

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - IPH

INTEGRAÇÃO DE MODELO DISTRIBUÍDO E GEOPROCESSAMENTO

JOSETE DE FÁTIMA DE SÁ

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre, agosto de 1995.

*Dedicado a cada elemento que compõe a grade denominada humanidade,
que vem contribuindo humildemente com o escoamento total do conhecimento,
para os demais elementos a jusante,
sem reter somente para si o que lhe foi concedido
por elementos a sua montante e pelo que precipita do Céu.*

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Professor Carlos Eduardo Morelli Tucci e co-orientação do Professor Vitor Haertel, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Carlos Eduardo Morelli Tucci, pela orientação, estímulo e sugestões durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Vitor Haertel, pela orientação e dedicação em minha chegada ao curso, pelo interesse que me despertou para as áreas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Aos colegas de mestrado, Alfonso Risso e Joel Goldenfum, pelas experiências transmitidas.

Ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), por ceder os equipamentos e o auxílio de funcionários e técnicos, em especial, a José Carlos Nunes, pelo apoio e dedicação constantes durante esta jornada.

Aos professores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, pelos ensinamentos ministrados, de forma especial a Alejandro Cassalas e Juan Carlos Bertoni, pela paciência e estímulo.

À querida Lygia Campos, às bibliotecárias Jussara Silva e Jussara Barbieri e aos demais funcionários do Instituto.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa concedida.

Aos colegas de curso, as amigos Eduardo Sávio Martins, Andréa Germano e Jaildo dos Santos Pereira, pelas idéias, amizade e companheirismo.

À amiga Miriam Rita Moro Mine, pelo incentivo e paciência, no retorno a Curitiba.

Um carinho especial à Odete, minha querida mãe e a todos os familiares pela paciência e incentivo incansável. Também a minha família gaúcha, Sra. Eni, Sr. Francisco e Maristela pela acolhida sempre carinhosa.

À todos que, de alguma forma, participaram da realização deste trabalho.

RESUMO

Os processos hidrológicos na bacia hidrográfica variam com o tempo e o espaço. Os modelos hidrológicos têm tratado esses processos de forma concentrada devido: (i) a falta de informações, e; (ii) a dificuldade de manipular grande quantidade de dados. Nos últimos anos surgiram muitos modelos distribuídos onde uma das maiores dificuldades tem sido o tratamento das informações. Os modelos concentrados simplificam as relações físicas entre as características das bacias e os processos através de relações empíricas. Os modelos conceituais buscam a estimativa dos parâmetros com base nas características físicas, mas exigem uma grande quantidade de dados espacialmente distribuídos. A altitude do terreno, solos, topografia, cobertura e uso do terreno são entradas de dados essenciais para a nova geração de modelos hidrológicos e de qualidade de água.

O objetivo básico deste trabalho é a proposição de uma metodologia que permita a integração do modelo distribuído ANSWERS (“Areal Nonpoint Source Watershed Environment Resource Simulation”) com o geoprocessamento, técnicas de sensoriamento remoto e mapeamento de dados, de modo a auxiliar a determinação das características físicas da bacia, bem como da entrada de dados do modelo. Esta metodologia foi aplicada em 4 bacias com diferentes tamanhos: 2 menores que 1 km^2 , situadas na bacia do Rio Forquetinha, uma em torno de 1 km^2 e outra maior que 10 km^2 , ambas situadas na bacia do Rio Potiribu. As mesmas possuem diferentes relevos, estando localizada no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

Os resultados mostraram que os procedimentos usados oferecem flexibilidade para a enorme quantidade de informações produzida pelo modelo, o qual tem o potencial teórico para proporcionar a representação da resposta hidrológica. No entanto, é evidenciada a necessidade de maiores discussões das capacidades e limitações dos modelos conceituais distribuídos quando usados em áreas outras que não aquelas para, as quais, foram desenvolvidos e testados.

ABSTRACT

The hydrological processes of the watersheds vary in time and space. Hydrologic models have handled these processes by means of lumped models because of : (i) lack of information, and (ii) difficulty in manipulating large quantities of data. In recent years, many distributed models have appeared, in which information processing has been one of the greatest difficulties. Concentrated models simplify physical relations between the basin characteristics and processes by means of empirical relations. Conceptual models attempt to estimate parameters based on physical characteristics, but require a large amount of spatially distributed data. The terrain altitude, soils, topography, terrain cover and use are essential data inputs for the new generation of hydrologic and water quality models.

The primary aim of this work is to propose a methodology to allow integration, between the ANSWERS distributed process hydrologic model ("Areal Nonpoint Source Watershed Environment Resource Simulation") with geographic information systems, remote sensing techniques and data mapping so as to help determine the catchment physical characteristics of the catchment and input a model database. This methodology was applied in four different sized basins: two of them are smaller than 100 ha., which are located in the Forquetinha river basin, one is a 100 ha. basin and the other is larger than 1000 ha. and is located in the Potiribu river basin, with different reliefs, all of them in the state of Rio Grande do Sul, Brazil.

The results showed that the proposed methodologies offer flexibility for the enormous amount of information produced by model. The model is theoretically able to provide a tool for the proper representation of the hydrologic response. However, the need for further discussion of capabilities and limitations of the physically-based distributed parameter models when used in areas other than those for which they were originally developed and tested, is clearly shown.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	
1.1 Generalidades	01
1.2 Objetivos e Relevância	02
2. SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA	
2.1 Modelos Hidrológicos	05
2.1.1 Modelos Distribuídos	07
2.1.2 Automação	12
2.1.3 Obtenção dos Parâmetros Físicos	13
2.2 Identificação de Parâmetros Físicos	17
2.2.1 Sistema de Informações Geográficas	17
2.2.1.1 Arquitetura dos Dados	18
2.2.2 Modelo Numérico do Terreno	19
2.2.2.1 Obtenção da Matriz de Altitude	20
2.2.2.2 Estruturas de Drenagem	21
2.2.3 Sensoriamento Remoto	23
2.2.3.1 Sistema LANDSAT TM (Thematic Mapper)	23
2.2.3.2 Características de Alvos	25
2.2.3.3 Classificação Temática de Imagens	26
2.2.3.4 Classificador K-Médias	29
3. MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO	
3.1 Estrutura do Modelo	31
3.2 Relacionamento dos Componentes	33
3.2.1 Precipitação e Intercepção	34
3.2.2 Infiltração	34
3.2.3 Caracterização do Escoamento	36
3.2.4 Movimento e Destacamento do Sedimento	38
3.3 Dados de Entrada para o Modelo	40
3.4 Programas ELEVAA e ADDINFO	41
3.5 Saídas do Modelo	43
3.6 Síntese	45

	Página
4 METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	
4.1 Considerações Iniciais	47
4.2 Plano de Cobertura do Solo Utilizando o SITIM	48
4.2.1 Sistema de Tratamento de Imagens SITIM-150	48
4.2.2 Classificação da Cobertura do Solo	49
4.2.3 Interface com SGI	50
4.3 Planos de Informações Obtidos pelo SGI	50
4.3.1 Entrada de áreas	50
4.3.2 Cruzamento de Planos	51
5 4 Análise da Topografia por um MNT	52
5 4.1 Entradas de MNT's	52
5 4.2 Geração da Declividade e Fatiamento	52
5 4.3 MNT da Declividade e MNT da Direção	53
5 5 Adaptações para Utilização no Modelo ANSWERS	56
6 APLICAÇÕES	
5.1 Seleção das Sub-bacias	59
5.2 Organização dos Dados Disponíveis	61
5.2.1 Informações Topológicas e Topográficas	61
5.2.2 Informações dos Eventos	62
5.2.3 Informações do Solo	63
5.2.4 Informações da Cobertura do Solo	68
5.3 Delimitação das Bacias Hidrográficas	71
5.4 Discretização da Bacia	72
5.5 Simulações	75
5.5.1 Análise dos Resultados sem Ajuste	82
5.5.2 Tentativa de Ajuste	84
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	
6.1 Conclusões	91
6.2 Recomendações	93
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXOS	
ANEXO A - Parâmetros de Entrada do Modelo e sua Formatação	
ANEXO B - Arquivos Básicos das Sub-bacias	
ANEXO C - PIs das Sub-bacias Selecionadas	
ANEXO D - Listagens dos Programas em Turbo Pascal v.6.0	

