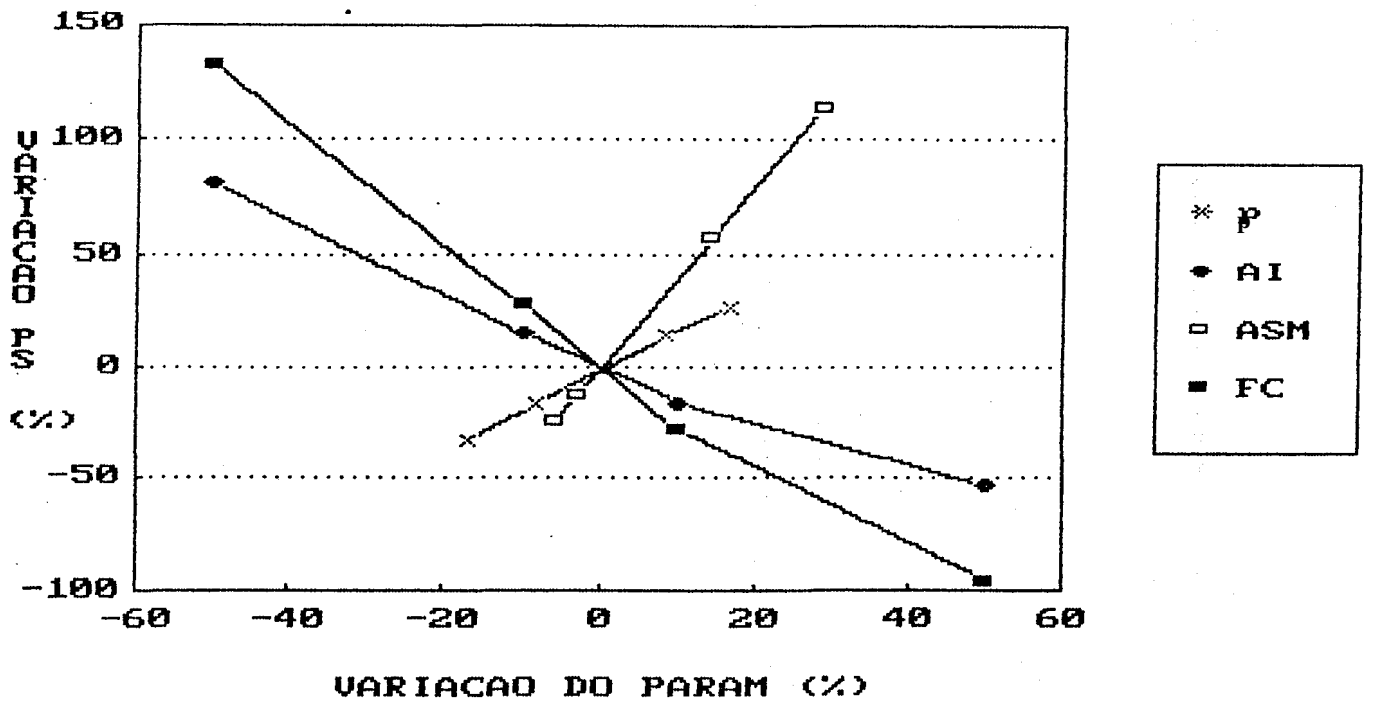


Figura 4.4 - Resultados da Análise de Sensibilidade do Modelo ANSWERS Parâmetros de Alta Sensibilidade

### 4.3 - Ajuste e Verificação dos Modelos

#### 4.3.1 - Modelo IPH2SED

O Modelo IPH2SED utiliza a MUSLE para predição da produção de sedimentos, estimando os valores de volume de escoamento superficial e vazão de pico alternativamente pela metodologia do SCS ou do modelo IPH-II.

Os valores dos coeficientes  $a$  e  $b$  da equação 3.23 foram estimados por Williams (1975a) a partir de um conjunto de 778 eventos em 18 pequenas bacias do Estados Unidos, sendo 14 delas em Riesel, no Texas, e 2 em Hastings, no Nebraska. Estes valores, portanto, poderiam não ser representativos para a bacia do Forquetinha.

Para verificar a validade da aplicação destes valores às bacias em estudo, foi aplicada a MUSLE aos eventos, utilizando os valores medidos de  $Q_s$  e  $q_p$  como dados de entrada. Os resultados, apresentados no quadro 4.5 e na figura 4.5, mostram uma tendência de superestimar os valores de produção de sedimentos. Esta mesma observação já havia sido efetuada por Kauark Leite e Mouchel (1990), quando da aplicação da MUSLE a dados da bacia do rio Orgeval, na França.

Procurou-se, então, calcular, para cada uma das duas sub-bacias em estudo, os valores dos coeficientes  $a$  e  $b$ , utilizando regressão por técnica de mínimos quadrados. Neste caso, admite-se que todos os demais coeficientes são verdadeiros para a estimativa da produção de sedimentos. Os resultados não foram conclusivos, pois, para se obter um coeficiente de determinação acima de 0,7 (que já é um valor baixo), era necessário eliminar alguns eventos da amostra, que já era pequena. Mesmo com esta eliminação, embora se obtivessem valores melhores para o coeficiente de determinação, os resultados obtidos pelas regressões para os coeficientes  $a$  e  $b$  foram muito diferentes para uma e outra bacia. Estes resultados foram:

Quadro 4.5 - Resultados da MUSLE, com Valores Medidos de Volume Superficial e Vazão de Pico

ISUBI IBA- ICIAI	DATA DO EVENTO	Qs (m <sup>3</sup> )	qp (m <sup>3</sup> /s)	C MUSLE	Y MEDIDO (t)	Y MUSLE (t)
	124/12/78	440	0.180	0.114	6.407	91.131
	112/02/79	512	0.100	0.034	4.305	21.288
	103/08/79	5087	0.150	0.017	20.394	48.323
	104/10/79	11454	0.230	0.017	114.915	96.718
	118/05/79	351	0.037	0.017	0.920	4.937
	104/06/79	164	0.018	0.017	0.320	2.154
	123/06/79	133	0.023	0.017	0.000	2.197
	108/08/79	7038	0.063	0.017	3.955	35.655
	111/08/79	1659	0.021	0.017	2.489	8.580
A1	131/08/79	420	0.065	0.017	2.806	7.485
	128/09/79	123	0.020	0.017	0.059	1.945
	129/09/79	737	0.019	0.017	2.547	5.150
	104/04/79	13585	0.078	0.034	0.780	116.156
	115/04/79	15675	0.069	0.034	2.100	117.497
	108/05/79	2090	0.004	0.017	1.169	3.858
	122/05/79	15345	0.237	0.017	10.115	115.858
	106/07/79	7425	0.024	0.017	4.763	21.401
	125/08/79	nd	0.028	0.017	0.180	nd
	112/02/79	58	0.030	0.035	0.634	1.897
	122/05/79	6063	0.130	0.018	21.244	29.965
	123/06/79	675	0.049	0.018	1.033	5.075
	103/08/79	3448	0.179	0.018	11.182	26.129
	108/08/79	6302	0.119	0.018	1.845	29.141
	104/04/79	14894	nd	0.035	1.595	nd
	115/04/79	2004	nd	0.018	3.035	nd
B1	108/05/79	629	0.016	0.018	2.643	2.606
	118/05/79	629	0.025	0.018	1.790	3.346
	104/06/79	118	nd	0.018	0.043	nd
	106/07/79	3065	0.117	0.018	3.266	19.279
	125/08/79	707	0.007	0.018	0.000	1.752
	131/08/79	118	0.007	0.018	0.000	0.643
	128/09/79	2319	0.014	0.018	0.014	5.022
	129/09/79	3694	0.055	0.018	0.535	14.025
	104/10/79	131204	0.198	0.018	79.477	94.926

LEGENDA:

Qs = Volume escoado superficialmente;

Y = Produção de sedimentos;

qp = Vazão superficial de pico;

nd = Dado não disponível.

OBS.: Valores de K, C, P e LS conforme Anexo C

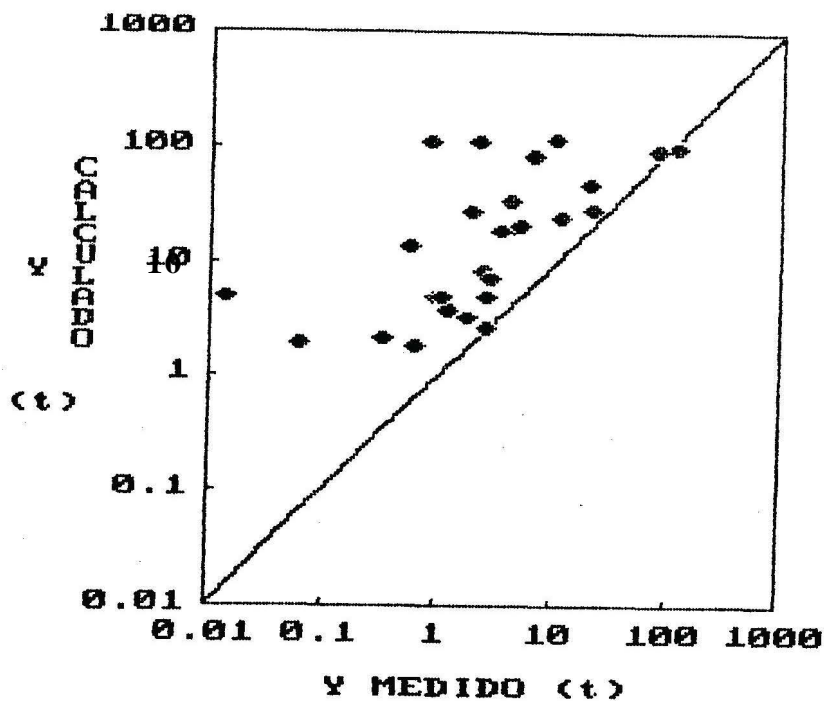


Figura 4.5 - Resultados da MUSLE,  
com Volume Superficial e Vazão de Pico Medidos

Sub-bacia A1:

com todos eventos :  $R^2=0,44$ ;  $a=1,71$ ;  $b=0,49$ ;

com eventos selecionados:  $R^2=0,82$ ;  $a=0,71$ ;  $b=0,81$ ;

Sub-bacia B1:

com todos eventos :  $R^2=0,42$ ;  $a=0,67$ ;  $b=0,61$ ;

com eventos selecionados:  $R^2=0,71$ ;  $a=2,70$ ;  $b=0,53$ .

Optou-se, portanto, pela utilização dos valores sugeridos por Williams para os coeficientes a e b, pois, mesmo que superestimem a produção de sedimentos para os casos estudados, são valores testados com uma amostra muito grande e refletem a forma de utilização usual do modelo, conforme é o objetivo deste estudo. Para estabelecer uma nova relação, é necessária uma amostra maior do que a disponível de bacias e eventos. Além disto, o uso das regressões obtidas seria tendencioso, pois não haveria dados para verificação.



Cada evento foi simulado com o modelo IPH2SED utilizando três alternativas distintas de cálculo:

- 1 - metodologia do SCS, com  $I_a$  obtido do hidrograma e CN calculado pela equação 3.21;
- 2 - metodologia do SCS, com  $I_a=0,2.S_m$  e CN estimado pelas tabelas A1, A2 e A3, apresentadas no Anexo A;
- 3 - metodologia do modelo IPH-II.

Os resultados para cada hipótese de cálculo são apresentados nos quadros 4.6, 4.7 e 4.8 e nas figuras 4.6 a 4.13. A determinação dos valores dos parâmetros CN (nos casos 2 e 3), K, C e LS é apresentada no Anexo C.

Os resultados da primeira alternativa de cálculo (metodologia do SCS, com  $I_a$  obtido do hidrograma e CN calculado pela equação 3.21) são apresentados no quadro 4.6 e nas figuras 4.6 e 4.7. Não é apresentada a figura com os volumes de escoamento superficial observados e calculados porque o método de cálculo de CN já forçava uma igualdade entre eles.

Observa-se, para esta alternativa de simulação, uma tendência sistemática de superestimativa da vazão de pico, o que, conseqüentemente, provoca superestimativas na produção de sedimentos. Deve-se ressaltar que esta produção já é superestimada pela aplicação da MUSLE, mesmo com valores observados de volume de escoamento superficial e vazão de pico, como observado anteriormente.

Os resultados da segunda alternativa de cálculo (metodologia do SCS, com  $I_a=0,2.S_m$ ) são apresentados no quadro 4.7 e nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10.

O volume escoado superficialmente tem uma tendência de subestimar os valores. Porém, novamente é observada uma forte tendência de superestimativa da vazão de pico. Com isto, embora os

Quadro 4.6 - Resultados do Modelo IPH2SED  
Metodologia do SCS, com Ia obtido do hidrograma

SUBI	DATA	Ia	Qs	qp	Y	CN	Qs	qp	Y
IBA-	DO	(mm)	MEDIDO	MEDIDO	MEDIDO	CALC	CALC	CALC	CALC
ICIAI	EVENTO	(mm)	(m3)	(m3/s)	(t)	*	(m3)	(m3/s)	(t)
	124/12/78	32.0	440	0.180	6.407	152.4	440	0.090	58.121
	112/02/79	13.5	512	0.100	4.305	151.1	511	0.132	23.416
	103/08/79	2.5	5087	0.150	20.394	135.2	5080	0.572	102.133
	104/10/79	8.0	11454	0.230	114.915	143.5	11464	0.851	201.312
	118/05/79	2.5	351	0.037	0.920	110.0	351	0.077	7.458
	104/06/79	8.0	164	0.018	0.320	6.9	163	0.012	1.744
	123/06/79	30.0	133	0.023	0.000	188.1	133	0.050	3.374
	108/08/79	6.2	7038	0.063	3.955	184.3	7031	0.448	106.930
	111/08/79	3.7	1659	0.021	2.489	148.7	1695	0.175	28.479
A1	131/08/79	5.3	420	0.065	2.806	139.3	420	0.116	10.349
	128/09/79	6.2	123	0.020	0.059	133.3	123	0.033	2.582
	129/09/79	6.0	737	0.019	2.547	156.1	737	0.093	12.548
	104/04/79	nd	13585	0.078	0.780	169.0	13690	0.631	1353.928
	115/04/79	nd	15675	0.069	2.100	169.0	15725	1.350	1585.704
	108/05/79	nd	2090	0.004	1.169	170.0	2073	0.301	43.213
	122/05/79	nd	15345	0.237	10.115	185.0	15375	1.260	1295.681
	106/07/79	nd	7425	0.024	4.763	170.0	7302	1.217	1191.081
	125/08/79	nd	nd	0.028	0.180	180.0	0.78	0.000	0.013
	112/02/79	13.5	58	0.030	0.634	113.7	58	0.015	1.284
	122/05/79	2.0	6063	0.130	21.244	174.1	6059	0.587	19.689
	123/06/79	7.4	675	0.049	1.033	136.2	675	0.141	9.178
	103/08/79	26.0	3448	0.179	11.182	195.5	9517	1.405	146.290
	108/08/79	18.8	6302	0.119	1.845	199.5	6293	0.970	94.297
	104/04/79	nd	14894	nd	1.595	174.0	14621	0.625	1229.744
B1	115/04/79	nd	2004	nd	3.035	162.0	2007	0.255	45.704
	108/05/79	nd	629	0.016	2.643	162.0	577	0.084	6.287
	118/05/79	nd	629	0.025	1.790	163.0	621	0.150	9.071
	104/06/79	nd	118	nd	0.043	162.0	114	0.015	0.981
	106/07/79	nd	3065	0.117	3.266	165.0	3193	0.433	41.035
	125/08/79	nd	707	0.007	0.000	193.0	770	0.147	10.111
	131/08/79	nd	118	0.007	0.000	186.0	121	0.057	2.117
	128/09/79	nd	2319	0.014	0.014	198.0	2232	0.356	30.083
	129/09/79	nd	3694	0.055	0.535	189.0	3749	0.430	44.718
	104/10/79	nd	131204	0.198	79.477	191.0	131400	14.407	1541.367

nd: Dado não disponível.

\* : Para Ia não disponível, CN estimado para a condição Ia=0,2.5 como

$$25400$$

$$CN = \frac{25400}{(0,4Pa + 0,8Qs - [(0,4Pa + 0,8Qs)^2 - 0,16Pa(Pa - Qs)]^{0,5}) / 0,08 + 254}$$

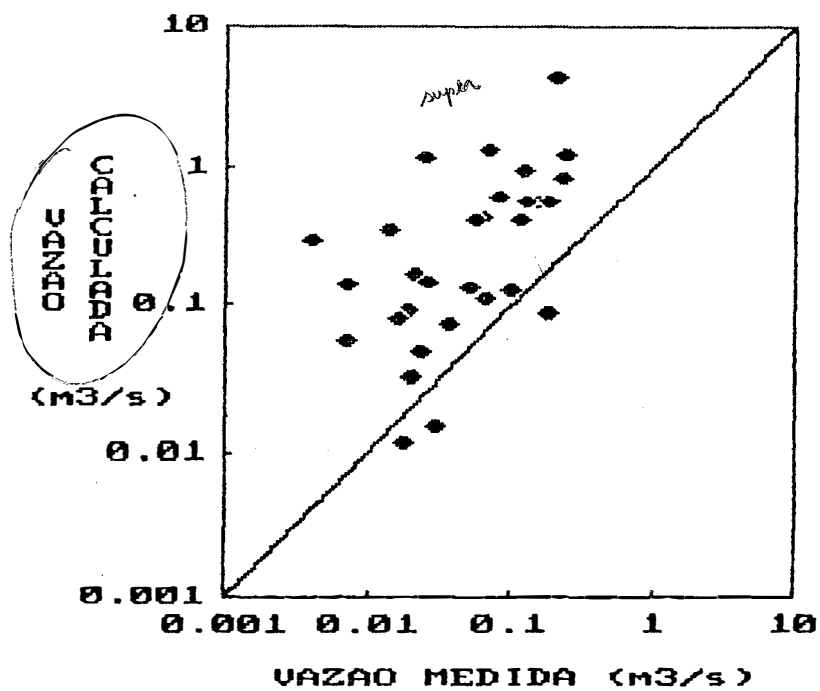


Figura 4.6 - Resultados do Modelo IPH2SED para Vazão de Pico Metodologia do SCS, com Ia obtido do hidrograma

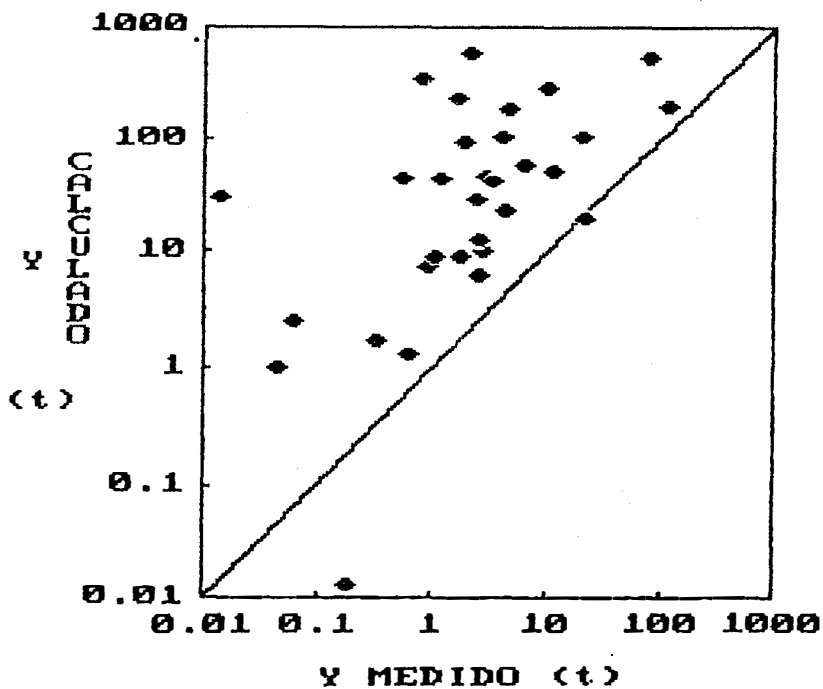


Figura 4.7 - Resultados do Modelo IPH2SED para Sedimentos Produzidos Metodologia do SCS, com Ia obtido do hidrograma



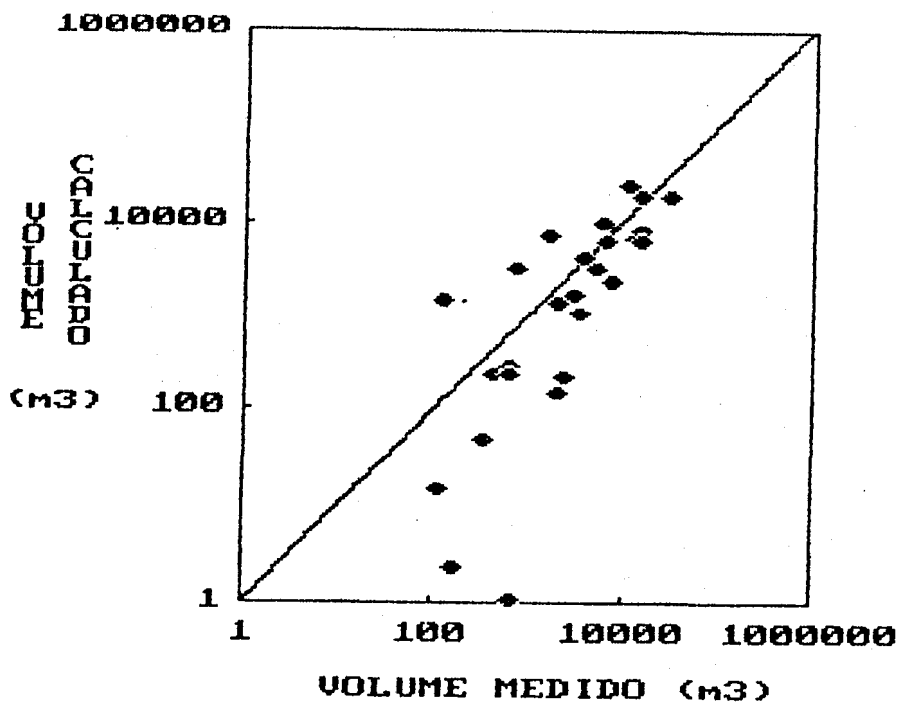


Figura 4.8 - Resultados do Modelo IPH2SED para o Volume Escoado  
Metodologia do SCS, com  $I_a=0,2.Sm$

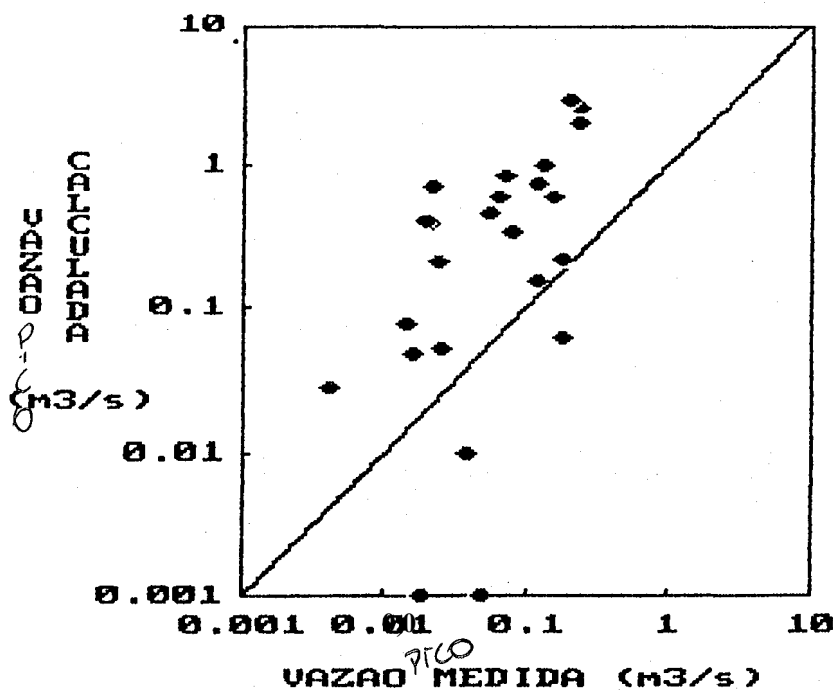


Figura 4.9 - Resultados do Modelo IPH2SED para a Vazão de Pico  
Metodologia do SCS, com  $I_a=0,2.Sm$

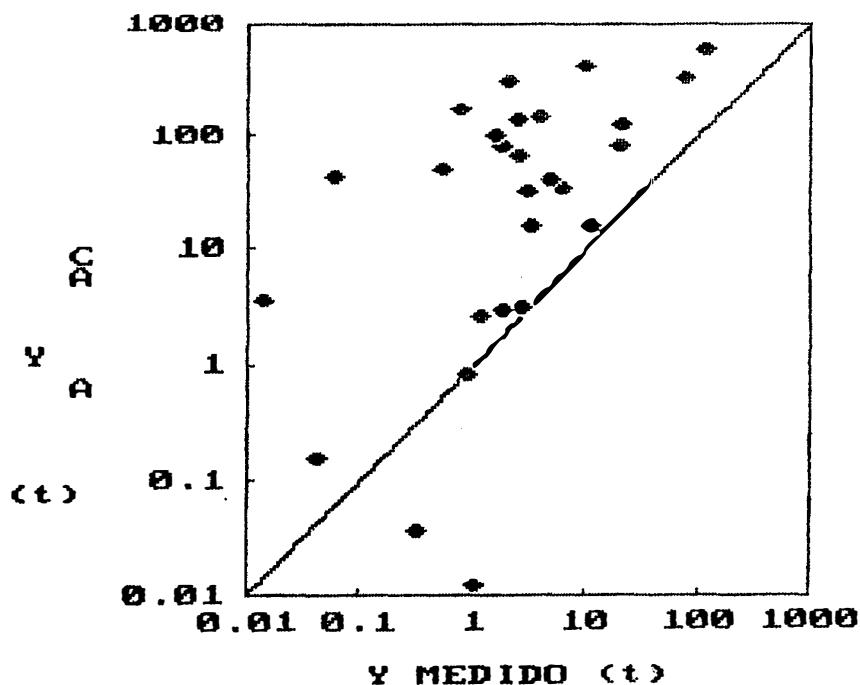


Figura 4.10-Resultados do Modelo IPH2SED para Sedimentos Produzidos Metodologia do SCS, com  $I_a=0,2.S_m$

resultados apresentem subestimativas em alguns eventos, há, novamente, na maioria das simulações, superestimativas para a produção de sedimentos.

Para a aplicação da metodologia do modelo IPH-II, correspondente à terceira alternativa de simulação, há necessidade de calibrar os parâmetros do modelo, uma vez que seu empirismo dificulta a estimativa direta a partir de características físicas das bacias ou dos eventos. Assim, os 17 eventos para os quais se dispunha de dados de linigrafia foram utilizados para ajuste do modelo IPH-II, sendo efetuado um pré-ajuste com os dados de 4 eventos selecionados para a bacia A1 e 2 eventos para a bacia B1. O critério utilizado foi o de selecionar os eventos com sedimentogramas, desde que houvesse compatibilidade entre os pluviogramas das sub-bacias e os de Araguari. Nos demais eventos deste grupo foi utilizado este pré-ajuste, ajustando-se, porém, as condições iniciais e as variáveis de maior sensibilidade. Os eventos para os quais eram disponíveis apenas os totais de precipitação e

produção de sedimentos, sem dados de linigrafia, foram utilizados para verificação, adotando-se, para os parâmetros, os valores médios dos ajustes de cada bacia. As condições iniciais para estes eventos foram obtidas a partir de Silveira (1982).

Os resultados desta alternativa de simulação (metodologia do modelo IPH-II) são apresentados no quadro 4.8 e nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

Os resultados das simulações quanto ao volume do escoamento superficial foram semelhantes para os eventos de ajuste e para os de previsão, sem tendência marcada de sub ou superestimativa. Porém, a vazão de pico somente apresentou bons resultados quando foi possível ajustar os parâmetros. Nos eventos para os quais foram utilizados valores médios dos parâmetros, os resultados se mostraram imprevisíveis. Com isto, não houve uma verificação do ajuste efetuado, e estes eventos passaram a ser denominados eventos de previsão, conforme apresentado nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13. Este resultado se deve, principalmente, à grande sensibilidade do modelo a determinados parâmetros, como é o caso de  $h$  ( $h = e^{-k}$ ). No caso específico deste parâmetro, Tomasella (1990) mostra que ele varia em função da umidade antecedente, tendo, portanto, seu valor alterado de evento para evento.

Os resultados das simulações para a produção de sedimentos se mostraram razoáveis nos eventos de ajuste, embora tenha havido superestimativa, devido ao emprego da MUSLE. Porém, quando as vazões e volumes não são bem determinadas, como foi o caso dos eventos de previsão, a qualidade das simulações é bastante ruim.

#### 4.3.2 - Modelo ANSWERS

Para a aplicação do modelo ANSWERS, as sub-bacias em estudo foram discretizadas em elementos quadrados de 50 m de lado. Assim, cada sub-bacia foi subdividida em elementos de 2500 m<sup>2</sup> (0,25 ha), num total de 220 elementos para a sub-bacia A1 e 157 elementos para

Quadro 4.8 - Resultados do Modelo IPH2SED

Metodologia do Modelo IPH-II

ISUBI	DATA	Qs	qp	Y	h	ksup	ksub	Qs	qp	Y	USO
IBA-	DO	MEDID	MEDID	MEDID				CALC	CALC	CALC	
ICIAI	EVENTO	m	lm/s	t		lmm/Δt	lmm/Δt	m	lm/s	t	
	124/12/78	440	0.180	6.407	0.855	3.0	65	597	0.190	103.985	PREAJ
	112/02/79	512	0.100	4.305	0.660	1.8	65	211	0.100	12.196	PREAJ
	103/08/79	5087	0.150	20.394	0.855	1.7	65	351	0.140	10.504	PREAJ
	104/10/79	11454	0.230	114.915	0.855	133.0	65	11284	0.250	99.907	PREAJ
	118/05/79	351	0.037	0.920	0.751	5.0	65	185	0.040	3.453	AJUST
	104/06/79	164	0.018	0.320	0.630	8.0	200	125	0.020	1.768	AJUST
	123/06/79	133	0.023	0.000	0.665	3.0	200	90	0.030	1.997	AJUST
	108/08/79	7038	0.063	3.955	0.660	40.0	65	3846	0.060	23.454	AJUST
	111/08/79	1659	0.021	2.489	0.675	15.0	10	196	0.010	2.065	AJUST
A1	131/08/79	420	0.065	2.806	0.550	4.0	65	368	0.070	7.322	AJUST
	128/09/79	123	0.020	0.059	0.515	4.0	200	78	0.020	1.523	AJUST
	129/09/79	737	0.019	2.547	0.540	130.0	20	534	0.020	4.102	AJUST
	104/04/79	13585	0.078	0.780	0.680	13.0	85	883	0.040	16.597	VERIF
	115/04/79	15675	0.069	2.100	0.680	13.0	85	125320	0.950	1626.798	VERIF
	108/05/79	2090	0.004	1.169	0.680	13.0	85	3733	0.000	0.000	VERIF
	122/05/79	15345	0.237	10.115	0.680	13.0	85	118297	0.660	1227.322	VERIF
	106/07/79	7425	0.024	4.763	0.680	13.0	85	11656	0.580	164.525	VERIF
	125/08/79	nd	0.028	0.180	0.680	13.0	85	0	0.000	0.000	VERIF
	112/02/79	58	0.030	0.634	0.676	2.0	300	79	0.030	2.430	PREAJ
	122/05/79	6063	0.130	21.244	0.680	10.0	200	3040	0.140	21.154	PREAJ
	123/06/79	675	0.049	1.033	0.653	5.0	65	297	0.050	3.276	AJUST
	103/08/79	3448	0.179	11.182	0.720	20.0	65	4034	0.190	29.156	AJUST
	108/08/79	6302	0.119	1.845	0.600	6.0	65	1595	0.110	12.862	AJUST
	104/04/79	14894	nd	1.595	0.670	8.0	140	15288	0.36	173.997	VERIF
B1	115/04/79	2004	-	3.035	0.670	8.0	140	6037	0.300	92.872	VERIF
	108/05/79	629	0.016	2.643	0.670	8.0	140	220	0.020	1.768	VERIF
	118/05/79	629	0.025	1.790	0.670	8.0	140	1682	0.210	19.141	VERIF
	104/06/79	118	-	0.043	0.670	8.0	140	0	0.000	0.000	VERIF
	106/07/79	3065	0.117	3.266	0.670	8.0	140	5922	0.470	60.767	VERIF
	125/08/79	707	0.007	0.000	0.670	8.0	140	0	0.000	0.000	VERIF
	131/08/79	118	0.007	0.000	0.670	8.0	140	0	0.000	0.000	VERIF
	128/09/79	2319	0.014	0.014	0.670	8.0	140	0	0.000	0.000	VERIF
	129/09/79	3694	0.055	0.535	0.670	8.0	140	0	0.000	0.000	VERIF
	104/10/79	31204	0.198	79.477	0.670	8.0	140	148910	1.770	1415.969	VERIF

OBS.:

tc = 1 Δt  
 Io = 17,2 mm/Δt  
 Ib = 0,08 mm/Δt  
 Rmax = 0  
 Δt = 15 min

PREAJ = Evento usado para pré-ajuste;  
 AJUST = Evento usado para ajuste;  
 VERIF = Evento usado para verificação.