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1 Principais Aplicações das Bandas do Sensor TM do Satélite LANDSAT-5	27
Tabela 3.1 Descrição dos Vários Planos de Informação e seus Formatos.	46
Tabela 4.1 Declividades médias obtidas pela rotina A_DEC2.EXE.	55
Tabela 4.2 Dimensões das Matrizes Geradas para as bacias do estudo.	58
Tabela 5.1 Características Físicas das Sub-bacias do Rio Forquetinha.	60
Tabela 5.2 Características Físicas das Sub-bacias do Rio Potiribu.	61
Tabela 5.3 Eventos Seleccionados.	63
Tabela 5.4 Algumas Propriedades Físicas Representativas de Solos.	65
Tabela 5.5 Alguns Valores para os Descritores da Taxa de Infiltração, FC e A.	67
Tabela 5.6 Valores de "P" para Várias Texturas de Solos.	67
Tabela 5.7 Fator de Erodibilidade (SKDR) para os tipos de solo identificados nas regiões de interesse.	68
Tabela 5.8 Valores de Intercepção Potencial.	70
Tabela 5.9 Coeficientes Típicos de Armazenamento Superficial.	71
Tabela 5.10 Fator de Cobertura do Solo (CDR).	71
Tabela 5.11 Declividades Calculadas pelo Modelo para sub-bacias do Rio Forquetinha.	73
Tabela 5.12 Declividades Calculadas pelo Modelo para sub-bacias do Rio Potiribu.	73
Tabela 5.13 Relação entre as Resoluções Utilizadas.	74
Tabela 5.14 Resultados do Modelo ANSWERS.	75
Tabela 5.15 Comparação dos Escoamentos Obtidos das sub-bacias A1 e B1 do Rio Forquetinha.	83
Tabela 5.16 Erro Relativo (em %) do Modelo para as aplicações nas sub-bacias A1 e B1 do Rio Forquetinha.	83
Tabela 5.17 Comparação dos Escoamentos Obtidos das sub-bacias Donato e Turcato e respectivos erros relativos.	83
Tabela 5.18 Comparação dos Escoamentos Obtidos com Ajuste das sub-bacias A1 e B1 do Rio Forquetinha.	86
Tabela 5.19 Comparação dos Sedimentos Totais Obtidos das sub-bacias A1 e B1 do Forquetinha.	86

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Representação esquemática da estrutura de um modelo distribuído.	16
Figura 2.2 Diagrama esquemático dos Planos de Informação.	16
Figura 2.3 Representação vetorial (a) e representação raster (b) de uma bacia hidrográfica.	19
Figura 2.4 Visualização tri-dimensional de um MNT.	20
Figura 2.5 Faixas do Espectro Eletromagnético.	23
Figura 2.6 Curvas de Respostas Espectrais de Alvos com os canais espectrais do sensor TM.	27
Figura 3.1 Bacia hidrográfica dividida em elementos.	32
Figura 3.2 Relações do movimento da água para os pequenos elementos da Bacia Hidrográfica.	32
Figura 3.3 Particionamento do escoamento na superfície.	36
Figura 4.1 Representação do PI_DECLIVIDADE obtido do SGI como PI-imagem (a) e obtido como PI-grade (b).	55
Figura 4.2 Os limites da bacia hidrográfica e rede de drenagem obtida por digitalização (a) e análise do MNT (b).	56
Figura 5.1 Localização das Bacias dos Rios Potiribu e Forquetinha no Estado e destaque das respectivas com as sub-bacias de interesse assinaladas.	60
Figura 5.2 Relação entre o Escoamento Total e os Calculados para cada de Discretização.	76
Figura 5.3 Resultados de Volume Escoado(a) e de Vazão de Pico(b) - sub-bacia FOA	77
Figura 5.4 Resultados de Volume Escoado(a) e de Vazão de Pico(b) - sub-bacia FOB	77
Figura 5.5 Resultados de Volume Escoado(a) e de Vazão de Pico(b) - sub-bacia DON	78
Figura 5.6 Resultados de Volume Escoado(a) e de Vazão de Pico(b) - sub-bacia TUR	78
Figura 5.7 Evento 04/06/1991 - Sub-bacia Donato (DON - 1,1 km ²)	79
Figura 5.8 Evento 04/06/1991 - Sub-bacia Turcato (TUR - 19,4 km ²)	80
Figura 5.9 Evento 05/10/1991 - Sub-bacia Turcato (TUR - 19,4 km ²)	80
Figura 5.10 Evento 05/10/1991 - Sub-bacia Donato (DON - 1,1 km ²)	81
Figura 5.11 Resultados de Volume de Sedimentos - sub-bacia FOA	87
Figura 5.12 Resultados de Volume de Sedimentos - sub-bacia FOB	87
Figura 5.13 Evento 03/08/1979 - Sub-bacia A1 (FOA - 0,55 km ²)	88
Figura 5.14 Evento 03/08/1979 - Sub-bacia A1 (FOA - 0,55 km ²) - Ajuste	88

	Página
Figura 5.15 Evento 03/08/1979 - Sub-bacia B1 (FOB - 0,393 km ²)	89
Figura 5.16 Evento 03/08/1979 - Sub-bacia B1 (FOB - 0,393 km ²) - Ajuste	89
Figura 5.17 Evento 23/06/1979 - Sub-bacia B1 (FOB - 0,393 km ²)	90
Figura 5.18 Evento 23/06/1979 - Sub-bacia B1 (FOB - 0,393 km ²) - Ajuste.....	90

1. INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

A evolução do conhecimento dos processos em hidrologia de bacias de escala entre 0,01 a 500 km², tem sido possível através de ferramentas como geoprocessamento. O desenvolvimento de novos modelos, avaliação e comparações entre aqueles já conhecidos, tratamento da variabilidade espacial e a automação, tem sido intensamente discutido pela comunidade hidrológica (Goodrich e Woolhiser, 1991).

Os processos hidrológicos são afetados pela variabilidade de solos, topografia, uso e cobertura do terreno, clima, gerenciamento e mudanças antrópicas. Os modelos distribuídos usando equações baseadas em processos físicos, procuram representar a variabilidade espacial desses processos na bacia hidrográfica. Este tipo de modelo, geralmente dirigido ao transporte de nutrientes e sedimentos (qualidade de água), busca uma representação mais realística do escoamento superficial.

O aprimoramento da representação espacial dos processos hidrológicos através de modelos distribuídos, em geral, busca atender aos seguintes quesitos:

- (i) melhorar a representação do hidrograma de saída;
- (ii) permitir a simulação dos hidrogramas em sub-bacias;
- (iii) representar o efeito de variabilidade espacial dos processos e mudanças na bacia, e;
- (iv) melhorar a estimativa dos parâmetros com poucos dados de vazão.

Nem sempre o ganho com o uso de modelos distribuídos ocorre no primeiro item acima. Muitas vezes um modelo concentrado pode obter resultados equivalentes ou até melhores, mas nos outros itens o modelo distribuído apresenta benefícios importantes dependendo da aplicação a qual o modelo se destina.

Uma das dificuldades encontradas no seu uso, decorrem principalmente da manipulação de uma grande quantidade de informações para operá-las. Esses dados, envolvem topografia, cobertura do solo, tipo de solo, característica do sub-solo, entre outros. O tratamento dessas

informações através de Sistemas de Informações Geográficas apresenta um ganho em operacionalidade que permite melhor simular os processos na bacia.

A definição do tamanho dos elementos que discretizam a bacia, na qual se processará a simulação do modelo distribuído, dependerá entre outros fatores, da disponibilidade de recursos computacionais. O maior detalhamento da descrição da bacia, implica em arquivos de entradas maiores e, conseqüentemente de maior esforço computacional.

A discussão da resolução espacial (dimensão do elemento de discretização) se faz necessária, considerando-se:

- (i) a finalidade do projeto e a precisão exigida;
- (ii) o tamanho e a topografia da bacia em estudo, e;
- (iii) a escala disponível e a confiabilidade das informações de entrada.

Esses fatores devem ser analisados conjuntamente, afim de se estabelecer uma dimensão adequada para os elementos, de forma a minimizar o custo computacional, maximizando a qualidade dos resultados.

Portanto, a utilização de modelos distribuídos pode ser incentivada com o desenvolvimento computacional, sendo que as melhorias, em termos de predição hidrológica devem ser observadas, de acordo com a adaptação do modelo à região em estudo e com os dados disponíveis.

1.2 Objetivos e Relevância

Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia que permita integrar um modelo distribuído, com um sistema de informações geográficas, implementando técnicas de sensoriamento remoto e mapeamento de dados, de modo a auxiliar na determinação das características físicas das bacias e na montagem dos arquivos de entrada do modelo.

Com a implementação da tecnologia de sensoriamento remoto, é possível se obter diversos elementos como cobertura do terreno, pedologia, rede de drenagem, fatores

topográficos entre outros, com rapidez, maior precisão e relativo baixo custo, reduzindo consideravelmente uma das principais dificuldades do uso do modelo distribuído que é a entrada de dados.

O modelo hidrossedimentológico conceitual distribuído escolhido foi o ANSWERS ("Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation"), integrado a utilização do Sistema de Tratamento de Imagens (SITIM-150) e do Sistema Geográfico de Informações (SGI), ambos desenvolvidos pelo INPE. Adicionalmente, esta pesquisa analisa a aplicabilidade deste tipo de modelo em algumas bacias rurais com dados hidrossedimentológicos.

O modelo ANSWERS desenvolvido por Beasley e Huggins (1981), baseia-se na existência de relações funcionais entre o fluxo de água e os parâmetros hidrológicos que o governam, para cada elemento da bacia elementar. A partir do fluxo de água, através de relações adequadas pode-se modelar o fenômeno da erosão do solo. Considerando que um elemento é uma área onde todos os parâmetros, hidrológicamente significativos são considerados constantes, a variabilidade espacial pode ser representada com os parâmetros variando irrestritamente entre os elementos.