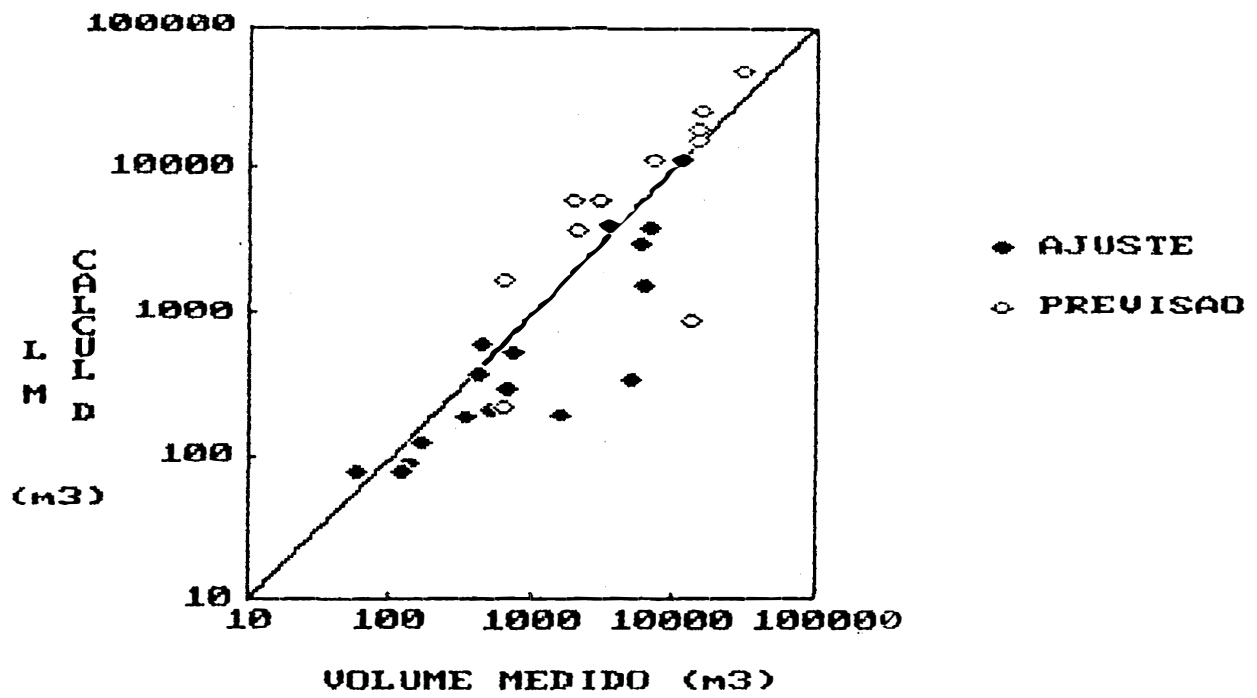


Figura 4.11 - Resultados do Modelo IPH2SED para o Volume Escoado  
 Metodologia do Modelo IPH-II

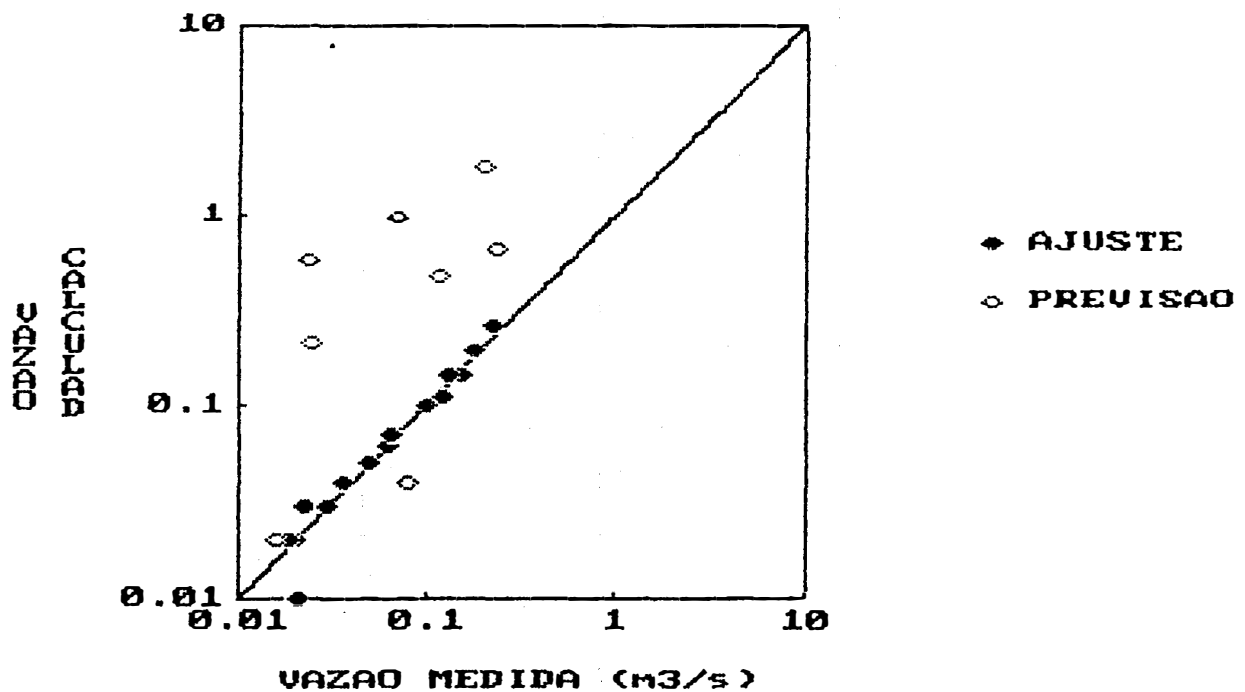


Figura 4.12 - Resultados do Modelo IPH2SED para a Vazão de Pico  
 Metodologia do Modelo IPH-II

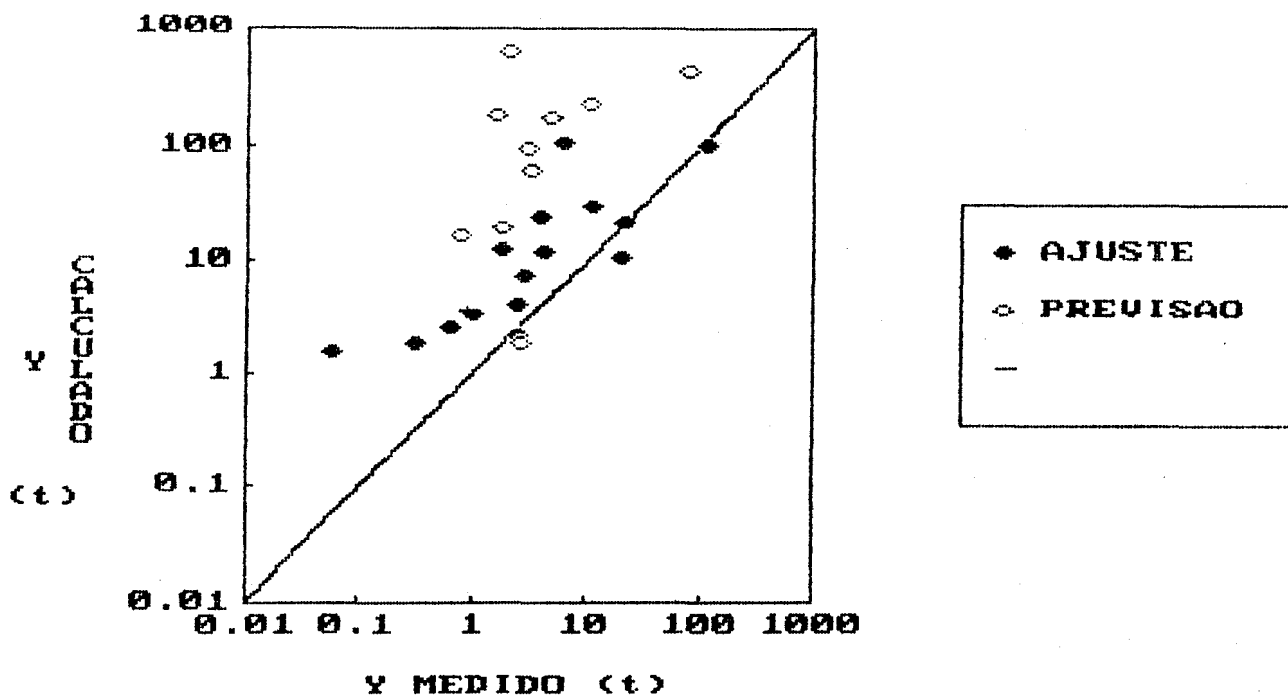


Figura 4.13-Resultados do Modelo IPH2SED para Sedimentos Produzidos Metodologia do Modelo IPH-II

a sub-bacia B1. Esta discretização permitiu uma excelente representação das sub-bacias, conforme é apresentado nas figuras 4.14 e 4.15.

Foi necessário descartar os dados dos eventos ocorridos nos dias 04/04/79 e 06/07/78 nas duas sub-bacias, devido à complexidade de sua precipitação, que exigia uma capacidade maior do que a prevista pelo programa. A amostra, por este motivo, ficou reduzida a 30 eventos.

Os resultados das simulações são apresentados no quadro 4.9 e nas figuras 4.16 e 4.17. Não foi verificado o ajuste temporal do modelo devido ao pequeno número de eventos para os quais o sedimentograma era disponível, o que poderia causar tendenciosidade. A determinação dos valores dos parâmetros K, C e ASM é apresentada no Anexo C. Os demais parâmetros foram obtidos das tabelas A5, A6 e A7, do Anexo A.

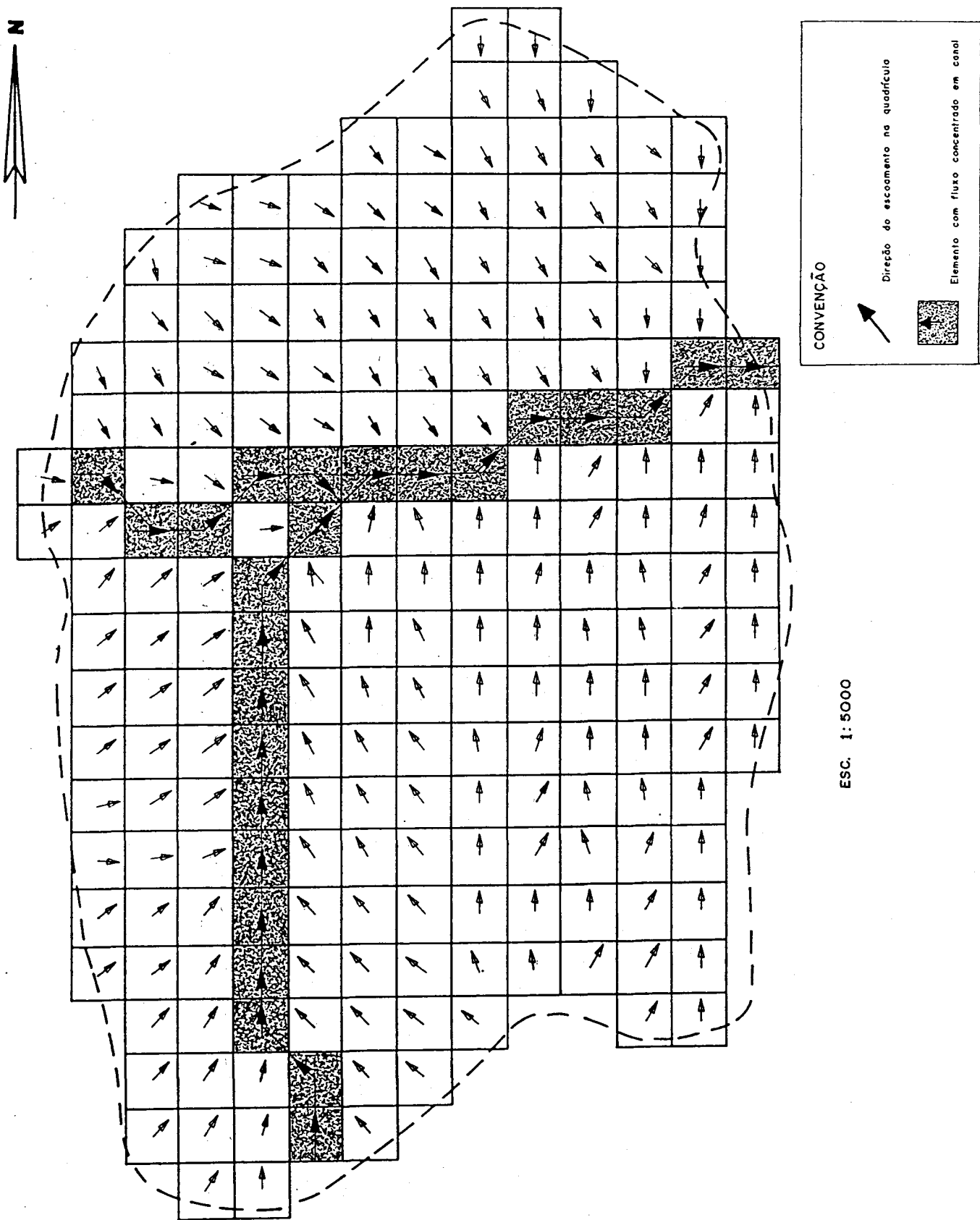
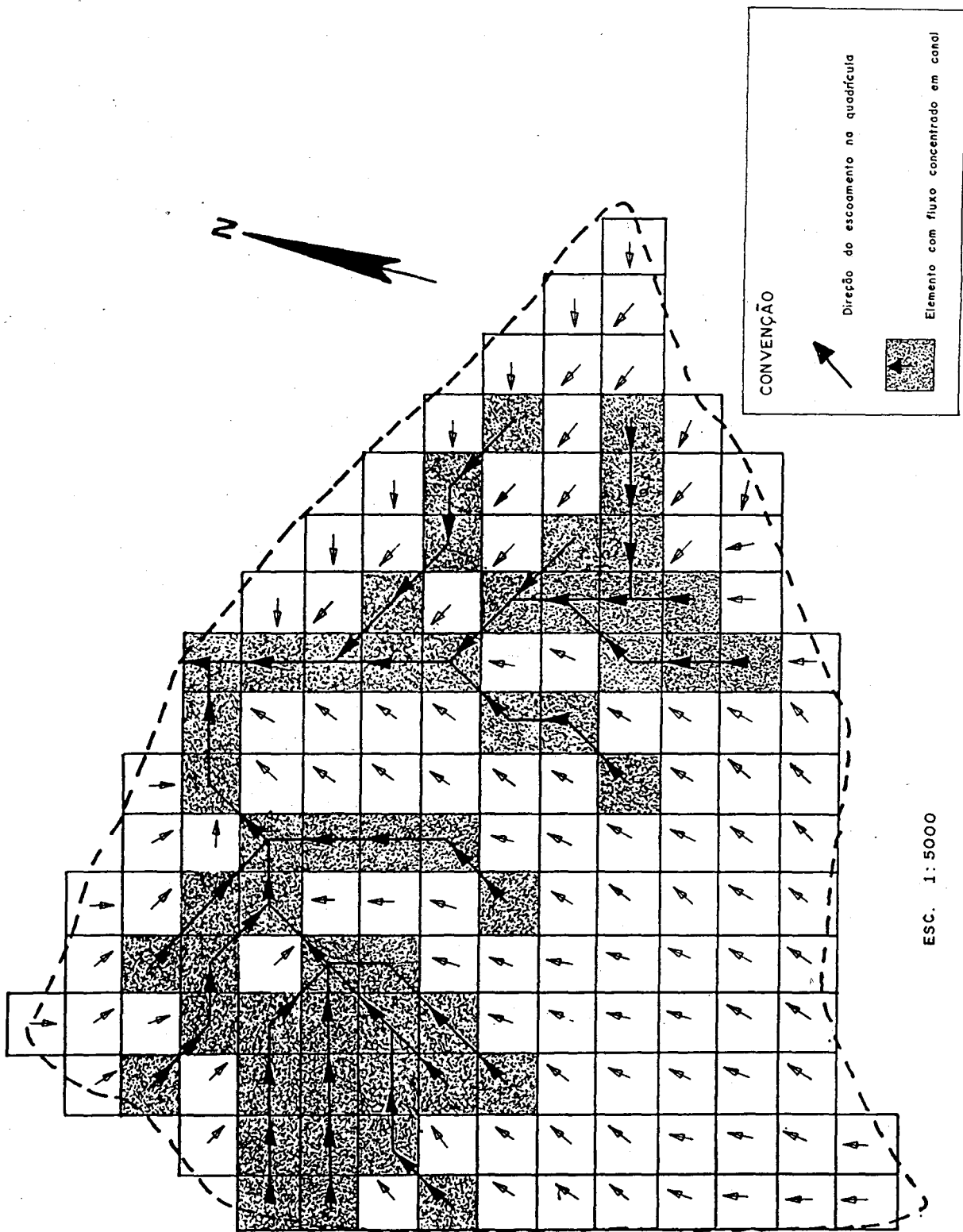


Figura 4.14 - Sub-bacia A1  
 Discretização Adotada para o Modelo ANSWERS



**Figura 4.15 - Sub-bacia B1**  
 Discretização Adotada para o Modelo ANSWERS

Quadro 4.9 - Resultados do Modelo ANSWERS

ISUBI	DATA	IPA	QTOT	Y	ASM	QTOT	Y
IBA-	DO		IMEDIDO	MEDIDO	ESTIMI	CALC	CALC
ICIA	EVENTO	(dia)	(m3)	(t)	(%)	(m3)	(t)
	124/12/78	9	821	6.407	35	5110	56.737
	112/02/79	5	700	4.305	35	2034	6.430
	103/08/79	13	9364	20.394	35	8076	7.300
	104/10/79	4	122960	114.915	66	122564	24.595
	118/05/79	10	1290	0.920	35	848	0.408
	104/06/79	13	967	0.320	35	149	0.000
	123/06/79	20	1440	0.000	35	178	0.000
A1	108/08/79	1	124768	3.955	90	10163	1.508
	111/08/79	3	7188	2.489	90	8559	0.000
	131/08/79	6	1788	2.806	35	120	0.130
	128/09/79	3	620	0.059	90	1913	0.000
	129/09/79	1	9890	2.547	90	7319	0.214
	115/04/79	11	nd	2.100	35	13199	12.549
	108/05/79	10	nd	1.169	35	1091	0.000
	122/05/79	4	nd	10.115	90	18077	12.265
	125/08/79	14	nd	0.180	35	0	0.000
	112/02/79	5	121	0.634	35	0	4.014
	122/05/79	4	13812	21.244	90	9825	3.966
	123/06/79	20	2498	1.033	35	1.08	0.000
	103/08/79	13	7973	11.182	35	1102	0.870
	108/08/79	5	15527	1.845	90	6182	0.735
B1	115/04/79	11	nd	3.035	35	1379	0.711
	108/05/79	10	nd	2.643	35	286	0.000
	118/05/79	10	nd	1.790	35	240	0.792
	104/06/79	13	nd	0.043	35	16	0.000
	125/08/79	14	nd	0.000	35	0	0.000
	131/08/79	6	nd	0.000	35	0	0.000
	128/09/79	3	nd	0.014	90	229	0.000
	129/09/79	1	nd	0.535	90	4156	0.596
	104/10/79	4	nd	79.477	66	19137	14.673