O modelo exige uma grande quantidade de informação quanto às características físicas das bacias para montagem de seu arquivo de dados de entrada. Estes podem ser obtidos com auxílio de imagens digitais multiespectrais, obtidas por satélite do tipo LANDSAT-5 (Satélite de Avaliação de Recursos Naturais) com sensor TM (Thematic Mapper), aliado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

A distribuição espacial dos atributos topográficos pode e deve ser utilizada para a medição indireta da variabilidade dos processos hidrológicos. A topografia é usada para desenvolver mais fisicamente, estruturas realísticas no modelo hidrológico e de qualidade da água. Os Modelos Numéricos do Terreno (MNTs) são também dados primários usados na análise da topografia de bacias.

O arquivo de dados elementares de um modelo distribuído como o ANSWERS poderá ser rapidamente obtido com a utilização dos Planos de Informação (PIs) obtidos das imagens

digitais, classificados pelo SITIM ou digitalizados de mapas e transformados em grades ou imagens, por um SIG, sendo que as grades poderão gerar outros PIs através dos MNTs.

A aplicação foi feita em duas sub-bacias da Bacia do Rio Forquetinha, de dimensões de 0,55 km² (A1) e de 0,393 km² (B1), com relevo moderado a íngreme. As características físicas são obtidas para a aplicação do modelo, através da utilização do SGI, buscando ampliar o uso desta tecnologia para uma escala de maior detalhamento. Goldenfum (1991) apresentou uma aplicação do modelo ANSWERS, nessas bacias, com resultados de descargas líquidas e sólidas em pequenas bacias rurais, de qualidade razoável, sem efetuar ajuste de seus parâmetros, com as características físicas da bacia obtidas manualmente. Tornou-se possível assim, estabelecer comparação com a implementação das técnicas.

Para estas sub-bacias foram definidas resoluções diferentes de estudo para efeito de comparação entre os resultados: 25 m x 25 m e 50 m x 50 m (esta última foi também adotada no estudo comparativo). A compatibilidade da escala dos mapas com as informações de entrada também foi observada.

A metodologia foi aplicada também para duas sub-bacias do Rio Potiribu: Turcato (19,4 km²) e Donato (1,1 km²), com relevo ondulado suave. Esta região típica da zona de planalto do derrame basáltico sul-brasileiro, vem sendo estudada, por encontrar-se submetida a processos erosivos, devido à forte ação antrópica.

A aplicação feita nas sub-bacias Donato e Turcato com a utilização do modelo ANSWERS, integrando técnicas de geoprocessamento, concentrou-se nos resultados de descargas líquidas. Nesta aplicação as diferentes resoluções de comparação foram: 30m x 30m, 60 m x 60 m, 100 m x 100 m e 200 m x 200 m para a sub-bacia do Donato e 200 m x 200 m para a sub-bacia do Turcato. Utilizaram-se também técnicas de tratamento de imagens, do SITIM-150, para obtenção do Plano de Informação de cobertura do solo.

Assim, as aplicações a bacias de diferentes tamanhos, duas inferiores a 1 km², uma cerca de 1 km² e uma superior a 10 km², e relevo distinto, possibilitaram a variação da discretização e a análise do modelo frente ao tamanho dos elementos.

2. SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA

2.1 Modelos Hidrológicos

Um modelo é uma representação da realidade que procura simplificar a complexidade do mundo real, salientando e detalhando somente os aspectos fundamentais. No caso de modelos matemáticos de um sistema natural, como uma bacia hidrográfica, será muito complicado representar todos os processos ocorrendo em cada ponto do sistema. Procura-se identificar os principais processos contribuintes para a resposta de interesses específicos, quantificar ou estimar tão precisamente quanto possível esta resposta para comparar com resultados observados no sistema real e, progressivamente refinar a representação, até que os melhores resultados sejam alcançados dentro das restrições de tempo, dados, capacidade computacional, habilidades e experiências do modelador (Anderson e Burt, 1985).

Os modelos podem ser classificados segundo vários critérios. Os modelos empíricos tratam o sistema sem nenhuma relação com a física dos processos, enquanto que os modelos conceituais oferecem duas vantagens: proporcionar a possibilidade de aplicação sobre um leque de condições e locais e podem auxiliar a compreensão de processos de sistemas naturais, criando uma ligação entre a teoria e os dados de campo.

Os modelos conceituais visam representar de uma forma mais detalhada, os processos físicos e os mecanismos internos do sistema mesmo que necessitem utilizar funções empíricas. Se os parâmetros e variáveis variam em relação ao tempo e ao espaço, considerando o sistema físico como uma grade de elementos homogêneos, havendo variação apenas de elemento para elemento, é denominado modelo distribuído. (Tucci, 1986).

Para modelar o sistema hidrológico completo da bacia hidrográfica, os processos físicos e biológicos que governam a água e o caminho que interage, são necessárias simplificações que podem ser, tanto na representação da estrutura física quanto na representação dos processos envolvidos. Conforme Blackie e Eeles (1985), a mais comum simplificação feita na modelação de bacia é a concentração ou média espacial. O conceito de modelo concentrado considera como adequadas bacias pequenas com precipitação, vegetação, solo, geologia e topografia

homogêneas, pois implica em não considerar as variações destas características dentro da bacia.

A modelação hidrológica apresenta fases distintas em sua evolução. Iniciou-se com o impulso dado, quando as dificuldades dos conhecidos métodos de compreensão e análise do ciclo hidrológico, passaram a contar com os recursos computacionais em desenvolvimento, incentivando a utilização dos métodos numéricos. Surgiu, então o mais tradicional modelo conceitual, SWM - “Stanford Watershed Model” (Linsley e Crawford, 1966 apud Blackie e Eeles, 1985), tornando mais comum a utilização de modelos hidrológicos.

Como outros modelos surgidos nesta fase, o SWM produz estimativas de escoamento diário de entradas de precipitação diária usando funções de infiltração, hidrograma unitário e de recessão para saídas de bacias e sub-bacias. Mais tarde, foram incluídos: o balanço de umidade do solo, estimativa de evapotranspiração. O uso destas informações, atendem as seguintes aplicações :

- Controle de qualidade e preenchimento de falha nos dados;
- Extensão de registros históricos e geração de dados sintéticos para projetos hidráulicos;
- Avaliação dos recursos hídricos;
- Gerenciamento dos recursos hídricos e previsão em tempo-real.

Esses tipos de modelos, geralmente tratam bacias com áreas superiores a 50 km² e visam projetos de desenvolvimento dos recursos hídricos, como dimensionamento e previsão de vazão, obras hidráulicas, navegação entre outros. São consideradas as seguintes premissas:

- (i) a bacia não se altera e as séries são estacionárias;
- (ii) os parâmetros são ajustados de acordo com os resultados e guardam pouca relação com as características físicas.

Até a década de 70, a geração de modelos hidrológicos não fornecia bases científicas para contornar muitos dos problemas que surgiram dos impactos adversos da atividade humana no ciclo hidrológico, tais como os efeitos da devastação florestal sobre a erosão do solo, os regimes de cheias e a dispersão de poluentes nas atividades agrícolas e industriais. Novos avanços foram necessários para que os modelos possam ser de uso na avaliação dos impactos ambientais do desenvolvimento da bacia. No meio agrícola apareceram modelos que

tratavam os processos hidrológicos, sedimentológicos e químicos de contaminação, dentro de um visão de pequenas áreas agrícolas (inferiores a 10 km²).

Com a preocupação ambiental, procurou-se estabelecer um equilíbrio entre retorno econômico a curto prazo e a manutenção de uma qualidade ambiental aceitável no desenvolvimento das bacias, fazendo-se necessário a avaliação dos impactos de diferentes níveis de desenvolvimento e as estratégias de gerenciamento da erosão do solo, produção de sedimentos, qualidade de água e vazões de cheias. Isto requer modelos que possam simular os diferentes níveis de desenvolvimento para futuras alterações da bacia, necessitando basear-se na compreensão física dos processos que são determinantes nestes impactos. Os modelos tradicionais não encontram estes critérios : faltam parâmetros quanto a significação física e dependem da disponibilidade de séries de registros hidro-meteorológicos suficientemente longos. Tais dados freqüentemente não disponíveis, ainda que existam referem-se ao passado e ao presente da bacia, não sendo possível estudar os impactos devido as mudanças futuras.

Muitos modelos considerando os subprocessos de produção de sedimentos, usando entradas hidrológicas para simular as interações entre os processos hidrológicos e de erosão, passam a ser desenvolvidos. Alguns citados por vários autores são apresentados a seguir :

LEAP - “Land Erosion Analysis Programs” (Moore and Thornes, 1976 apud Moore et al.,1991) : examina a distribuição espacial do comprimento, declividade e o plano de curvatura dos elementos para avaliar a “erosão potencial topográfica”;

CREAMS - “Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems” (Knisel, 1982 apud Park et al.,1982) : utilizado para bacias rurais, constituído de submodelos de hidrologia, erosão e produtos químicos, podendo ser aplicado em bacias com carência de dados, sem necessitar de calibração;

SWRRB - “Simulator for Water Resources in Rural Basins” (Arnold e Williams, 1987 apud Arnold e Sammons, 1988): uma ampliação do modelo CREAMS, introduzindo a geração estocástica de dados;

KINEROS - Modelo de erosão do Escoamento Superficial Cinemático” (Woolhiser et. al., 1990 Grayson, 1992): o modelo inclui parâmetros de solo e superfície, variabilidade e descrita pela informação textural do solo que representa as propriedades hidráulicas do solo, não dependendo da estrutura do modelo.

Os conceitos e métodos para a descrição dos processos hidrológicos que vinham sendo desenvolvidos foram, sendo usados como componentes dos modelos com algumas modificações. A partir da década de 80, as considerações com respeito aos efeitos da topografia da bacia começaram a ser incluídas nos modelos, pois o transporte de poluentes não pode ser representado realisticamente se não houver a consideração da variabilidade espacial de características como profundidade e velocidade do escoamento. A ênfase às predições de processos hidrológicos variáveis espacialmente, caracterizam este período.

2.2 Modelos Distribuídos

Considerações em termos de programação, recursos computacionais, preparação de dados e experiências de campo são requisitos básicos dos modelos distribuídos. É, portanto, necessário averiguar sob que condições e para que tipo de problemas de estimativas, é vantajoso usá-los. Esta escolha baseia-se em restrições econômicas, experiências e preferências pessoais, para que fim destina-se, bem como considerações puramente hidrológicas. A disponibilidade e confiabilidade de dados também é um fator decisório. Identificam-se quatro áreas que oferecem grande potencial para a aplicação de modelos distribuídos (Beven, 1985):

- (i) previsão dos efeitos e mudanças do uso do solo;
- (ii) previsão dos efeitos de variabilidade espacial de entradas e saídas;
- (iii) previsão do movimento de poluentes e sedimentos, e;
- (iv) previsão da resposta hidrológica de bacias não padronizadas onde não há dados disponíveis para calibração de um modelo concentrado.

Os modelos distribuídos usando equações descritivas baseadas nos processos físicos e utilizando a variabilidade espacial nos processos dirigidos, geralmente, para modelos de transportes de nutrientes e sedimentos, requerem a representação precisa do escoamento da superfície, pois as flutuações devido a variação espacial são responsáveis por qualquer irregularidade na distribuição da concentração. Para tanto, a estrutura básica dos modelos necessita a compatibilidade com os métodos de análise do terreno e os métodos que caracterizam os processos da bacia hidrográfica. Este é um dos problemas fundamentais, uma vez que as propriedades naturais da Terra são altamente variáveis no espaço, combinadas à variação espaço-temporal das variáveis meteorológicas, implica em enorme e praticamente

impossível campanha para preenchimento dos requisitos dos parâmetros de todos os elementos da aplicação de um modelo determinístico em determinada escala.

A natureza distribuída permite fazer uso das muitas informações qualitativa e quantitativa, tanto quanto disponíveis, na modelação da quantidade e qualidade de água afetada por fontes não pontuais de contaminantes, de acordo com a finalidade do gerenciamento. Contudo, sua aplicação prática dependerá dos progressos dos requisitos computacionais, da necessidade de avaliar grande número de parâmetros e da complexidade que implica num longo período de treinamento para os usuários destes modelos. Alguns desses modelos em desenvolvimento, bastante citados por vários autores, são a seguir comentados :

O Modelo FESHM (Finite Element Storm Hydrograph Model) desenvolvido por Ross et al. (1979) citado por Moore et al. (1991) e Vieux (1991), é um modelo hidrológico distribuído, no qual a bacia é particionada em sub-bacias ou Unidades de Resposta Hidrológica (HRU) que possuem unidade de mapeamento e tipo de solo, com uma média das características da bacia variando espacialmente, representada simplificada dentro da estrutura do modelo. Portanto, a metodologia baseia-se em áreas homogêneas hidrológicamente, usando a representação de elementos finitos. O modelo é basicamente utilizado para a predição e simulação de descarga de pico do escoamento superficial e sedimentos, sob mudanças diferenciadas do uso do solo. Este modelo calcula o escoamento superficial segundo uma aproximação determinística. Devido as “áreas hidrológicamente homogêneas” serem concentradas, pode ser considerado concentrado a nível de elemento computacional, mas distribuído a nível de bacia.

O modelo AgNPS (“Agricultural Non-point Source Pollution”) desenvolvido para Minnesota of Pollution Agency (Young et al., 1987 apud Vieux, 1991), analisa os impactos de qualidade de água de poluição de fonte não pontual, predizendo volume do escoamento superficial, escoamento de pico, erosão, sedimentos, nitrogênio, fósforo e concentrações de demanda de oxigênio no escoamento superficial. Os submodelos utilizam relações empíricas e simplificadas. A nível de bacia é um modelo distribuído, uma vez que produz informações relativas ao processo hidrológico no interior das células da grade da bacia. No entanto, assim como todos os modelos, os processos modelados são espacialemente médios ou concentrados a nível de elemento individual.

Beasley e Huggins (1981) descrevem o modelo ANSWERS (“Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation”) como um modelo determinístico, conceitual e distribuído, desenvolvido para estudar o impacto de uso do solo, prática conservacionista e manejo na bacia em qualidade de água. Vários experimentos com ANSWERS encontram-se na literatura: Park et al. (1982) testaram com dados de duas bacias rurais menores de 0,1 km² e verificam que variações temporais da produção de sedimentos são aproximadamente relacionadas às características de escoamento superficial, relatam também a dificuldade na obtenção dos parâmetros de entrada; Thomas e Beasley (1986) modificaram o modelo para incluir escoamento subsuperficial considerado para bacias florestadas e testaram em 7 bacias entre 0,013 a 0,16 km², com elementos de 30 x 30 m, sem calibração, obtendo relação significativa entre os picos de escoamento observado e calculado; a aplicação efetuada por Goldenfum (1991), em duas sub-bacias rurais de 0,55 e 0,393 km², sem efetuar ajuste dos parâmetros, com resultados razoáveis comparados aos resultados de outros modelos, tais como a MUSLE, SCS e IPH-II.

A importância de se ganhar experiência na representação dos processos, segundo Bathurst e O’Connell (1992) reforça a investigação no modelo SHE (Système Hydrologique Europeen) (Abbott et al., 1986 apud Bathurst e O’Connell, 1992). Originalmente, o modelo consiste nas representações dos movimentos da água superficial e subsuperficial integradas, incorporando a maioria dos processos da fase terrestre do ciclo hidrológico (neve, interceptação vegetal, evapotranspiração, escoamento no canal e superficial, escoamento subsuperficial saturado e insaturado, interação aquífero-rio). A modelação é feita por representações de diferenças finitas das equações diferenciais parciais de conservação da massa e energia, ou equações empíricas derivadas de pesquisas experimentais independentes, fornecendo saídas não somente de descargas, mas de qualquer outra variável hidrológica, sobre uma base distribuída espacial e temporalmente. A aplicação do modelo SHE, estende-se no intervalo de escala de 30 m² até 5000 km² e uma variedade de ambientes. Este leque de aplicações têm demonstrado a habilidade para alcançar a calibração com registros de séries curtas e avaliação de campo dos parâmetros e para explorar os mecanismos de resposta da bacia.

Outro modelo que procura capturar os aspectos essenciais da resposta distribuída através de uma teoria física simplificada, envolvendo um pequeno número de parâmetros, é o TOPMODEL (TOPographic MODEL) (Beven, 1986 apud Quinn et al., 1991). É um modelo que não apresenta uma estrutura fixa, mas um conjunto de conceitos baseados nos índices topográficos, com similaridades hidrológicas, podendo ser modificado conforme as particularidades de cada aplicação. Os diferentes princípios físicos baseiam-se em duas idéias básicas centrais: que o escoamento subsuperficial a jusante é representado por uma sucessão de posições de níveis de água constante e que existe uma relação exponencial entre o gradiente hidráulico local e a declividade do terreno.

O IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model) (Beven et al., 1987 apud Moore et al., 1991), baseia-se em solução numérica (elementos finitos) de equações diferenciais parciais que descrevem os processos superficial e subsuperficial. A bacia é subdividida de acordo com as linhas de maior declividade, usando componentes uni-dimensionais de escoamento sobre o terreno e no alcance do canal e componente vertical bi-dimensional subsuperficial saturada/insaturada.

O modelo THALES (Grayson et al., 1992), cujo nome é uma homenagem a THALES de Mileto, filósofo grego que reconheceu a influência da topografia na geração do escoamento, é um modelo que incorpora o mecanismo Hortoniano do escoamento superficial, a representação de áreas de fontes variáveis e exfiltração do escoamento subsuperficial, bem como, o método de análise do terreno baseado nas curvas de nível (TAPES - "Topographic Analysis Program for the Environmental Sciences : Contour", desenvolvido por Moore et al., 1988, conforme Grayson et al., 1992).

Com a aplicação do modelo THALES, a partir das investigações efetuadas, Grayson et al. (1992b), discutem os caminhos futuros do uso e interpretação da modelação conceitual distribuída, bem como, as normas de dados de campo para teste de modelação. Concordando com Bathurst e O'Connell (1992), salientam-se a importância da integração de medições de campo dentro do processo de calibração, o efeito da escala da grade na avaliação dos parâmetros e na simulação dos resultados, ainda necessitando de muita investigação e incentivo para estudos dos processos em áreas onde há pouca compreensão, de modo a aprimorar as representações do modelo.

As aplicações de modelos conceituais podem parecer rigorosas a princípio, conforme Beven (1989), na prática o processo fica deficiente devido ao desconhecimento do sistema, a superparametrização dos modelos e os processos na célula da grade de concentração implícita, inerente nas aproximações numéricas usadas. A existência de uma certa equivalência entre modelos conceituais distribuídos e modelos conceituais concentrados, sugere que todos os modelos hidrológicos são, geralmente, invalidados por comparações detalhadas com dados de campo.