OBS.:

- TP = 47 %
- FP = 66 %
- FC = 10 mm/h
- AI = 20 mm/h
- P = 0,6
- DF = 250 mm (CIRÍACO) e 150 mm (CHARRUA)
- K = 0,142 (CIRÍACO) e 0,324 (CHARRUA) (t.ha.h)/(ha.MJ.cm)
- PIT = 0,6 mm
- RC = 0,43
- HU = 60 mm

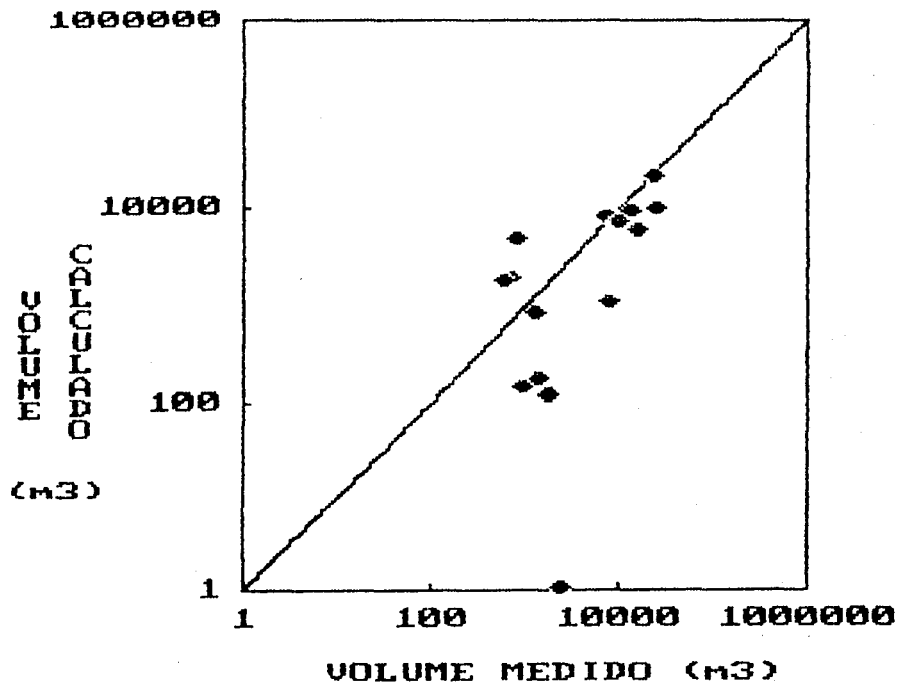


Figura 4.16 - Resultados do Modelo ANSWERS para o Volume Escoado

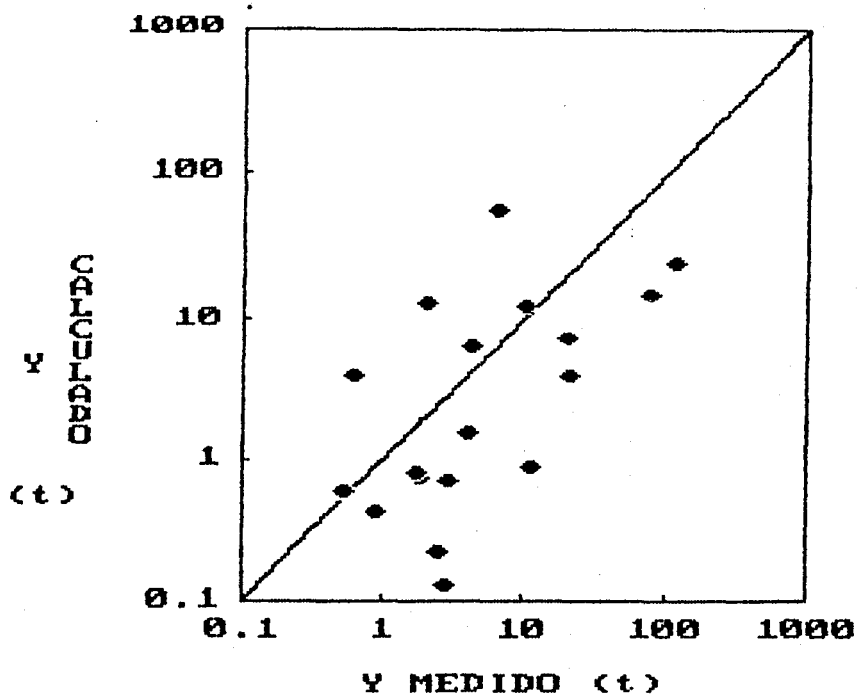


Figura 4.17-Resultados do Modelo ANSWERS para Sedimentos Produzidos

Os resultados das simulações foram melhores que os dos demais modelos, principalmente considerando que não houve ajuste. Todos os parâmetros do modelo foram obtidos sem calibração, simplesmente a partir das características físicas do sistema. Não se observa, nos resultados, uma tendência de sub ou superestimativa, o que mostra não ter havido tendenciosidade quando da aplicação deste modelo aos eventos estudados.

#### 4.4 - Análise dos Resultados

Os resultados apresentados no item 4.3 são a seguir analisados, sendo discutidas as causas de um melhor ou pior ajuste de um modelo a uma determinada situação. Não se trata de uma comparação entre os resultados das simulações com cada modelo, mas sim da verificação sobre qual modelo tem sua aplicação mais recomendada em situações específicas, tendo sempre em mente os objetivos de cada enfoque de modelagem.

Deve-se destacar que esta análise está baseada em dados de qualidade duvidosa, conforme comentado no item 4.1.3. Por esta razão, a análise efetuada é muito mais qualitativa que quantitativa. Além disto, não se fala em erros, mas sim em desvios entre os valores medidos e os calculados, uma vez que não há garantia da qualidade das medições, que também podem estar afetadas por erros.

Assim, os resultados das aplicações dos modelos ANSWERS e MUSLE visam comparar a aplicabilidade de modelos conceituais e empíricos; os resultados dos modelos IPH-II e SCS visam comparar enfoques de simulação e de projeto; os resultados do IPH-II e do ANSWERS visam a comparação de esquemas de cálculo concentrados e distribuídos.

No quadro 4.10 é apresentado um resumo dos resultados obtidos com os modelos, no que se refere ao volume total escoado e à produção de sedimentos. No quadro 4.11 é apresentado, para cada evento e para cada modelo, o desvio relativo quanto à produção de

Quadro 4.10 - Comparação dos Resultados

ISUBI	DATA	QTOT = VOLUME TOTAL	Y = APORTE TOTAL DE SEDIMENTOS						
IBA-	DO	MEDIDO	IPH-III	ANSWERS	MEDIDO	SCS-1	SCS-2	IPH-III	ANSWERS
ICIA	EVENTO	(m3)	(m3)	(m3)	(t)	(t)	(t)	(t)	(t)
	124/12/78	821	801	5110	6.4	58.1	33.9	104.0	56.7
	112/02/79	700	431	2034	4.3	23.4	0.0	12.2	6.4
	103/08/79	9364	6696	8076	20.4	102.1	81.1	10.5	7.3
	104/10/79	122960	122300	22564	114.9	1201.3	1576.5	99.9	24.6
	118/05/79	1290	1335	848	0.9	7.5	0.8	3.5	0.4
	104/06/79	967	961	149	0.3	1.7	0.0	1.8	0.0
	123/06/79	1440	1463	178	0.0	3.4	0.0	2.0	0.0
	108/08/79	24768	19187	10163	4.0	106.9	145.5	23.5	1.5
A1	111/08/79	7188	7665	8559	2.5	28.5	140.1	2.1	0.0
	131/08/79	1788	1883	120	2.8	10.3	0.0	7.3	0.1
	128/09/79	620	580	1913	0.1	2.6	41.2	1.5	0.0
	129/09/79	9890	9307	7319	2.5	12.5	64.0	4.1	0.2
	104/04/79	nd	11028	nd	0.8	1353.9	165.4	16.6	nd
	115/04/79	nd	129663	13199	2.1	1585.7	1307.9	1626.8	12.5
	108/05/79	nd	3733	1091	1.2	43.2	2.6	0.0	0.0
	122/05/79	nd	121171	18077	10.1	1295.7	1430.5	1227.3	12.3
	106/07/79	nd	120117	nd	4.8	191.1	38.3	164.5	nd
	125/08/79	nd	2098	0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	112/02/79	121	137	0	0.6	1.3	0.0	2.4	4.0
	122/05/79	13812	13645	9825	21.2	19.7	122.3	21.2	4.0
	123/06/79	2498	2541	1.08	1.0	9.2	0.0	3.3	0.0
	103/08/79	7973	7263	1102	11.2	50.7	15.4	29.2	0.9
	108/08/79	15527	11428	6182	1.8	94.3	79.9	12.9	0.7
	104/04/79	nd	122418	nd	1.6	1229.7	97.7	174.0	nd
B1	115/04/79	nd	8146	1379	3.0	45.7	31.6	92.9	0.7
	108/05/79	nd	2407	286	2.6	6.3	3.1	1.8	0.0
	118/05/79	nd	2450	240	1.8	9.1	3.0	19.1	0.8
	104/06/79	nd	1009	16	0.0	1.0	0.2	0.0	0.0
	106/07/79	nd	110261	nd	3.3	41.0	16.1	60.8	nd
	125/08/79	nd	769	0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0
	131/08/79	nd	290	0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0
	128/09/79	nd	247	229	0.0	30.1	3.6	0.0	0.0
	129/09/79	nd	787	4156	0.5	44.7	49.3	0.0	0.6
	104/10/79	nd	157625	19137	79.5	1541.4	1326.8	1416.0	14.7

nd: Dado não disponível.



Quadro 4.11 - Desvio Relativo dos Modelos para a Produção de Sedimentos

SUBI-BA-ICIAI	DATA DO EVENTO	DESVIDO RELATIVO QUANTO A Y				IDADOS DE LINIGRAFO
		ISCS - 1	ISCS - 2	IPH-II	ANSWERS	
	124/12/78	8.07	4.29	15.23	7.86	IDISPONIV.
	112/02/79	4.44	-1.00	1.83	0.49	IDISPONIV.
	103/08/79	4.01	2.98	-0.48	-0.64	IDISPONIV.
	104/10/79	0.75	4.02	-0.13	-0.79	IDISPONIV.
	118/05/79	7.11	-0.10	2.75	-0.56	IDISPONIV.
	104/06/79	4.45	-0.89	4.53	-1.00	IDISPONIV.
	123/06/79	nc	nc	nc	nc	IDISPONIV.
	108/08/79	26.04	35.79	4.93	-0.62	IDISPONIV.
A1	111/08/79	10.44	55.27	-0.17	-1.00	IDISPONIV.
	131/08/79	2.69	-1.00	1.61	-0.95	IDISPONIV.
	128/09/79	42.76	1697.42	24.81	-1.00	IDISPONIV.
	129/09/79	3.93	24.13	0.61	-0.92	IDISPONIV.
	104/04/79	452.75	1211.04	20.28	nc	N DISPON.
	115/04/79	277.91	1145.62	1297.48	4.98	N DISPON.
	108/05/79	35.97	1.22	-1.00	-1.00	N DISPON.
	122/05/79	28.23	41.56	21.47	0.21	N DISPON.
	106/07/79	39.12	7.03	33.54	nc	N DISPON.
	125/08/79	-0.93	-1.00	-1.00	-1.00	N DISPON.
	112/02/79	1.03	-1.00	2.83	5.33	IDISPONIV.
	122/05/79	-0.07	4.76	0.00	-0.81	IDISPONIV.
	123/06/79	7.88	-0.99	2.17	-1.00	IDISPONIV.
	103/08/79	3.54	0.37	1.61	-0.92	IDISPONIV.
	108/08/79	50.11	42.33	5.97	-0.60	IDISPONIV.
	104/04/79	143.04	60.23	1108.09	nc	N DISPON.
B1	115/04/79	14.06	9.41	29.60	-0.77	N DISPON.
	108/05/79	1.38	0.18	-0.33	-1.00	N DISPON.
	118/05/79	4.07	0.66	9.69	-0.56	N DISPON.
	104/06/79	21.81	2.58	-1.00	-1.00	N DISPON.
	106/07/79	11.56	3.91	17.61	nc	N DISPON.
	125/08/79	nc	nc	nc	nc	N DISPON.
	131/08/79	nc	nc	nc	nc	N DISPON.
	128/09/79	2147.79	1255.07	-1.00	-1.00	N DISPON.
	129/09/79	82.59	91.18	-1.00	0.11	N DISPON.
	104/10/79	5.81	3.11	4.23	-0.82	N DISPON.
MÉDIA M1		110.4214	150.964	14.0057	10.1688	
MÉDIA M2		1192.067	148.929	131.568	-0.108	
MÉDIA M3		110.4300	151.549	14.0986	11.4406	
MÉDIA M4		1192.177	149.047	132.195	10.7318	

DISPONIV. = Dados disponíveis; N DISPON. = Dados não disponíveis;  
nc = não calculado.  
M1 = Valor médio do desvio para eventos com linigrama disponível;  
M2 = Valor médio do desvio para eventos sem linigrama disponível;  
M3 = Valor médio do módulo do desvio para eventos com linigrama disp;  
M4 = Valor médio do módulo do desvio para eventos sem linigrama disp;

sedimentos, bem como os valores médios destes desvios para cada modelo, permitindo uma comparação de seus desempenhos. Neste quadro, o desvio relativo foi calculado como:

$$DER = (Y_{calc} - Y_{obs}) / Y_{obs} \quad (4.3)$$

onde: DER = desvio relativo;

$Y_{calc}$  = produção de sedimentos estimada pelo modelo;

$Y_{obs}$  = produção de sedimentos medida.

Na figura 4.18 são apresentados os resultados dos modelos IPH-II e ANSWERS para o volume total escoado, bem como os valores observados. Nas figuras 4.19 e 4.20 é apresentado o conjunto de resultados de todas as alternativas de simulação efetuadas, para o caso da produção de sedimentos, permitindo uma visualização e comparação geral dos resultados.

Os resultados da aplicação do modelo IPH2SED, nas suas três hipóteses de cálculo (SCS com  $I_a$  obtido do hidrograma observado, SCS com  $I_a=0,2.S_m$  e IPH-II), tiveram a tendência de superestimar os valores de produção de sedimentos. Isto pode ser facilmente verificado no quadro 4.11, onde os valores médios do desvio relativo para os eventos com linigrafia (M1) variam de 4 a 51 e os valores médios dos eventos sem linigrafia (M2) variam de 31 a 192. Estes valores são sempre positivos, o que indica superestimativa. Além disto, são bastante altos, mesmo que se descarte o valor de 192, que pode ser considerado tendencioso (devido ao evento de 28/09/79 da bacia B1). Observa-se, ainda, uma diferença muito pequena entre os valores de M1 e M3 e de M2 e M4, para cada modelo. Como M3 e M4 são as médias dos **módulos** do desvio relativo, isto mostra que houve poucos eventos com valores subestimados, e que, quando ocorreram, não foram valores excessivamente baixos.

Este resultado geral de superestimativas pode ser explicado pela tendência sistemática de superestimativa da MUSLE, quando utilizados, nas sub-bacias do Forquetinha, os valores sugeridos por

Figura 4.18 - Volume Total Escorado - Comparação dos Resultados

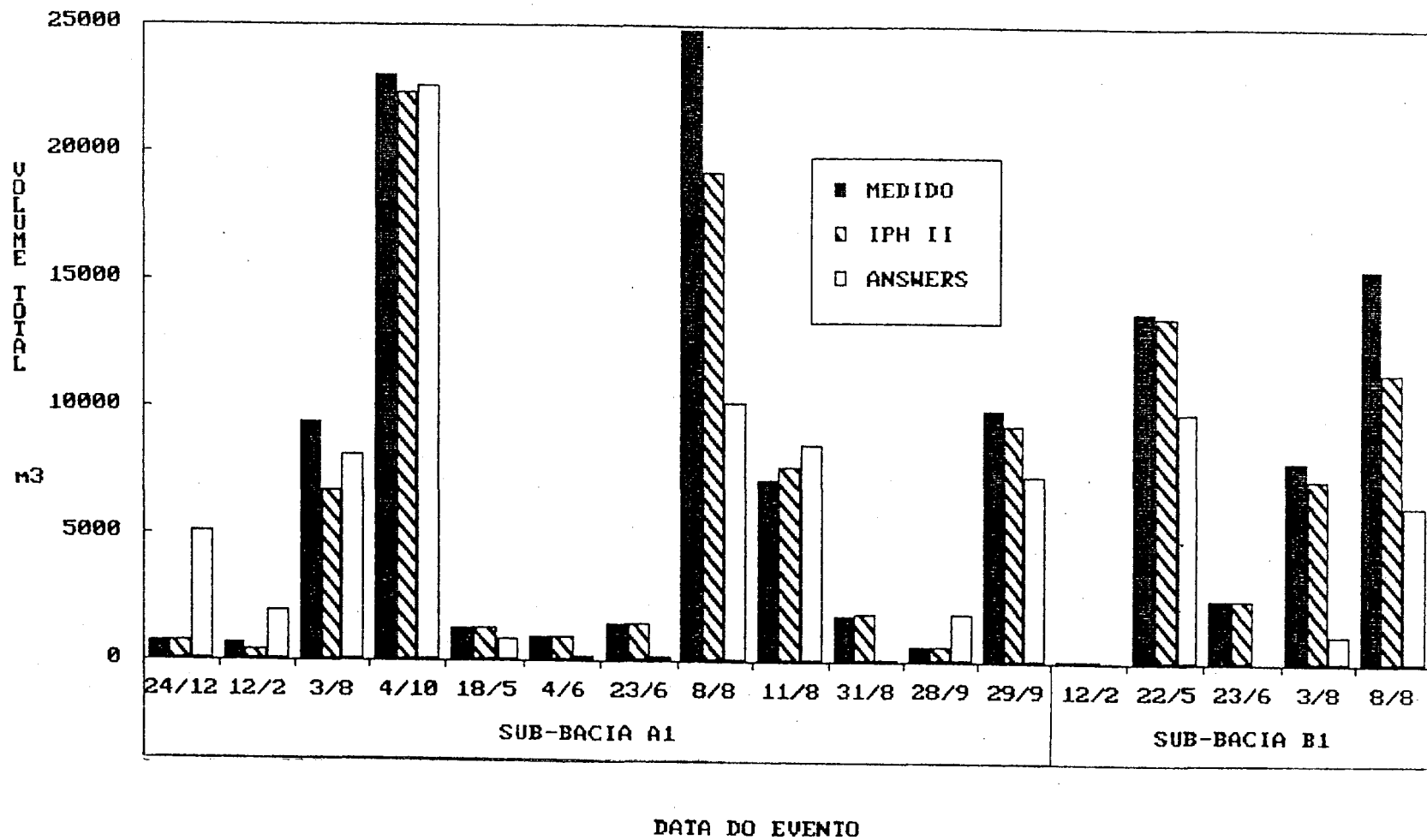


Figura 4.19 - Sub-bacia A1  
 Produção de Sedimentos - Comparação dos Resultados

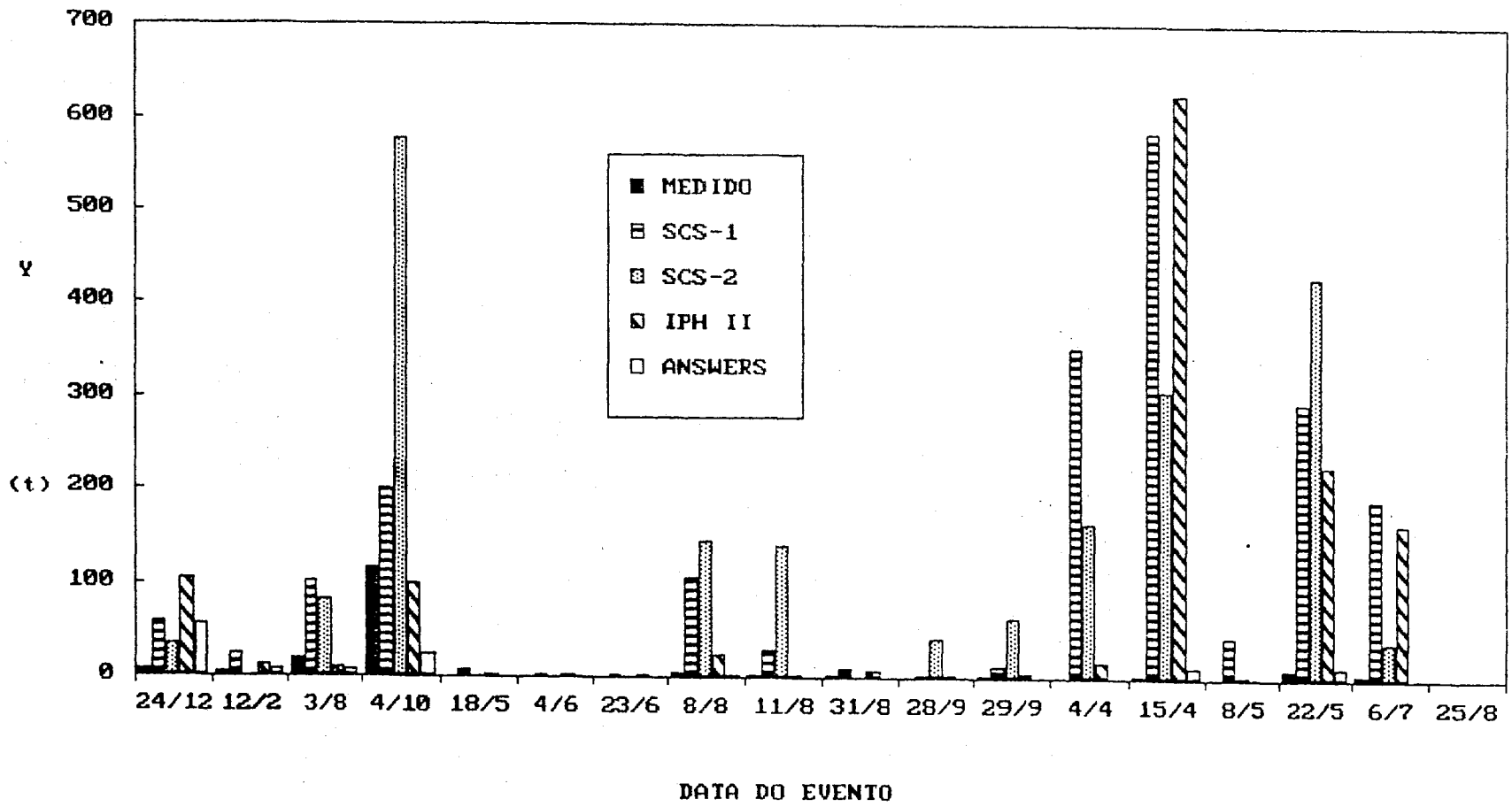
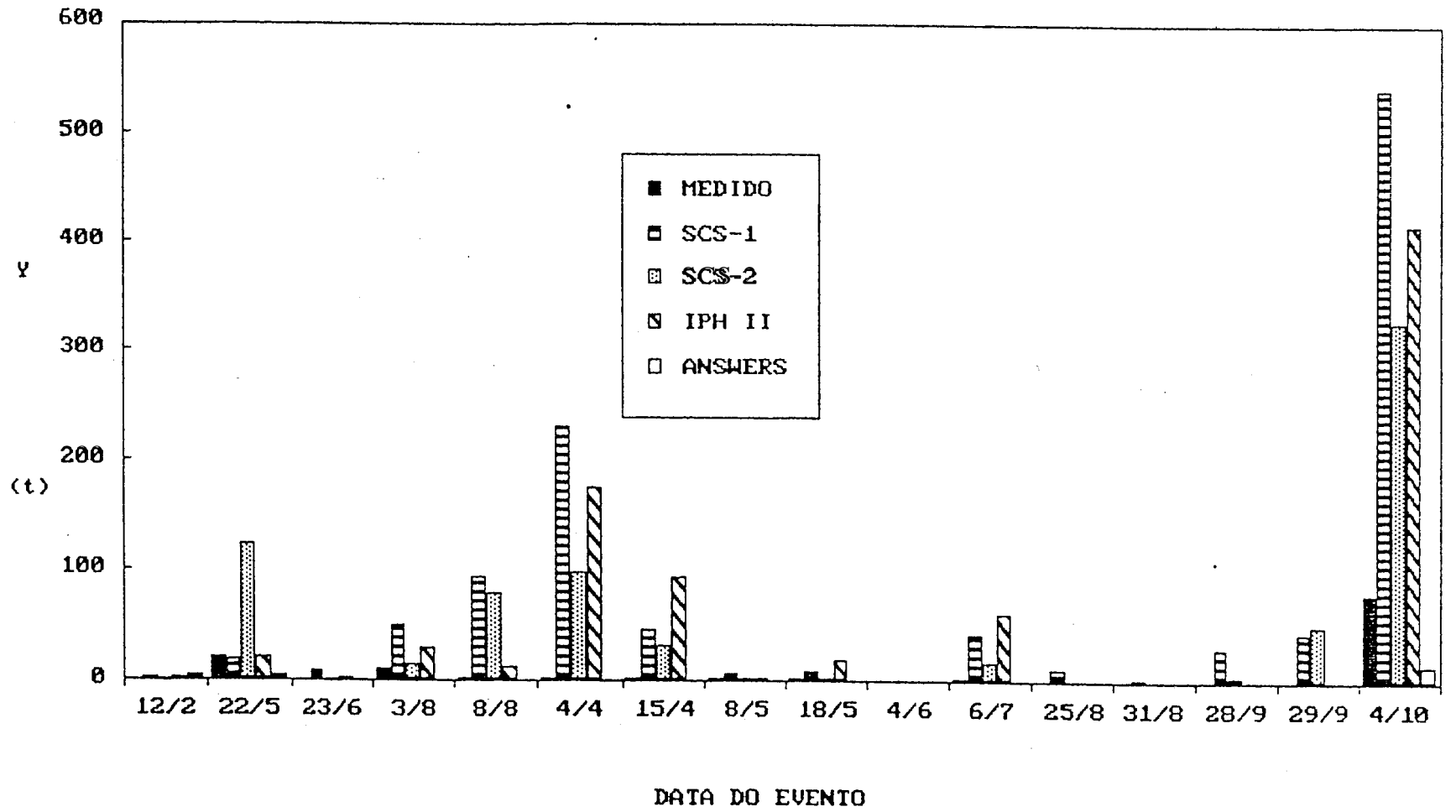


Figura 4.20 - Sub-bacia B1  
 Produção de Sedimentos - Comparação dos Resultados



Williams para os coeficientes a e b da equação 3.23, conforme já comentado no item 4.3.1, agravada, no caso do modelo SCS, pela tendência de superestimativa da vazão de pico.

Para o caso específico de utilização da metodologia do SCS, observa-se haver, nas duas hipóteses de cálculo, uma superestimativa sistemática do valor da vazão de pico. Este resultado pode ser explicado pelo fato da metodologia em questão ser dirigida para a situação de projeto, onde as superestimativas são, geralmente, a favor da segurança. Ao se utilizar este modelo para simulação, podem-se obter resultados ruins, o que certamente não invalida o modelo, mas apenas demonstra que, nestas condições, devem ser procuradas outras alternativas de modelagem.

Ainda quanto à metodologia do SCS, deve-se observar que os resultados obtidos com a hipótese de ajustar o valor de CN ao valor observado de perdas iniciais não foram superiores, no que se refere à produção de sedimentos, aos obtidos com a hipótese sugerida pelo SCS, de  $I_a=0,2.S_m$ , apresentando valores de desvios da mesma ordem de grandeza. Isto se deve ao empirismo do modelo, pois, embora houvesse um ajuste perfeito no volume escoado superficialmente, esta vantagem era anulada pela grande superestimativa no valor da vazão de pico. Além disto, é uma situação irreal na prática, pois o volume para prognóstico é desconhecido. Esta alternativa de cálculo apenas comprovou que o modelo não deve ser aplicado para simulação, já que é um modelo de projeto.

No caso da utilização do modelo IPH-II com os eventos ajustados esta tendência é menor ( $M_1=4$ ), mas ainda existe, ficando bem marcada para os eventos de previsão ( $M_2=32$ ). Isto significa que a aplicação do modelo IPH-II melhorou a estimativa dos valores de volume superficial e vazão de pico para os eventos em que foi possível ajustar as condições iniciais. Porém, ao se utilizarem valores médios nos eventos onde o ajuste não era possível, os resultados foram absolutamente imprevisíveis, o que fez com que não houvesse verificação dos valores ajustados. Isto se deve,

principalmente, à grande sensibilidade do modelo a determinados parâmetros, como é o caso de  $h$ , já comentado no item 4.3.1.

Portanto, em termos de simulação, o modelo IPH-II apresenta melhores resultados que o modelo SCS, o que reflete claramente os enfoques de modelagem de cada metodologia: simulação para o IPH-II e projeto para o SCS. Porém, na ausência de dados de campo que permitam um ajuste correto dos parâmetros do modelo IPH-II, a metodologia do SCS surge como uma opção no mínimo razoável. Ou seja, embora o SCS tenha sido desenvolvido como modelo de projeto, pode, em situações especiais, ser utilizado para simulação, com resultados da mesma ordem de grandeza dos de outros modelos.

O modelo ANSWERS foi o que, de uma maneira geral, apresentou os melhores resultados para a simulação dos eventos, mesmo com todos os seus parâmetros tendo sido determinados sem calibração, simplesmente a partir das características físicas do sistema. Os valores médios de desvio relativo variaram entre  $-0,1$  e  $1,4$ , apresentando ordem de grandeza inferior à do modelo IPH2SED. Para tanto, porém, exigiu um grande esforço no levantamento das características físicas das sub-bacias e na montagem dos arquivos de dados.

Na comparação entre o modelo conceitual ANSWERS e a equação empírica MUSLE, houve um ajuste muito melhor do primeiro. Seus resultados parecem mais confiáveis não só porque se aproximaram mais dos resultados medidos como também porque não apresentaram uma tendência marcada de sub ou superestimativas, como no caso da MUSLE. Porém, este resultado não significa claramente uma vantagem dos modelos conceituais sobre os empíricos. Na realidade, além da amostra ser muito pequena para se chegar a conclusões definitivas, deve-se, ainda, observar que a MUSLE se mostrou claramente inadequada para aplicação na bacia do rio Forquetinha. Outros modelos empíricos, como os desenvolvidos por Silveira (1982) especificamente para esta bacia, apresentaram resultados bem superiores. Este resultado, na verdade, significa apenas que o

modelo ANSWERS apresentou melhores resultados que a MUSLE para o caso específico das bacias em estudo. Nenhuma outra conclusão pode ser obtida, em vista dos motivos já expostos.

De uma maneira geral, uma grande vantagem da aplicação de modelos conceituais é a possibilidade de uma melhor interpretação do significado dos parâmetros, o que pode permitir uma estimativa direta de seus valores, baseado apenas em características físicas. Porém, na fase atual de conhecimento, não se tem ainda o domínio completo sobre as reais relações causais envolvidas nos fenômenos naturais. Assim, muitos processos prosseguem sendo simulados com utilização de técnicas empíricas, o que continua trazendo erros e incertezas aos resultados. Há necessidade de estudos para se obter um melhor conhecimento dos processos reais, para que se possa melhorar os modelos, procurando torná-los mais representativos dos fenômenos e, com isto, poder-se chegar a prognósticos mais confiáveis.

Na comparação dos resultados dos modelos ANSWERS e IPH-II, não há, no que se refere a volume de escoamento, um resultado nitidamente melhor de um ou outro modelo. O modelo IPH-II apresenta resultados melhores que o modelo ANSWERS para os eventos em que houve ajuste, mas não é confiável para os demais eventos. Quanto à produção de sedimentos, os erros do modelo IPH-II poderiam ser creditados à utilização da MUSLE, que provoca superestimativas. Não se pode, portanto, concluir sobre a vantagem da aplicação de um modelo distribuído ou concentrado com base apenas nestes resultados.

Ambos os enfoques permitem um exame sobre a mudança seletiva de práticas agrícolas e/ou conservacionistas. Porém, para tomada de decisão, não há uma confiabilidade maior de um modelo ou outro, pois ambos apresentam simplificações na representação do processo, de forma que não se pode afirmar com certeza que os resultados favoráveis se deram por uma boa representação dos fenômenos envolvidos. Os erros apresentados pelos dois tipos de modelos retratam esta dificuldade.



Os modelos concentrados têm a vantagem de permitir um uso mais rápido, com menor trabalho para determinação dos parâmetros de entrada, o que indicaria seu uso para uma análise prévia de uma situação. Os modelos distribuídos exigem uma melhor caracterização do meio físico, mas não trazem, necessariamente melhores resultados. As causas para isto podem estar no fato de que as hipóteses de funcionamento dos modelos distribuídos dentro da bacia não são verificadas, até mesmo por falta de dados. Assim, não se sabe se os resultados no exutório da bacia se devem realmente a uma representação mais exata dos processos envolvidos ou a uma sucessão de simplificações, onde um erro compensa outro. Enquanto não se obtiver um maior conhecimento sobre estes processos, estas respostas não poderão ser conhecidas.

## 5 - CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve por objetivo estudar a aplicabilidade de diferentes enfoques de modelagem, salientando a importância e a melhor forma de utilização de cada tipo de modelo. As impressões finais deste estudo são a seguir enumeradas.

A MUSLE se mostrou inadequada para previsão do aporte de sedimentos na bacia do rio Forquetinha, dentro de suas características originais de formulação e uso. Os resultados obtidos mostraram uma tendência sistemática de superestimativa, mesmo quando da utilização de volumes de escoamento e vazões de pico obtidas por medições de campo. Sua utilização, a menos que sejam feitas alterações em sua formulação ou no método de estimativa de seus parâmetros, deve ser efetuada com cautela, tendo consciência de seus erros e limitações.