A maioria das discussões encontradas na literatura apontam os problemas na modelação conceitual distribuída quanto a necessidade do aprofundamento de pesquisas salientando-se as considerações teóricas e aplicações, principalmente na área da avaliação, calibração/validação, na compreensão e descrição dos processos básicos de escoamento e transporte considerando os problemas de heterogeneidade e definição da escala de discretização.

No que diz respeito a determinação dos parâmetros necessários para cada modelo e cada aplicação específica, a variabilidade espacial dos parâmetros deve ser examinada para dois níveis : a variabilidade espacial que cruza a bacia representada pela grade e a variabilidade espacial para a escala dentro da grade. Aumentando a escala de medição, tende-se a diminuir a variância e aumentar a correlação, e ambos parâmetros estatísticos influenciam os efeitos da derivação do parâmetro efetivo da grade. Esta interrelação entre escala de medição e parâmetros efetivos a serem adotados, devem ser investigados. Considerando-se também que a resolução espacial dos parâmetros pode ser diferente para os diferentes processos físicos envolvidos.

Quanto a necessidade dos testes dos modelos em campo, onde as medições detalhadas dos parâmetros e as predições dos modelos podem ser, rigorosamente validadas e comparadas, sendo requisitos tanto com respeito aos componentes individuais para definir as capacidades e limitações das formulações alternativas, como para definir a escala da bacia onde todos os componentes hidrológicos estão presentes.

Um dos méritos dos modelos distribuídos é a relevância física dos parâmetros, por isso deveriam ser mensuráveis em campo, o que é uma tarefa praticamente impossível. A definição

dos valores de parâmetros efetivos e da escala da grade a ser adotada são discutidas por Jensen e Mantoglou (1992). Os desenvolvimentos futuros desses modelos, segundo estes autores, devem considerar a natureza heterôgenea do sistema hidrológico dentro de uma formulação estocástica, visto que as aproximações estocásticas proporcionam uma estrutura racional para tratar as dificuldades das características da variabilidade espacial, estabelecendo uma ligação entre a incerteza dos parâmetros e a incerteza da predição. Pela adoção de uma metodologia estocástica os requisitos de entrada de parâmetros são modificados devido os processos serem baseados em parâmetros que descrevem as estatísticas da variabilidade local (tais como : médias, variâncias e correlações).

O modelo GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) apresentado por Beven e Binley (1992) descreve uma metodologia para a calibração e a estimativa da incerteza dos modelos distribuídos baseado na probabilidade generalizada. Este modelo trabalha com grupos múltiplos de parâmetros e permite que, dentro das limitações e erros de uma dada estrutura de modelo, em condições limites e com as observações de campo, diferentes grupos de valores possam ser, igualmente prováveis aos simulados na bacia. São descritos os procedimentos para a incorporação de diferentes tipos de observações na calibração, a atualização das probabilidades Bayesiana e a avaliação do valor das observações adicionais no processo de calibração. O modelo permite ainda, a estimativa da incerteza associada com o grupo de dados das predições, podendo-se talvez esperar que com a atual geração de modelos distribuídos, os limites de incerteza sejam reduzidos. É como se a disponibilidade de dados adicionais ajudasse a restringir os limites de incerteza, podendo ser proposta no contexto de se há experimentos críticos (custo efetivo) que possam gerar funções que reduzam significativamente a incerteza predita, sempre subordinada às restrições do erro estrutural do modelo.

2.3 Automação

O aumento de complexidade do modelo implica no aumento de requisitos de dados de entrada, descrição da bacia, parametrização do modelo e interpretação de saídas. Para modelos relativamente simples, as dificuldades de modelação foram auxiliados por software de planilhas eletrônicas (Walker et al., 1989). Para modelação de bacias distribuídas que exigem extração das redes de drenagem, área drenada e características topográficas foram investigadas por

Mark et al. (1984) e por Jenson e Domingue (1988), identificando vários algoritmos para a determinação destas características físicas, a partir de Modelos Numéricos do Terreno, que vêm sendo, amplamente utilizados.

Johnson (1989) apresenta a integração de um modelo hidrológico com as funções de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os gráficos interativos foram usados para desenvolver rapidamente arquivos de dados digitais da bacia para solos, topografia, uso de terreno, pontos e distribuições de precipitação derivada de radar. A distribuição espacial dos dados foi mapeada com códigos de cores que pode ser interpretada por algoritmos de respostas hidrológicas. Foi utilizado um Modelo Numérico do Terreno acompanhando a obtenção das declividades e a direção do escoamento para a resolução da grade selecionada pelo usuário.

Avanços tecnológicos transferiram à automação, a exaustiva tarefa de obtenção de dados e exposição destes. No entanto, alertam Goodrich e Woolhiser (1991) que o usuário deve estar ciente que melhoramentos na resolução do descritor da bacia (topografia, solo, vegetação) e na rápida obtenção destes não resultarão, necessariamente na predição hidrológica melhorada, a menos que o modelo utilizado seja adequado. Bathurst e O'Connell (1992) comentam a respeito que o uso das tecnologias de sensoriamento remoto pode ser considerada para fornecimento das distribuições espaciais e também avaliação de parâmetros, particularmente para condições de superfície e propriedades de vegetação. No entanto, há dificuldades na conversão da radiância de sensores para propriedades hidrológicas significativas. No que diz respeito a variabilidade espacial dentro da grade, as técnicas de medições usadas devem, tanto quanto possível, corresponder a estrutura e escala do modelo.

Moore et al. (1991) em revisão às aplicações hidrológicas de Modelos Numérico do Terreno, enfatizam a necessidade da predição dos processos hidrológicos variáveis espacialmente, para resoluções mais refinadas. Dados digitais de altitudes e características obtidas de sensoriamento remoto, tais como cobertura vegetal, passam a ser vistos como dados de entrada essenciais para a nova geração de modelos hidrológicos e de qualidade de água. Modificações mais evidentes na estrutura básica dos modelos, começam a ser feitas, para facilitar a entrada desde dados espaciais e predições dos processos do sistema, distribuídos espacialmente.

O hidrólogo modelador, tem o computador como um potencial disponível para aplicações, tornando-se a cada dia maior e mais acessível com workstations gráficas e processadores numéricos. Isto implica na escolha de como usar os modelos distribuídos (Bathurst e O'Connell,1992), talvez com auxílio do sistema de informações geográficas para viabilizar o número dos parâmetros requisitados (Drayton et al.,1992), introduzindo elementos estocásticos nas equações do modelo (Jensen e Mantoglou,1992) ou usando este potencial para qualificar as predições dos modelos pela incerteza associada a estes.

2.4 Obtenção dos Parâmetros Físicos

O uso do sensoriamento remoto, processamento de imagens, digitalização de mapas e o cruzamento desses dados, possibilitam a obtenção de informações referentes às características fixas (topografia, pedologia) e mutáveis (cobertura vegetal e tipo de uso do solo) que regem as descargas líquidas e sólidas de determinada região. Cada um desses parâmetros possui características que limitam a sua obtenção por um encaminhamento mais adequado.

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) foi desenvolvido para combinar informações de atributos a respeito do terreno com sua representação cartográfica, afim de executar análises espaciais. O sensoriamento remoto e tecnologia de análise de imagens vêm sendo usado em paralelo para obter informações a respeito da Terra, em resoluções tão altas quanto possíveis. De acordo com Ehlers et al. (1989), a integração de tais aquisições de dados e análises de imagens estão se tornando cada vez mais importantes para o planejamento de recursos naturais. Tem sido discutida a integração do potencial das duas tecnologias, na busca de alcançar a integração através da padronização de formatos dos dados existentes no SIG e no sistema de análises de imagens.

A interpretação visual é muito útil para estudos hidrológicos usando produtos fotográficos Landsat TM (Thematic Mapper) puro e realçado digitalmente. O uso de composições de cores falsas TM Landsat das bandas 2, 3 e 4 para avaliar e mapear a forma do terreno e características associadas, tais como solo, vegetação, drenagem e uso/cobertura do terreno é razoável e confiável em regiões áridas. Conclusões obtidas por Sharma e Singh (1995) que aplicaram o modelo distribuído ANSWERS para predição de escoamento

superficial e perda de solo de três bacias rurais na zona semi-árida da Índia. O modelo previu hidrogramas e gráficos de sedimentos dentro dos limites aceitáveis.

O uso de radar meteorológico, em combinação com um modelo distribuído, promete um melhoramento na previsão de enchente em tempo-real, conforme Pessoa et al (1993). Um modelo distribuído aproveitando a disponibilidade de informação topográfica de mapas de altitude, estuda a sensibilidade da previsão da enchente para várias propriedades da precipitação derivada de radar. O uso da relação intensidade de precipitação-refletividade do radar é o fator mais crucial na correta obtenção do hidrograma de enchentes. O estudo conclui que erros resultantes da média espacial da precipitação de radar são aceitáveis, mas o uso da informação pontual discreta (medição de precipitação) pode conduzir a sérios problemas.

Um modelo de precipitação e vazão baseado em células retangulares é apresentado por Drayton et al. (1992). O escoamento superficial em cada célula foi estimado empiricamente e calculado através da rede de drenagem principal. A informação da cobertura do solo em cada célula 50 x 50 m, foi interpretada de dados de sensoriamento remoto colhidos por um satélite orbital. Os valores de parâmetros topográficos para cada célula são derivados de um Modelo Numérico do Terreno. Os demais dados mais convencionais foram adquiridos por digitalização e todos os dados tratados no SIG.

A maioria dos modelos distribuídos requerem entradas da topografia da bacia, a qual define a trajetória do escoamento superficial e subsuperficial, sendo necessária a utilização de Modelo Numérico do Terreno (MNT), capaz de analisar e definir, automaticamente, esta trajetória. Quinn et al. (1991) examinam alguns dos problemas para obtenção dos caminhos do escoamento superficial e subsuperficial, no contexto de predições hidrológicas usando o TOPMODEL. Conforme apresentado no item 2.1.1, a estrutura deste modelo oferece um simples método paramétrico da utilização de dados numéricos do terreno para predizer as mudanças dos níveis de água e a umidade do solo ao longo do tempo. Os pontos observados no estudo, associados com a utilização do MNT são: a sensibilidade do algoritmo da trajetória do escoamento; a sensibilidade da escala da grade do MNT, e; a divergência das trajetórias do escoamento subsuperficial daqueles indicados pela topografia da superfície.

Bruneau et al. (1995), discutem as resoluções espaciais e temporais usadas para variáveis de entrada do modelo TOPMODEL, com aplicação a uma bacia experimental de 12 km². A escolha da resolução depende da precisão requerida, do local do experimento e dos processos e variáveis considerados no modelo. São feitas três análises de sensibilidade : quanto as variáveis de entrada derivadas de um Modelo Numérico do Terreno, quanto aos valores otimizados dos parâmetros do modelo e quanto à eficiência de modelação. As análises mostram que existe um domínio relevante de resoluções espaço-temporais, onde a eficiência é satisfatoriamente constante, definida para os dados de entrada topográfica, sendo que o domínio de resoluções maiores induzem a uma forte redução da eficiência do modelo. Mostram também, que o uso de um simples grupo de parâmetros, definidos como valores médios sobre o domínio relevante da resolução, não modifica a precisão do modelo. A sensibilidade dos parâmetros para as resoluções espaço-temporais, permite que a significância física desses, possam ser discutidas.

Apesar da atração conceitual da integração de modelos hidrológicos distribuídos com SIG, de acordo com Grayson et al. (1993), existe um número de problemas que devem ser observados, tais como, dúvidas entre as diferenças de escala entre a pesquisa de bacias e áreas de gerenciamento, restrições dos modelos hidrológicos e questões da própria tecnologia SIG. As informações geradas via interpolação, podem ser utilizadas sob condições específicas, bem como, os gráficos sofisticados de saída de resultados, em certos casos poderão seduzir o modelador dentro de um senso pouco realístico da precisão do modelo. Faz-se necessário, aproximações alternativas para as predições quantitativas, combinando com raciocínio qualitativo, tornando-se consistente com a disponibilidade de dados e com os aprimoramentos para a representação do sistema.

As técnicas de visualização modernas em workstations gráficos são incentivadas para a rápida exposição dos dados distribuídos, de modo a permitir que os padrões de respostas sejam avaliados qualitativamente. Beven e Binley (1992) argumentam que uma medição da probabilidade quantitativa pode ser obtida, comparando-se padrões de respostas com o conhecimento de campo e atribuindo probabilidade zero para aquelas simulações consideradas como não comportando-se de modo coerente com o conhecimento de processos de campo. Os dados adicionais nem sempre necessitam ser quantitativos. As vantagens de modelos distribuídos em produzir predições distribuídas pode ser usada para efeito de permitir ao

modelador, avaliar as respostas do processo preditas pelo modelo, em seu contexto espacial. O conteúdo de informação a ser processado no contexto da simulação múltipla é, evidentemente, imenso e, é preferível uma avaliação visual, podendo requisitar uma posição inicial (medidas de probabilidade) baseado em conhecimento de campo mesmo onde não há medições diretas.

Esta revisão sucinta do “estado da arte” de modelos hidrológicos conceituais distribuídos, conduz à idéia de um modelo ideal, com a representação do movimento da água superficial e subsuperficial integrada dentro uma bacia elementar, observando as principais fases do ciclo hidrológico (precipitação, interceptação vegetal, infiltração do solo, evapotranspiração), sendo apto a receber relações adicionais (como por exemplo, transporte de sedimentos e nutrientes) e permitindo adaptações peculiares a cada região de aplicação. A Figura 2.1, adaptada da representação do modelo SHE, ilustra esta idéia.

Existem problemas que requisitam predições de efeitos hidrológicos futuros de uso do solo e mudanças climáticas quando não há dados disponíveis suficientes para a calibração ou recalibração do modelo. Desta forma, é necessário continuar a melhorar os instrumentos de modelação disponíveis aos hidrólogos na área de modelos conceituais distribuídos. Embora existam dificuldades de representação dos processos, a precisão e a escala de medição dos parâmetros, muitas vezes, incompatíveis com o uso no modelo, bem como, a falta de programas de campo para testar os modelos, atribuindo ainda, a má interpretação da complexidade do modelo, à falta de discussão franca e completa, das limitações e capacidades do modelo, conclui-se que o uso mais apropriado para os modelos é :

- (i) auxiliar a análise de dados;
- (ii) testar hipóteses, em conjunto com estudos de campo;
- (iii) melhorar a compreensão dos processos, suas interações e identificar as áreas de pouca interpretação;
- (iv) mais pesquisas em desenvolvimento teórico e testes antes da obtenção dos modelos de grande escala;
- (v) mais pesquisas em técnicas de medição para obtenção dos parâmetros estatísticos e determinísticos requeridos.

A Figura 2.2 representa os diversos Planos de Informação necessários para a execução do modelo proposto, obtidos da digitalização de mapas ou do tratamento de imagens de

satélite, ou ainda da análise efetuada por Modelos Numéricos do Terreno. Sob a forma de grade, caracterizando individualmente cada bacia elementar, as informações podem ser rapidamente introduzidas ou alteradas, possibilitando vários estudos com diferentes panoramas.

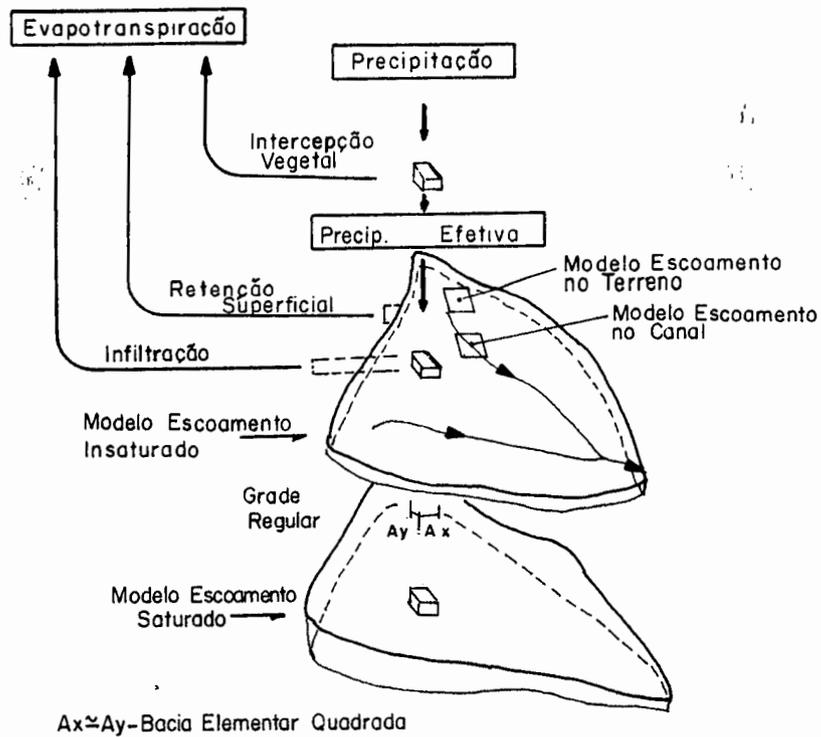


FIGURA 2.1 - Representação esquemática da estrutura de um modelo distribuído (adaptado de Beven, 1985).

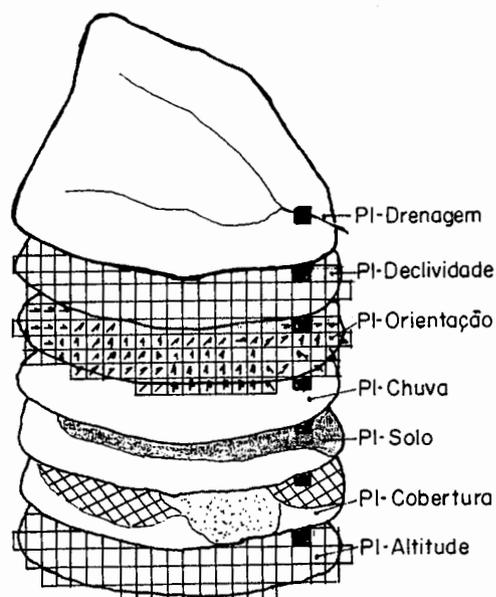


FIGURA 2.22 - Diagrama esquemático dos Planos de Informação.

3. IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS

3.1 Sistema de Informações Geográficas

Um sistema de informação e banco de dados de problemas ambientais deve, necessariamente, ser capaz de integrar informações espaciais de panoramas representativos provenientes de fontes e formatos variados e ser possível de ser interfaceado com modelos e outros instrumentos analíticos usados para análises. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são conjuntos de instrumentos básicos para manipulação, armazenamento e acesso às informações, oferecendo estrutura consistente para a análise da variação espacial e permitindo a exposição da informação e análises em aplicativos gráficos para edição de mapas e geração de símbolos (Moore et al., 1991).

A incorporação de um banco de dados geo-codificados para a consulta, análise e combinação das informações armazenadas e a possibilidade de visualização dos diversos níveis de informação, independentemente ou sobrepostos, são funções indispensáveis para o suporte computacional de um SIG.

Diferentes tipos de informações podem ser incorporadas em um SIG, cada uma delas ocupando um plano de informações próprio. Estes planos estão espacialmente interrelacionados (georreferenciados), de forma a permitir a realização de operações lógicas e matemáticas entre si e gerar novos planos derivados.

Um SIG é constituído de dois componentes:

Equipamento Computacional: é composto basicamente de unidade central de processamento (CPU), unidade de disco magnético, unidade de visualização, unidade de digitalização, traçador gráfico, podendo ser acopladas outras unidades de entrada e de saída;

Módulos de Programas Aplicativos: é composto de cinco módulos básicos: entrada e verificação da consistência dos dados, gerenciamento e armazenamento da base de dados, saída e apresentação de dados, transformação de dados e, interação com o usuário.

3.1.1 Arquitetura dos Dados

A informação geográfica pode ser representada em base cartográfica por três elementos básicos, ditos atributos espaciais: ponto, arco e área. Deverão ser referenciados para a localização geográfica, por um sistema cartográfico padrão, como a UTM (Universal Transverse Mercator), por exemplo.

Os atributos espaciais devem estar associados a identificadores que são atributos não-espaciais. Estão ligados através da legenda, representados por cores, símbolos ou hachuras, codificados e organizados de forma a permitir uma análise dos dados.

As entidades espaciais podem ser descritas de forma explícita (raster) ou de forma implícita (vetorial), a seguir elucidadas:

formato varredura ou raster: a partir de uma série de pontos numa grade, sendo associado a cada célula um valor numérico, sendo representado por uma cor ou um nível de cinza. Para a manipulação destas informações deve-se varrer a grade de dados. As imagens de satélites são fornecidas neste formato;

formato vetorial: a partir de uma série de vetores ou segmentos retilíneos definidos por pontos de inicialização, finalização e ligação, definindo, assim os “vetores” que representam a forma da área.

A representação vetorial é esteticamente superior, com gráficos precisos, apresentando estrutura de dados compacta e complexa, requisitando espaço de armazenamento menor na memória do computador. No entanto, a representação raster por possuir estrutura de dados simples, permite a alterações com maior facilidade, pois nesse só implica em apagar alguns valores da grade e substituí-los pelos novos, enquanto que na vetorial as coordenadas e conexões terão de ser substituídas. A principal vantagem do formato raster é a possibilidade de cruzamentos, com a sobreposição e combinação dos dados mapeados de satélite, facilitadas.

A estrutura de dados raster consiste de uma grade de células (**pixels - picture elements**), onde cada um dos elementos é associado com uma parcela quadrada do terreno. A **resolução** é dada pelo tamanho da célula no terreno. A **escala** do dado raster é a relação entre o tamanho da célula na base de dados e o tamanho da célula no terreno.

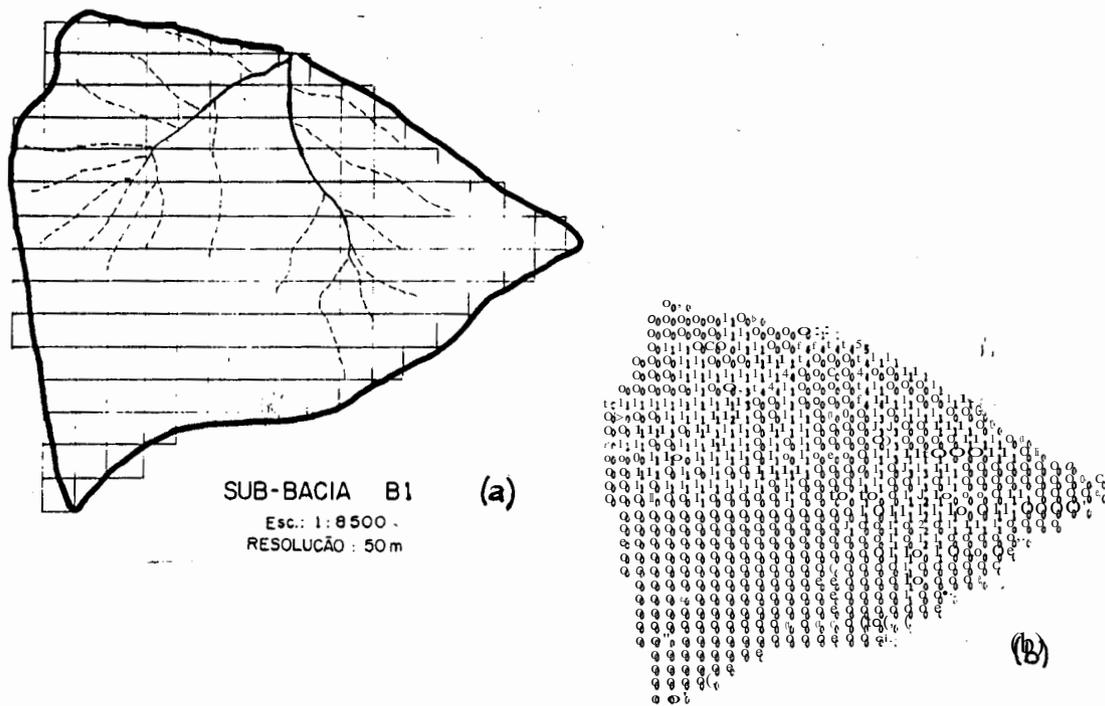


FIGURA 3.1 - Representação vetorial (a) e representação raster (b) de uma bacia hidrográfica.

3.2 Modelo Numérico do Terreno

Outro tipo de operação executada por um SIG, de grande utilidade em estudos envolvendo morfologia de um terreno, é a análise de Modelos Numéricos do Terreno (MNT). Uma matriz ordenada de números, representando um fenômeno ou grandeza de variação superficial contínua, por meio de pontos individuais, caracteriza um MNT. Quando a matriz ordenada de números representa a distribuição espacial das altitudes acima de alguma referência arbitrária de um terreno, têm-se um Modelo de Altitude do Terreno (Moore et al., 1991).

As informações referentes às altitudes podem ser, descrito segundo Burrough (1986), por modelos matemáticos ou por modelos de imagem discretizados em ponto e/ou linhas. Os modelos matemáticos são funções tridimensionais contínuas que aproximam a superfície do terreno. Os modelos de imagem podem ser de linhas ou de pontos. Um MNT é exemplificado na Figura 3.22.

O conjunto de linhas obtido da digitalização de mapas, gera o modelo de isolinhas. Este não é apropriado para o cálculo de declividades e da orientação azimutal de cada ponto da

superfície. Por essa razão, costuma-se convertê-lo de modelo de linha para o formato de matriz de altitudes discretizada (modelo de pontos), utilizando processos de interpolação.

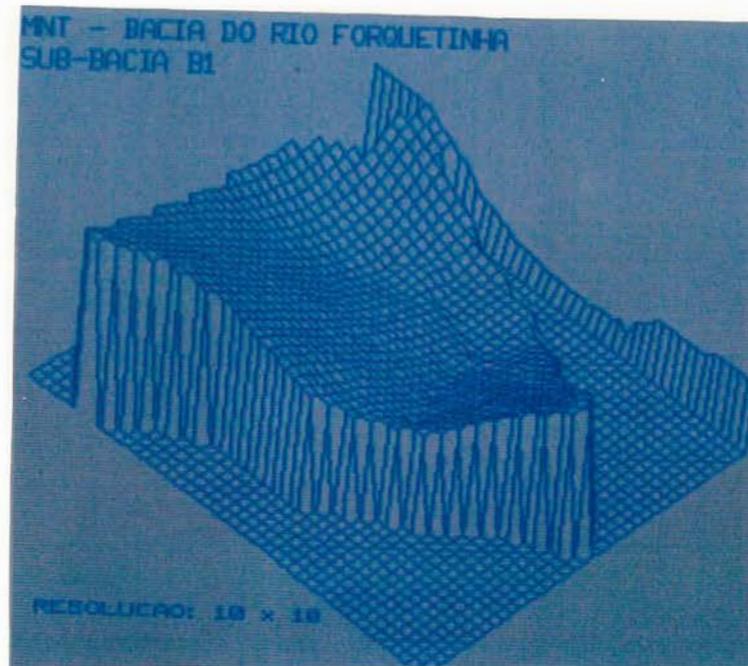


FIGURA 3.2 - Visualização tri-dimensional de um MNT.