O modelo do SCS superestima os valores de vazão de pico. Seus resultados não devem ser usados para simulação, mesmo porque ele foi formulado como modelo de projeto. Porém, na situação de carência de dados, pode ser uma alternativa viável, uma vez que apresenta resultados da mesma ordem de acerto que outros modelos mais complexos, exigindo uma pequena quantidade de dados de entrada.

O modelo IPH-II apresentou resultados muito bons quando houve dados suficientes para seu ajuste. Porém, na falta destes dados, as estimativas não são confiáveis. Faz-se necessário um estudo de um maior número de eventos para confirmar esta tendência ou para se conseguir um melhor ajuste dos parâmetros. O uso deste modelo para bacias com as características das utilizadas neste estudo deve ser efetuado com cautela, buscando evitar que os erros de previsão conduzam a conclusões inexatas ou errôneas. Já nos eventos com dados que permitam seu ajuste, o modelo parece poder ser utilizado com confiabilidade.

O modelo ANSWERS mostrou-se bastante promissor, obtendo-se

resultados com uma qualidade superior à dos demais modelos, mesmo sem efetuar ajuste de seus parâmetros. Embora o modelo exija uma grande quantidade de informação quanto às características físicas das bacias para montagem de seu arquivo de dados de entrada, parece ser uma opção aceitável para o prognóstico do aporte de sedimentos em pequenas bacias como as deste estudo. Para tanto, porém, é necessário que as hipóteses de funcionamento que o modelo adota para os processos no interior da bacia sejam verificadas a partir de resultados de estudos de campo, testando realmente a validade destes pressupostos.

A partir destas observações e de resultados de outros estudos semelhantes, são apresentadas algumas recomendações e sugestões para trabalhos subseqüentes.

Sugere-se a execução de um maior número de trabalhos de campo em pequenas bacias rurais, utilizando monitoração intensa e detalhada, com aparelhos que possibilitem uma alta resolução temporal na representação dos eventos. Com isto, torna-se possível uma representação mais fiel dos reais processos hidrossedimentológicos, melhorando a compreensão de seu funcionamento. Sugere-se, ainda, que os dados obtidos a partir destes estudos sejam sistematizados, tratados e armazenados a partir da utilização de programas de banco de dados do tipo HYDRON (Cochonneau, 1989), permitindo assim um manuseio mais fácil e confiável destas informações. Estudos deste tipo podem ser associados a modelos conceituais distribuídos, do tipo ANSWERS, permitindo a formulação e teste de diferentes hipóteses de funcionamento da bacia. Desta forma, pode-se aprimorar o conhecimento sobre os reais processos físicos envolvidos em uma bacia hidrográfica, quanto à produção e transporte de água e sedimentos.

A partir dos dados de campo obtidos, poder-se-ia procurar alterar a MUSLE, adaptando-a para utilização na região em estudo, ou até mesmo desenvolver novas equações empíricas mais adequadas para a

estimativa do aporte de sedimentos nas condições do estudo.

Sugere-se, também, a utilização e adaptação de técnicas de sensoriamento remoto e de manipulação de sistemas geográficos de informação para auxiliar na determinação das características físicas das bacias e na montagem dos arquivos de entrada de modelos, reduzindo-se consideravelmente um dos grandes problemas dos modelos distribuídos.

Especificamente quanto à análise de aplicabilidade dos modelos, sugere-se efetuar o exame relativo das alterações previstas por cada modelo devido a modificações nas práticas agrícolas e/ou de ocupação do solo. Este exame poderia ser efetuado a partir de dados de campo, que poderiam comprovar o melhor ou pior ajuste dos modelos, ou, na falta destas informações, a partir de dados sintéticos, que já ~~tomariam~~ possibilitariam uma comparação do comportamento dos modelos.

Finalmente, quanto às recomendações para a utilização dos modelos, a principal e óbvia sugestão é que sempre se procure utilizá-los nas condições para as quais eles foram previstos. Especificamente para o caso dos modelos estudados, recomenda-se o uso de modelos empíricos apenas nos casos de carência de dados de campo. Os modelos conceituais devem ser usados para simulação sempre que houver informação suficiente para estimativa de seus parâmetros, sendo que, no que se refere aos modelos distribuídos, há necessidade de confirmação das hipóteses de funcionamento dos processos dentro da bacia, e não apenas em seu exutório.

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAN, A.O. & EZEN, S.C. 1982. Mathematical Simulation of Erosion on Graded Terraces. In: EXETER SYMPOSIUM, 1982. Recent Development in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield. Paris, IAHS. p.221-8.
- ALMEIDA, L.E. 1980. Contribuição à Previsão da Capacidade de Transporte por Arraste em Canal a Fundo Fixo. Porto Alegre, UFRGS Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 107p. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- ALONSO, C. V. 1980. Selecting a Formula to Estimate Sediment Transport Capacity in Nonvegetated Channels. In: CREAMS; a Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. Tucson, U.S. Department of Agriculture. v.3, p.426-39.
- AMBROISE, B.; GOUNOT, M.; MERCIER, J. 1982. Réflexions sur la Modélisation Mathématique du Cycle Hydrologique a l'échelle d'un Bassin Versant. Recherches Géographiques à Strasbourg, Strasbourg, 19-20-21:5-24.
- BEASLEY, D.B.; HUGGINS, L.F.; MONKE, E.J. 1980. ANSWERS: A Model for Watershed Planning. Transactions of ASAE. 23(4):938-44.
- BEASLEY, D.B. & HUGGINS, L.F. 1981. ANSWERS; User's Manual. Chicago, U.S. Environmental Protection Agency. 54p.
- BERTHELOT, R. 1970. Curso de Hidrologia Sintética. Mestrado em Hidrologia Aplicada. IPH- UFRGS. Porto Alegre.
- BERTONI, J.C. 1989. Modelos de Previsão de Cheia em Tempo Atual com Base na Precipitação. Porto Alegre, UFRGS Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 200p. Diss. Mestr. Engenharia Civil.



- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. 1985. **Conservação do Solo**. Piracicaba, Livroceres. 368p.
- BEVEN, K.J. 1987. Vers une Nouvelle Conception de l'hydrologie. In: ROME SYMPOSIUM, 1987. **Water for the Future: Hydrology in Perspective**. Wallingford, IAHS. p.1-11
- BEVEN, K.J. 1988. Interflow. In: SÉMINAIRE NATO SUR LES ÉCOULEMENTS DANS LA ZONE NON SATURÉE. Arles. 25p.
- BEVEN, K.J. 1989. Changing Ideas in Hydrology- the Case of Physically-Based Models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, 105:157-72
- BORDAS, M.P. 1973. Contributions Récents à l'Analyse Quantitative du Transporte Solide, Raporte Générale. In: ASSOCIATION INTERNATIONALE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES, 15. Istambul, 1973. **Recherche et Developpement dans l'Hidrosphere**. Istambul. v.6, p.175-88.
- BORDAS, M.P., coord. 1981. **Uso e Conservação dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul**, segunda etapa; Relatório Final. Porto Alegre, UFRGS / IPH / FINEP. 5v.
- BORGES, A.L. 1987. **Determinação da Capacidade Máxima de Transporte por Arraste de um Escoamento sobre Fundo Móvel**. Porto Alegre, UFRGS Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 166p. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- BORGES, A.L. & BORDAS, M.P. 1988. Choix de Bassins Représentatifs et Experiments pour l'étude de l'érosion sur le Plateau Basaltique Sudaméricain. In: PORTO ALEGRE SYMPOSIUM, 1988. **Sediment Budgets**. Wallingford, IAHS. p.161-9.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica. 1973. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio**

- CANALI, G.E. 1981. **Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas Rurais; Efeitos das Características das Chuvas, da Declividade das Vertentes e do Uso do Solo.** Porto Alegre, UFRGS Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. n.p. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- CANEDO, P.M. 1989. **Hidrologia Superficial.** In: ENGENHARIA Hidrológica. Rio de Janeiro: ABRH; Editora da UFRJ. Capítulo 4, p.201-89.
- CHAVES, H.M.L. 1991. **Análise de Sensitividade dos Parâmetros da Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE).** Curitiba: Departamento de Solos/UFPR. 17f.
- CHAVES, H.M.L. & NEARING, M. 1990. **Prediction Uncertainty as Affected by Input Error: The Case of the WEPP Model.** (s.l.:s.n.) 40f. Trabalho apresentado no 8<sup>o</sup> Congresso Brasileiro e Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo, Londrina, 1990.
- CHEVALLIER, P. 1988. **Complexité Hydrologique du Petit Bassin Versant; Exemple en Savane Humide Booro-Borotu (Côte d'Ivoire).** Montpellier, Université des Sciences et Technique du Languedoc. 331p. Tese (Doctorat Mécanique, Génie Civil, Génie Mécanique).
- CLARKE, R.T. 1973. **Mathematical Models in Hydrology.** Irrigation and Drainage Paper No 19. FAO
- COCHONNEAU, G. 1989. **HYDROM. Logiciel de Banque de Données Hydrométriques; Manuel de l'Utilisateur.** ORSTOM, n.p.
- COSTA, A.F. 1974. **Contribuição à Previsão de Depósito de Sedimentos em Canal a Fundo Fixo.** Porto Alegre, UFRGS Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 103p. Diss. Mestr. Engenharia Civil.

- COUTINHO, M.M.J.A. 1979. Propagação de Água e Sedimento em Pequenas Bacias; Relatório Final. s.l., s.e. 157f.
- CRAWFORD, N.H. & LINSLEY, R.K. 1966. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Stanford, Department of Civil Engineering. 210p.
- DOOGE, J. 1973. Linear Theory of Hydrologic Systems. Washington, United States Department of Agriculture. 327p.
- DUNNE, T. 1983. Relation of Field-Studies and Modeling in the Prediction of Storm Runoff. Journal of Hydrology, Amsterdam, 65:25-48.
- ESTADOS UNIDOS. Soil Conservation Service. 1984. User's Guide for the CREAMS Computer Model. Washington, U.S. Department of Agriculture. 150p. (Technical Release,72).
- FLEMING, G. 1968. The Stanford Sediment Model I: Translation. Bulletin. International Association of Scientific Hydrology, Oxford, 13(2):108-25, June.
- FLEMING, G. 1975. Sediment Erosion-Transport-Deposition Simulation: State of the Art. In: SEDIMENT YIELD WORKSHOP, 1972. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. s.l., U.S. Department of Agriculture. p.274-85.
- FOSTER, G.R. 1976. Sedimentation, General. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON URBAN HYDROLOGY, HYDRAULICS AND SEDIMENT CONTROL, University of Kentucky. Proceedings. Lexington, p.129-138.
- 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, ASAE. Chap.8, p.297-380.



- FOSTER, G.R. & MEYER, L.D. 1972. Transport of Soil Particles by Shallow Flow. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, 15(1):99-102.
- FOSTER, G.R.; LANE, L.J.; NOWLIN, J.D.; LAFLEN, M.H.; YOUNG, R.A. 1980. A Model to Estimate Sediment from Field-Sized Areas. In: *CREAMS; a Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*. Tucson, U.S. Department of Agriculture. v.1, p.35-64.
- GALVÃO, C.D. 1990. *Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão do Solo em Microbacias*. Campina Grande, UFPB. 185 p. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- GARCIA, A. 1983. *Contribuição à Previsão da Capacidade de Transporte por Arraste em Canal a Fundo Fixo e Móvel*. Porto Alegre, UFRGS Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 191p. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- GOVINDARAJU, R.S.; JONES, S.E.; KAVVAS, M.L. 1988a. On the Diffusion Wave Model for Overland Flow 1, Solution for Steep Slopes. *Water Resources Research*, Washington, 24(5):734-44, May.
- GOVINDARAJU, R.S.; JONES, S.E.; KAVVAS M.L. 1988b. On the Diffusion Wave Model for Overland Flow 2, Steady State Analysis. *Water Resources Research*, Washington, 24(5):745-54, May.
- GRAF, W.H. 1971. *Hydraulics of Sediment Transport*. New York, McGraw-Hill. 513p.
- HADLEY, R.F. et alii. 1985. *Recent Developments in Erosion and Sediment Yield Studies*. Paris, UNESCO. 127 p.
- HEC. 1974. *Training Course on Urban Hydrology*. U.S.Army. Hydrology Engineering Center, May.

- HERAS, R. (Ed) 1972. **Manual de Hidrología**. Madrid: Instituto de Hidrología. v.1.
- HERBERTSON, J.G. 1969. A Critical Review of Conventional Bed Load Formulae. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, 8(1): 1-25.
- HOESEIN, A.A.; PILGRIM, D.H.; TITMARSH, G.W.; CORDERY, I. 1989. Assessment of the U.S. Conservation Service Method for Estimating Design Floods. In: BALTIMORE SYMPOSIUM, 1989. **New Directions for Surface Water Modeling**. Wallingford: IAHS 444p. p.283-91.
- HOLTAN, H.N. 1961. A Concept for Infiltration Estimates in Watershed Engineering. ARS-41-51. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture. 25p.
- HRISSANTOU, V. 1986. Mathematical Model for the Computation of Sediment Yield from a Basin. In: ALBUQUERQUE SYMPOSIUM, 1986. **Drainage Basin Sediment Delivery**. Wallingford, IAHS. p.393-401.
- HUSSEIN, M.H. 1982. Erosion and Sediment Yield Prediction on Farm Fields. West Lafayette, Purdue University. 276f. Tese (Ph.D.).
- KAUARK LEITE, L.A. 1986. **Contribution de la Modélisation à l'Étude des Pollutions Diffuses d'Origine Agricole: étude Comparative des Principaux Modeles Evaluant l'Impact de ces Pollutions sur les Eaux Superficielles Continentales**. Paris, Universit Paris - Val de Marne. n.p. Diplôme d'études Approfondies de Techniques et Gestion de l'Environnement.
- KAUARK LEITE, L.A. 1990. **Réflexions sur l'Utilité des Modeles Mathématiques dans la Gestion de la Pollution Diffuse d'Origine Agricole**. Paris, ENPC. 451p. Tese (PhD).
- KAUARK LEITE, L.A. & MOUCHEL, J.M. 1990. **Contribuição à Modelagem da Poluição Difusa de Origem Agrícola: Transporte de Sólidos em Suspensão e de Nitrogênio em Pequenas Bacias Hidrográficas**.

Revista Brasileira de Engenharia, Rio de Janeiro, 8(1):5-19, Dez.

- KLEMES, V. 1986. Dilettantism in Hydrology: Transition or Destiny? *Water Resources Research*, Washington, 22(9):1775-1885, Aug.
- KLEMES, V. 1988. A hydrological Perspective *Journal of Hydrology*, Amsterdam, 100:3-28.
- KNISEL, W.G. & NICKS, A.D. 1980. Introduction. In: CREAMS; a Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. Tucson, U.S. Department of Agriculture. v.1, p.1-12.
- LANE, L.J. & FERREIRA, V.A. 1980. Sensitivity Analysis. In: CREAMS; a Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. Tucson, U.S. Department of Agriculture. V.1, p.113-58.
- LEPRUN, J.C. 1987. LEVANTAMENTO Pedológico das Minibacias do Rio Forquetinha. Porto Alegre: IPH/UFRGS, CNPq/DRSTDM. 6f
- LI, R.M. 1974. **Mathematical Modeling of Response from Small Watershed**. Fort Collins Colorado State University. 212f. Tese (Ph.D.).
- LDAGUE, K.M. & FREEZE, R.A. 1985. A Comparison of Rainfall-Runoff Modeling Techniques on Small Upland Catchments. *Water Resources Research*, Washington, 10(2):229-48, Feb.
- MARSALEK, J. 1989. Modelling Agricultural Runoff: Overview. In: BALTIMORE SYMPOSIUM, 1989. **Sediment and the Environment**. Wallingford, IAHS. p.201-9.
- MEDEIROS, P. 1986. **Efeito de Rugosidade de Fundo sobre a formação de Depósitos em Canal de Fundo Fixo Rugoso**. Porto Alegre, UFRGS Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 138p.

- MEYER, L.D. 1971. Soil Erosion by Water on Upland Areas. In: SHEN, H.W., ed. **River Mechanics**. Fort Collins. v.2, chap.27.
- MEYER, L.D. & WISCHMEIER, W.H. 1969. Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, 12(6):754-8,762.
- MIRANDA, J.C. 1983. Modelos Racionais de Escoamento Superficial BRASILEIRO SOBRE SIMULAÇÃO E MODELAÇÃO EM HIDRÁULICA, Blumenau, 1983. **Anais**. Florianópolis, ABRH. V.2, p.123-52.
- MOORE, R.J. 1984. A Dynamic Model of Basin Sediment Yield. **Water Resources Research**, Washington, 20(1):89-104, Jan.
- MULTSED; User's Manual. Fort Collins. n.p.
- NAKATO, T. 1990. Tests of Selected Sediment-Transport Formulas. **Journal of Hydraulic Engineering**. ASCE, New York, 116(3):362-79, Mar.
- NEIBLING, W.H. & FOSTER, G.R. 1980. Sediment Transport Capacity of Overland Flow. In: **CREAMS; a Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems**. Tucson, U.S. Department of Agriculture. v.3, p.463-73.
- ONSTAD, C.A. & FOSTER, G.R. 1975. Erosion Modeling on a Watershed **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, 20(6):1100-4.
- OVERTON, D.E. 1965. **Mathematical Refinement of an Infiltration Equation for Watershed Engineering**. AR-41-99. Agriculture Research Service, U.S. Department of Agriculture. 11p.
- PEDROLI R., 1963. **Transporto di Materiale Solido in Canali a Fondo Fisso e Liscio**. Zurigo, Scuola Politecnica Federale. Tesi di

Dottore in Scienze Technique. 178p.

PILGRIM, D.H. 1989. Regional Methods for Estimation of Design Floods for Small to Medium Sized Drainage Basins in Australia. In: BALTIMORE SYMPOSIUM, 1989. **New Directions for Surface Water Modeling**. Wallingford: IAHS. 444p. p.247-60.

RENFRD, G.W. 1975. Use of Erosion Equations and Sediment-Delivery Ratios for Predicting Sediment Yield. In: SEDIMENT YIELD WORKSHOP, 1972. **Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources**. s.l., U.S. Department of Agriculture. p.33-45.

SANCHEZ, J.E. 1987. **Fundamentos de Hidrologia**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 355f.

SAXTON, K.E. & McGUINNESS, J.L. 1982. Evapotranspiration. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L., ed. **Hydrologic Modeling of Small Watersheds**. St. Joseph, ASAE. Chap.6, p.227-273.

SHEN, H.W. 1971. Wash Load and Bed Load. In: -----, **River Mechanics**. Fort Collins. v.1, chap.11.

SCHULZE, R.E. & GEORGE, W.J. 1989. **ACRU User Manual**. Natal, South Africa, Agricultural Catchments Research Unit. n.p.

SEMMELMANN, F.R; BORDAS, M.; CANALI, G.E.; CRUZ, F.D. 1978. Proteção Contra Sedimentos nas Bacias Meridionais do Derrame Basáltico Sul-americano; Pesquisa C. In: BORDAS, M.C., Coord. **Pesquisas Aplicadas Sobre Uso e Conservação dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul**. Relatório Final. Porto Alegre, IPH-UFRGS. v.5.

SILVEIRA, G.L. 1982. **Erosão de Solo na Região da Encosta do Planalto no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, UFRGS -

Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 151f.  
Diss. Mestr. Engenharia Civil.

SILVEIRA, R.; TUCCI, C.; D'AMICO, J. 1983. **Definição das Curvas de Calibração dos Postos Fluviométricos do Rio Forquetinha - RS**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. n.p.

SILVESTRINI, J.H. 1991. **Relações entre a Capacidade de Transporte por Arraste e o Depósito de Sedimentos num Canal de Fundo Fixo Rugoso**. Porto Alegre, UFRGS Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 99p. Diss. Mestr. Engenharia Civil.

TASK COMMITTEE ON PREPARATION OF SEDIMENTATION MANUAL. COMMITTEE ON SEDIMENTATION. 1965. **Sediment Transportation Mechanics: Nature of Sedimentation Problems**. Journal of the Hydraulics Division. ASCE, New York, 91(2):251-66, Mar.

TOMASELLA, J. 1990. **Aplicação do Modelo de Horton Modificado a um Ensaio de Infiltração com Chuva Intermitente**. Porto Alegre: IPH-UFRGS. 36p. Trabalho apresentado para a disciplina de Hidrologia Determinística.

TUCCI, C.E.M. 1979. **Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do Algoritmo de Infiltração de Horton-Berthelot**. IPH-UFRGS

TUCCI, C.E.M. 1984. **Modelos Matemáticos em Hidrologia e Hidráulica**. Rio de Janeiro, RBE. 3v.

TUCCI, C.E.M.; SANCHEZ, J.; SIMÕES LOPES, M. 1983. **Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH-II**. Recursos Hídricos Publicação 3. Publicação aperiódica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas. IPH-UFRGS.

USDA - WATER EROSION PREDICTION PROJECT. 1987. **User Requirements**. West Lafayette. 44p.

- USDA - WATER EROSION PREDICTION PROJECT. 1989. Hillslope Profile Version. NSERL report No.2. West Lafayette. np.
- USDI - BUREAU OF RECLAMATION. 1977. Design of Small Dams. 2 ed. Washington, U.S.Govt. Print Off. 816p.
- WILLIAMS, J.R. 1975a. Sediment Yield Prediction With Universal Equation Using Runoff Energy Factor. In: SEDIMENT YIELD WORKSHOP, 1972. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. s.l., U.S. Department of Agriculture. p.244-52.
- WILLIAMS, J.R. 1975b. Sediment Routing for Agricultural Watersheds. Water Resources Bulletin, Minneapolis, 11(5):965-74, Oct.
- WILLIAMS, J.R. & BERNDT, H.D. 1972. Sediment Yield Computed With Universal Equation. Journal of the Hydraulics Division. ASCE, New York, 98(12):2087-98, Dec.
- WILLIAMS, J.R. & BERNDT, H.D. 1977. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, 20(6):1100-4.
- WILSON, B.N.; BARFIELD, B.J.; MOORE, I.D. s.d. A Hydrology and Sedimentology Watershed Model; Part I: Modeling Techniques. Lexington, Department of Agricultural Engineering. n.p.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses; a Guide to Conservation Planning. Washington, U.S. Department of Agriculture. 62p. (Agriculture Handbook,537).
- YALIN, Y.S. 1963. An expression for Bed-load Transportation. Journal of Hydraulics Division. ASCE, New York, 89(HY3):221-50.

**ANEXOS**



**ANEXO A - Tabelas para Estimativa dos Parâmetros  
dos Modelos Utilizados**

Tabela A1-Valor de CN na condição II de Chuva Antecedente e Ia=0.25  
(Sanchez, 1987)

Uso do Solo	Prática de Manejo	Condição Hidrica	Tipo de Solo			
			A	B	C	D
Terra inculta	fileira		77	86	91	94
Cult. em fileira	reta	pobre	72	81	88	91
	reta	boa	67	78	85	89
	curv. nivel	pobre	70	79	84	88
	curv. nivel	boa	65	75	82	86
	terraco	pobre	66	74	80	82
	terraco	boa	62	71	78	81
Graos pequenos	fil. reta	pobre	65	76	84	88
	fil. reta	boa	63	75	83	87
	curv. nivel	pobre	63	74	82	85
	curv. nivel	boa	61	73	81	84
	terraco	pobre	61	72	79	82
	terraco	boa	59	70	78	81
Legumes ou pastagem em rotação	fil. reta	pobre	66	77	85	89
	fil. reta	boa	58	72	81	85
	curv. nivel	pobre	64	75	83	85
	curv. nivel	boa	55	69	78	83
	terraco	pobre	63	73	80	83
	terraco	boa	51	67	76	80
Campos de pastagem		pobre	68	79	86	89
		razoavel	49	69	79	84
		boa	39	61	74	80
	curv. nivel	pobre	47	67	81	88
	curv. nivel	razoavel	25	59	75	83
	curv. nivel	boa	6	35	70	79
Pastagem permanente		boa	30	58	71	78
Florestas (parcelas)		pobre	45	66	77	83
		razoavel	36	60	73	79
		boa	25	55	70	77

SOLO TIPO A: Mínimo potencial de escoamento: inclui areias profundas com muito pouco silte e argila; solos muito permeáveis (arenosos);

SOLO TIPO B: Potencial de escoamento moderadamente baixo: solos arenosos e francos, menos profundos e menos consolidados que em A;

SOLO TIPO C: Potencial de escoamento moderadamente alto: Solos rasos e solos com apreciável quantidade de argila e colóides;

SOLO TIPO D: Máximo potencial de escoamento: solos com alto teor de argilas expansivas; inclui também solos pouco profundos com subsolo impermeável.

Tabela A2 - Fator de Correção de CN para Condições I e III  
(Sanchez, 1987)

Valor de CN para a Condição II	Fator de conversão de CN da Condição II para Condição I	Fator de conversão de CN da Condição II para Condição III
10	0.40	2.22
20	0.45	1.85
30	0.50	1.67
40	0.55	1.50
50	0.62	1.40
60	0.67	1.30
70	0.73	1.21
80	0.79	1.14
90	0.87	1.07
100	1.00	1.00

Tabela A3 - Condição de Umidade Antecedente (Sanchez, 1987)

Prec. nos 5 dias previos	Período de Dormencia	Período de Crescimento	Condição
< 13 mm	< 36 mm		I
13 a 28 mm	36 a 53 mm		II
> 28 mm	> 53 mm		III

Tabela A4 - Estimativa do Valor de C (Bertoni e Lombardi Neto, 1985)

Cobertura, seqüência e manejo	Produtividade	Razão de perdas de solo por período de estágio de cultura				
		D	1	2	3	4
Milho, contínuo, palha queimada	Média	37	30	21	6	1
Milho, contínuo, palha enterrada	Média	23	19	17	4	2
Milho contínuo, palha superfície	Média	-	5	2	1	1
Algodão, contínuo, convencional	Média	40	60	40	50	20
Soja, contínuo, convencional	Média	35	30	20	20	5
Pasto (1º ano) rotação	-	-	-	40	-	-
Pasto (2º ano), rotação	-	-	-	0,4	-	-
Milho, rotação após pasto	Média	10	11	8	4	1
Milho, rotação, plantio direto após pasto	Média	-	8	5	3	1
Soja, rotação após milho	Média	15	12	20	4	3
Soja, rotação plantio direto após milho	Média	-	8	10	4	3
Algodão, rotação após soja	Média	20	20	30	15	13
Cana-de-açúcar (1º ano) convencional	Média	-	-	15	-	-
Cana-de-açúcar (2º ano)	Média	-	-	0,15	-	-

(\*) Dados preliminares da Seção de Conservação do Solo do Instituto Agronômico de São Paulo.

período D - preparo do solo: desse preparo ao plantio;

período 1 - plantio: do plantio a um mês após o plantio;

período 2 - estabelecimento: do fim do período 1 até dois meses após o plantio;

período 3 - crescimento e maturação: de dois meses após o plantio até a colheita;

período 4 - resíduo: da colheita até o preparo do solo.

Tabela A5 - Propriedades Físicas do Solo (Beasley &amp; Huggins, 1981)

Textura do Solo	TP Porosidade Total (%)	FP Capacidade de Campo (%)	WP Ponto de Murcha (%)	p Expoente da Equação de Infiltr
Arenoso	32 - 42	31 - 47	10 - 24	.75 - .80
Limo-Arenoso	40 - 47	38 - 57	15 - 26	.65 - .75
Limoso	43 - 49	59 - 74	26 - 34	.60 - .70
Argilo-Limoso	47 - 51	66 - 82	32 - 40	.55 - .65
Silto-Argiloso	49 - 53	72 - 86	34 - 42	.50 - .60
Argiloso	51 - 55	76 - 89	37 - 43	.35 - .50

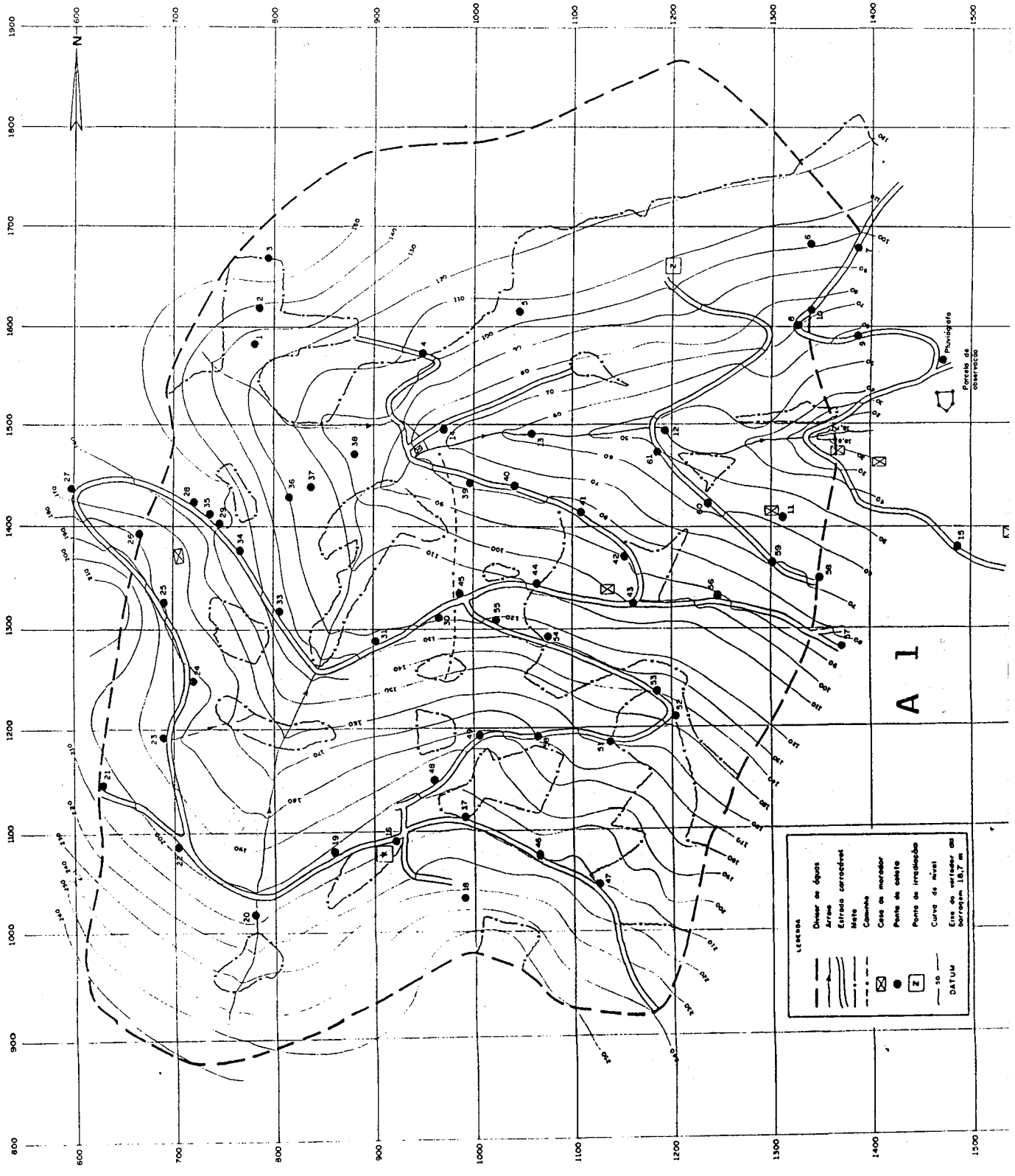
Tabela A6 - Intercepção Potencial Máxima (Beasley &amp; Huggins, 1981)

Cobertura Vegetal	PIT (mm)
Aveia	.5 - 1.0
Milho	.3 - 1.3
Gramma	.5 - 1.0
Pastagens	.3 - .5
Trigo, Centeio e Cevada	.3 - 1.0
Feijao, Batata e Couve	.5 - 1.5
Mata	1.0 - 2.5

Tabela A7 - Coeficientes HU e RC (Beasley & Huggins, 1981)

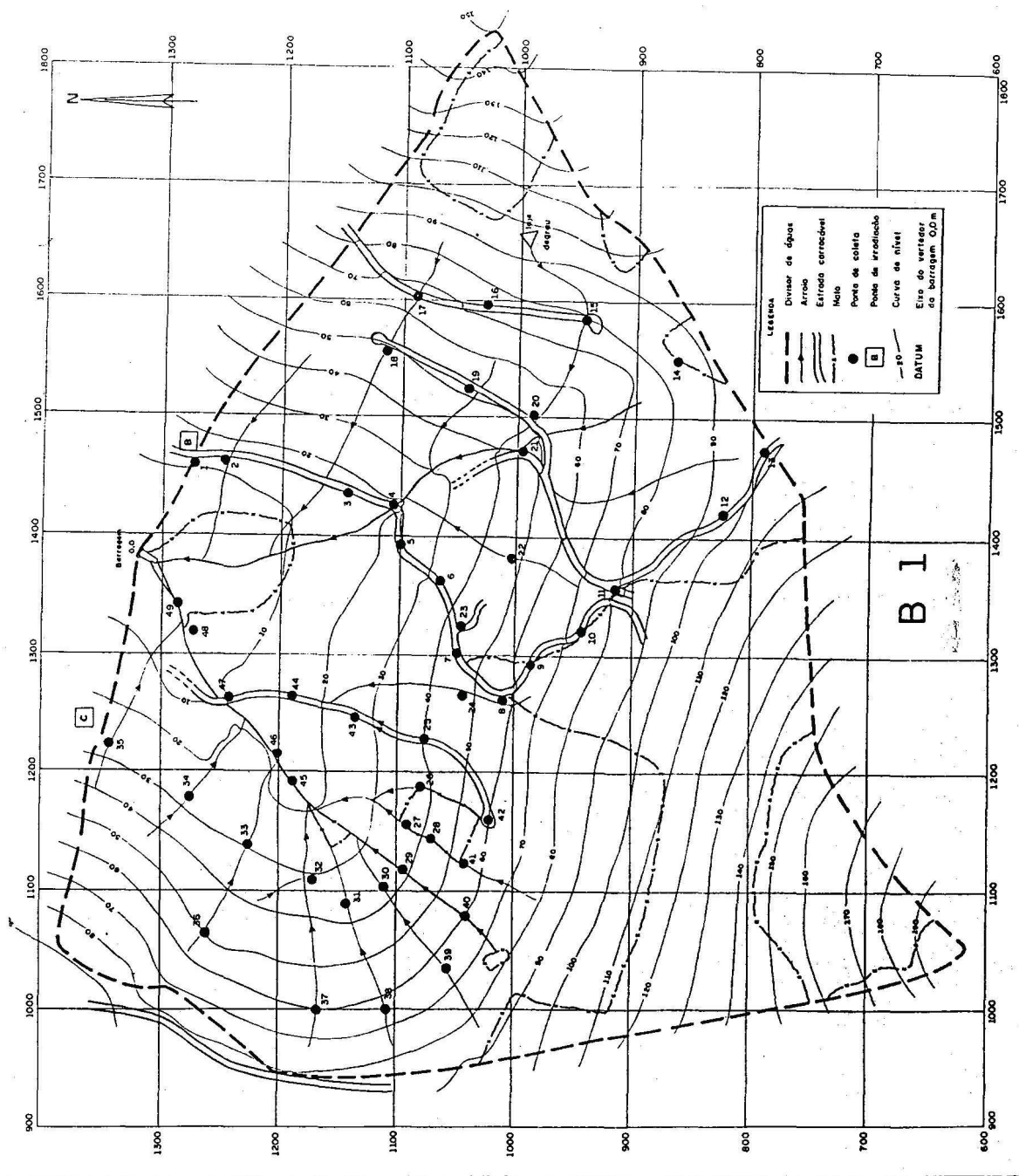
Condição do Solo	HU	RC
	(mm)	
Terra Arada:		
Primavera:liso	100	0.5
Primavera:normal	130	0.4
Primavera:rugoso	130	0.5
Outono:liso	60	0.3
Outono:normal	70	0.3
Outono:rugoso	130	0.4
Disco e Grade:		
Liso	30	0.4
Rugoso	60	0.4
Residuo de milho:	110	0.5

**ANEXO B - Topografia, Solos e Cobertura Vegetal  
das Sub-bacias Selecionadas**

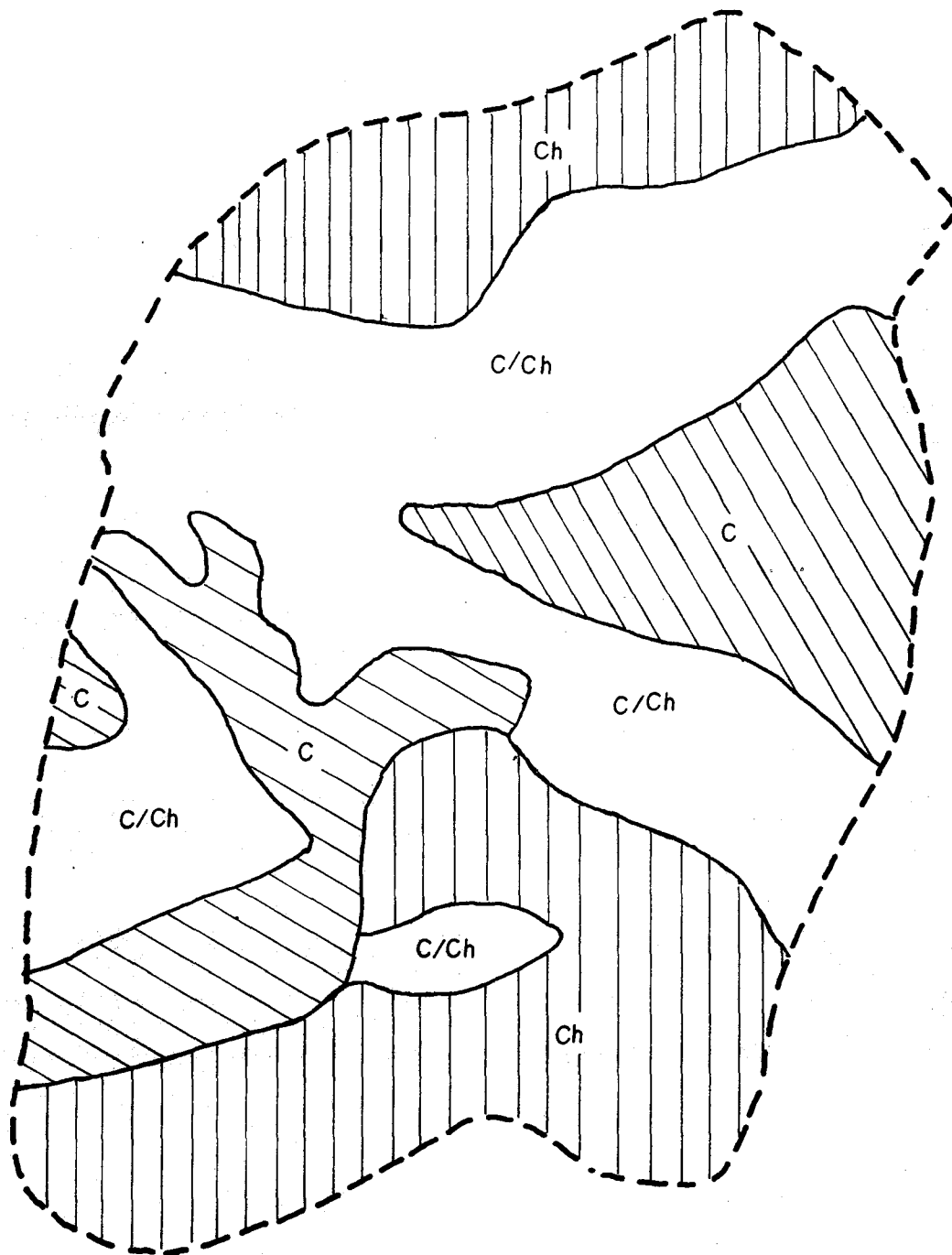


**Figura B1 - Bacia A1 - Topografia e Cobertura Vegetal (Leprun, 1987)**

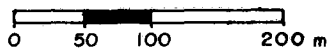




**Figura B2 - Bacia B1 - Topografia e Cobertura Vegetal (Leprun, 1987)**



Escala Gráfica



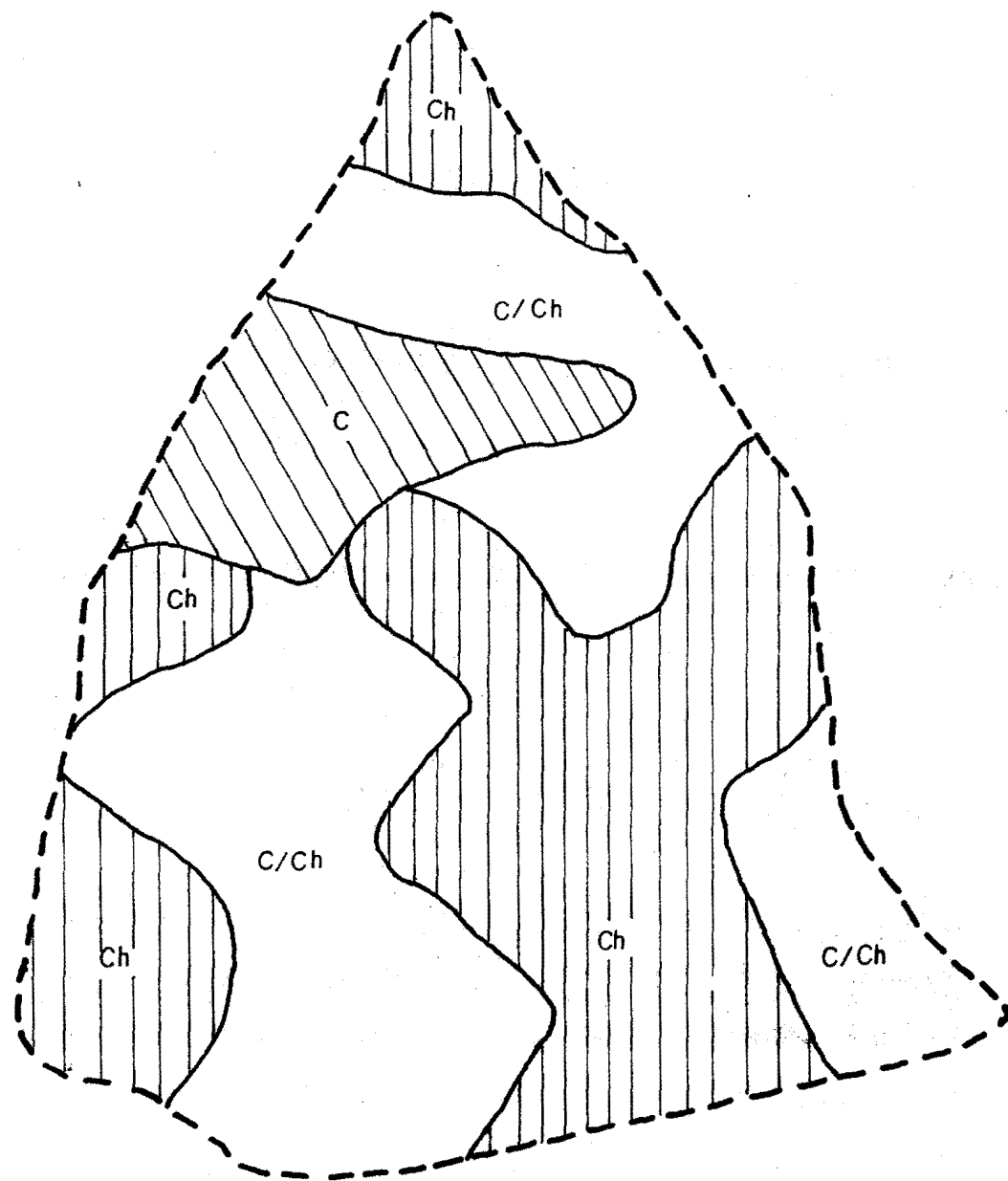
**LEGENDA**

C \_ Solo Ciríaco

Ch \_ Solo Charrua

C/Ch \_ Associação Ciríaco-Charrua

**Figura B3 - Bacia A1 - Pedologia (Leprun, 1987)**



Escala Gráfica



LEGENDA

C - Solo Ciríaco

Ch - Solo Charrua

C/Ch - Associação Ciríaco - Charrua

Figura B4 - Bacia B1 - Pedologia (Leprun, 1987)

**ANEXO C - Cálculo dos Parâmetros  
K, C, LS, CN e ASM**

## Cálculo do Parâmetro K - Fator de Erodibilidade do Solo

Wischmeier e Smith (1978):

$$K = [ 2,1 M^{1,14} 10^{-4} (12-ka) + 3,25 (kb-2) + 2,5 (kc-3) ] . 1,313/100$$

onde: M = (% de Silte + Areia Muito Fina)/(100 - % de Argila);

ka = % de matéria orgânica;

kb = coeficiente relativo à estrutura do solo;

kc = classe de permeabilidade.

As percentagens de argila, silte, areia, e matéria orgânica foram estimadas a partir do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Rio Grande do Sul (Brasil, 1973).

Solo Ciríaco:  $M = (42,5) . (100-25)$

$$ka = 4 \%$$

$$kb = 1$$

$$kc = 2$$

$$K = 0,142 \text{ (t.ha.h)/(MJ.ha.cm)}$$

Solo Charrua:  $M = (52,5) . (100-15)$

$$ka = 2 \%$$

$$kb = 1$$

$$kc = 2$$

$$K = 0,324 \text{ (t.ha.h)/(MJ.ha.cm)}$$

Associação Ciríaco-Charrua:

$$K = (0,142+0,324)/2 = 0,232 \text{ (t.ha.h)/(MJ.ha.cm)}$$

Sub-bacia A1:

24,6 % Ciríaco

33,7 % Charrua

41,7 % Associação Ciríaco-Charrua

$$K = (24,6 . 0,142 + 33,7 . 0,324 + 41,7 . 0,233) / 100 = 0,232 \text{ (t.ha.h)/(MJ.ha.cm)}$$

Sub-bacia B1:

10,3 % Ciríaco

44,0 % Charrua

45,7 % Associação Ciríaco-Charrua

$$K = (10,3 . 0,142 + 44,0 . 0,324 + 45,7 . 0,233) / 100 = 0,264 \text{ (t.ha.h)/(MJ.ha.cm)}$$

## Cálculo do Parâmetro C - Fator de Cultivo e Manejo

Sub-bacia A1:

- 20 % Mato
- 40 % milho, rotação
- 40 % soja, rotação

Sub-bacia B1:

- 15 % Mato
- 42,5 % milho, rotação
- 42,5 % soja, rotação

C Mato = 0,009 (Wischmeier e Smith, 1978)

DATA	OPERACAO	C MILHO	C SOJA	C BACIA A1	C BACIA B1
16/10 a 15/11	Preparo do Solo	0.10	0.15	0.102	0.108
16/11 a 15/12	Plantio	0.11	0.12	0.094	0.099
16/12 a 15/01	Estabelec	0.08	0.20	0.114	0.120
16/01 a 15/04	Crescim	0.04	0.04	0.034	0.035
16/04 a 15/10	Residuo	0.01	0.03	0.017	0.018

## Cálculo do Parâmetro LS - Fator Topográfico

Wischmeier e Smith, 1978:

$$LS = (L/22,1)^{0,5} (0,065 + 0,0454 S + 0,0065 S^2)$$

$$L = \left[ P/4 - \sqrt{(P/4)^2 - A} \right]^{0,5}$$

S = Declividade (Quadro 4.2)

Sub-bacia A1:

$$A = 0,55 \text{ km}^2$$

$$P = 3,00 \text{ km}$$

$$L = 320 \text{ m}$$

$$S = 32,5 \%$$

$$\rightarrow LS = 32$$

Sub-bacia B1:

A sub-bacia B1 foi dividida em duas sub-bacias para o cálculo do comprimento de rampa, L:

Sub-bacia B1a:

$$A = 0,197 \text{ km}^2$$

$$P = 1,970 \text{ km}$$

$$L = 140 \text{ m}$$

Sub-bacia B1b:

$$A = 0,196 \text{ km}^2$$

$$P = 2,010 \text{ km}$$

$$L = 132 \text{ m}$$

$$L = (140 + 132) / 2 = 135 \text{ m}$$

$$S = 28,9 \%$$

$$LS = 16,8$$

Cálculo dos Parâmetros CN (Modelo SCSCND e ASM (Modelo ANSWERS)

Tabela A1:

Solo tipo C; Condição hídrica boa

Florestas:  $CN(II) = 70$

Legumes ou pastagem em rotação; curva de nível:  $CN(II) = 78$

Tabela A2:

Fator de correção em função de  $CN(II)$  e Precipitação

Tabela A3:

Condição de umidade antecedente:

Período de dormência: 16/04 a 15/11

Período de crescimento: 16/11 a 15/04

Sub-bacia A1:

Condição II:  $ASM(II) = 0,66$   
 $CN(II) = 0,20 * 70 + 0,80 * 78 = 76$

Condição I:  $ASM(I) = 0,35$   
 $CN(I) = 0,77 * 76 = 58$

Condição III:  $ASM(III) = 0,90$   
 $CN(III) = 1,17 * 76 = 89$

Sub-bacia B1:

Condição II:  $ASM(II) = 0,66$   
 $CN(II) = 0,15 * 70 + 0,85 * 78 = 77$

Condição I:  $ASM(I) = 0,35$   
 $CN(I) = 0,77 * 77 = 59$

Condição III:  $ASM(III) = 0,90$   
 $CN(III) = 1,17 * 77 = 90$



**ANEXO D    Metodologia de Cálculo da  
Declividade dos Elementos**

Uma bacia, para ser modelada, é suposta como um conjunto de vários elementos. Cada um destes elementos é uma das quadriculas que formam a malha do modelo ANSWERS (ver figura 3.5). A declividade de cada um dos elementos foi calculada da seguinte maneira:

1 - Determinação das cotas dos vértices da quadricula em planta na escala 1:2500;

2 - Cálculo das cotas corrigidas dos vértices, de forma que a quadricula forme um plano, mantendo a mesma cota média da quadricula original. Para tanto, são determinadas duas retas:

V1 - V3: diagonal formada pelos vértices de maior e menor cota, sendo V1 o de maior cota;

V2 - V4: diagonal formada pelo outro dois vértices, sendo que a cota de V4 é maior que a de V2.

As cotas são corrigidas para que estas duas retas se cruzem em seus pontos centrais, coincidindo com o ponto de cota média da quadricula. Esta cota média é calculada como a média das cotas dos quatro vértices. As cotas corrigidas dos vértices são obtidas por:

$$CM = (C1 + C2 + C3 + C4) / 4$$

$$DEL1 = (C1 + C3) / 2 - CM$$

$$DEL2 = (C2 + C4) / 2 - CM$$

$$Z1 = C1 - DEL1$$

$$Z2 = C2 - DEL2$$

$$Z3 = C3 - DEL1$$

$$Z4 = C4 - DEL2$$

onde: C1, C2, C3 e C4 são as cotas medidas dos vértices;

Z1, Z2, Z3 e Z4 são as cotas corrigidas dos vértices.

3 - A declividade é calculada por:

$$S = [ (Z1-Z2) + (Z3-Z4)*(Z2-Z3)/(Z1-Z2) ] / A$$

onde: S = declividade;

$$A = a \sqrt{1 + (Z2-Z3)^2 / (Z1-Z4)^2}$$

a = comprimento do lado da quadrícula (50 m)

A declividade média da bacia é calculada como a média das declividades das quadrículas.