3.2.1 Obtenção da Matriz de Altitude

A estrutura ideal para a aquisição e análise da rede de dados de altitude de um MNT poderá ser obtida por três métodos distintos: de grades regulares, de redes irregulares trianguladas e baseados em curvas de nível (Moore et al., 1991).

A representação por pontos consiste numa matriz de altitudes, regular quadrada ou retangular. Este tipo de modelo permite a geração de isolinhas, de ângulos de declividades e orientação, de sombreamento de relevo e delineamento de bacias. É o método mais eficiente computacionalmente, sendo mais indicado para utilização em áreas de relevo uniforme.

Outro modo de representação da matriz de altitude é através da rede irregular triangulada (TIN - Triangulated Irregular Network). Esta rede é criada a partir de triângulos irregulares adjacentes, conectados por pontos críticos da superfície, sendo mais adequado para o detalhamento de áreas com relevo mais complexo, pois possibilita a captura de mudanças abruptas, como por exemplo, superfícies construídas (Djokic e Maidment, 1991).

O terceiro método de representação da matriz de altitude baseia-se em curvas de nível, isto é, em isolinhas de altitudes específicas, digitalizadas e armazenadas como Linhas Gráficas Digitais, orientando-se pelas linhas do escoamento. O modelo de análise do terreno TAPES-C (Topographic Analysis Program for the Environmental Sciences: Contour) (Moore et al., 1988 apud Grayson et al., 1992) utiliza este tipo de representação, adequado para análise de bacias hidrográficas, sendo restrito seu uso pelo grande esforço computacional.

Os interpoladores são utilizados para a estimativa dos valores de locais sem dados, a partir de dados amostrados (pontos) irregularmente distribuídos, criando uma matriz regular de altitudes. Em se tratando de modelagem de altitudes de superfície, o interpolador mais apropriado é o de variação espacial gradual. Este é um modelo descrito por uma superfície contínua matematicamente definida.

Os interpoladores de variação gradual incluem técnicas como séries de Fourier e análises de superfícies de tendências que utilizam o método de ajuste global, mais apropriados como uma análise preliminar para a detecção das feições principais do terreno sendo necessário, em seguida, o uso de um interpolador local. Técnicas que utilizam o método de ajuste local mais indicado para o estudo de fenômenos com pequeno intervalo de variação, pois utilizam dados localizados na vizinhança do ponto a ser interpolado, são funções splines, métodos de média móvel e o método de otimização da autocovariância espacial (kriging).

As funções splines não são adequadas para modelação de superfícies devido ao grande número de pontos e a distribuição espacial irregular. O método kriging baseia-se no reconhecimento que a variação espacial de qualquer variável regionalizada é irregular, podendo ser melhor descrita por uma superfície estocástica. Embora seja eficiente não é aconselhado para geração do MNT devido ao custo computacional muito elevado, dado o grande número de amostras envolvidas. O interpolador espacial gradual de ajuste local do tipo média móvel, consiste na ponderação da média das cotas em função da distância que separa os pontos amostrados e o ponto a ser estimado. Visando otimizar o tempo de computação para a geração do MNT, define-se um raio de busca mínimo e a quantidade máxima de pontos mais próximos (Burrough, 1986).

3.2.2 Estruturas de Drenagem

A partir da matriz de altitude do MNT é possível a definição da bacia hidrográfica, estabelecendo o divisor de água e a rede de drenagem, através da determinação da declividade e orientação azimutal de cada célula. O divisor une os pontos de máxima cota entre as bacias, atravessando o curso de água somente no ponto de saída.

Cada célula da grade do MNT corresponde um valor que está representando a altitude (ou cota) média da região por ela ocupada. A diferença entre a cota central e as células vizinhas pode ser implementado através de algoritmo simples que utiliza os oito vizinhos mais próximos, definindo desta forma, a rede de drenagem.

Um MNT antes de qualquer tratamento, apresenta depressões no terreno, decorrentes da digitalização ou interpolação e devem ser preenchidas, antes da determinação da estrutura de drenagem. Os métodos corretivos são propostos por Mark et al. (1984), com algumas variações de Jenson e Domingue (1988) e utilizados por Risso (1993). É necessário, inicialmente detectar as depressões isoladas (quando uma só célula dentro da vizinhança apresenta depressão). A este primeiro processamento chama-se suavização do MNT. O segundo passo será o preenchimento das depressões formadas por mais de uma célula, devendo-se verificar o surgimento de “alagamentos” criados por áreas planas.

Mark (1984), pesquisou a possibilidade de obter um algoritmo para simular o escoamento das águas sobre um MNT por estudos geomorfológicos. O algoritmo assemelha-se com a definição do Teorema de Cauchy que estabelece que a menor distância entre qualquer ponto sobre uma superfície curva e um ponto de cota inferior a ele, é a linha de descenso mais íngreme. A posição de saída da rede de drenagem e alocação de uma célula de partida são definidas, a altitude de cada célula é comparada com as das suas oito vizinhas mais próximas dentro de uma janela de 3x3 células, exceto para célula de saída. A célula vizinha na qual o gradiente é maior é identificada e o acúmulo de água (expresso como função do número de células atravessadas e a área de cada célula) é atribuído à célula central. As linhas de drenagem podem ser codificadas numa escala de níveis de cinza de acordo com o volume de água que passe sobre elas. Para determinação dos divisores de água de uma bacia, Mark et al. (1984) segue a metodologia, a partir do cálculo do gradiente local e da orientação de cada célula. Descrição mais detalhada poderá ser encontrada nas publicações dos autores citados.

3.3 Sensoriamento Remoto

As informações referentes a alvos naturais, tais como corpos de água, vegetação e solo na superfície terrestre, podem ser coletadas e processadas através das técnicas de sensoriamento remoto. A partir de medições feitas à distância, um sistema sensor registra a energia refletida e/ou emitida pelos vários elementos que compõe o terreno e quantifica em valor numérico.

Os sistemas sensores mais utilizados baseiam-se na energia eletromagnética refletida e/ou emitida pelos alvos em diversas regiões do espectro eletromagnético. Estes sensores são montados em aeronaves ou satélites de sensoriamento remoto como o LANDSAT (NOAA e outros) e SPOT (Système Probatoire de Observation de La Terre). Dependendo da fonte de energia utilizada no processo são chamados passivos (quando a fonte é natural como a energia solar) ou ativos (quando a fonte é fornecida como o radar).

O espectro eletromagnético ótico ($0,30 \mu\text{m}$ a $15,0 \mu\text{m}$) é a região do espectro eletromagnético onde a absorção atmosférica é relativamente pequena, caracterizando-se por ter uma boa transmitância à Radiação Eletromagnética (REM). Assim, praticamente todas as atividades em sensoriamento remoto podem ser utilizadas com maior facilidade. As faixas que compõe o espectro eletromagnético são representadas na Figura 3.3.

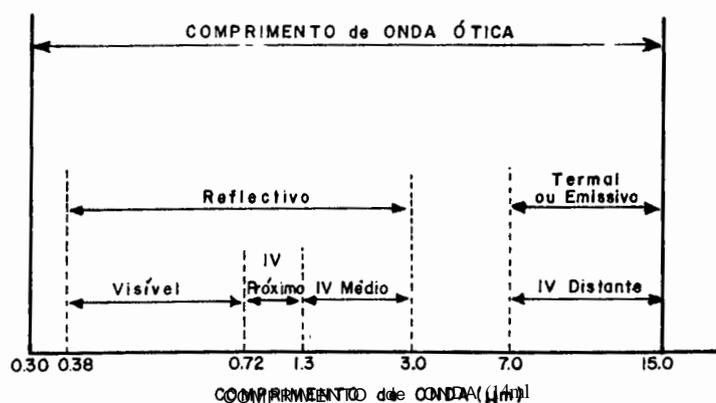


FIGURA 3.3 - Faixas do Espectro Eletromagnético Ótico. (fonte: Swaine e Davis, 1975)

A região referida como **Reflectivo** (entre $0,38$ e $0,72 \mu\text{m}$) é a porção do espectro onde a energia é, basicamente, radiação originada do Sol e refletida pelos objetos na superfície da

Terra. Na região do Termal (7,00 e 15,0 μm), a principal componente se origina da radiação eletromagnética emitida pelo objeto, na superfície da Terra, embora uma parcela seja oriunda energia refletida.

Para a definição do sistema sensor a ser utilizado as resoluções *espacial*, *espectral* e *radiométrica* oferecidas, devem ser observadas. **Resolução**, conforme Novo (1988), é uma medida da habilidade que um sistema sensor possui de distinguir entre respostas que são semelhantes espectralmente ou próximos espacialmente.

Resolução Espacial: referente às dimensões lineares da área observada, uma vez que a energia registrada pelo sensor não se refere a um determinado ponto, mas a um conjunto de pontos existentes na área estabelecida, portanto quanto menor o tamanho do pixel, maior a homogeneidade, melhor será a resolução espacial;

Resolução Espectral: referente ao número de intervalos e ou bandas espectrais que o sistema sensor pode discretizar, bem como a largura de cada intervalo. Quanto maior o número de bandas espectrais do sensor e menor a sua largura, maior será a sua capacidade de identificar a natureza e condições de diferentes objetos a partir da correspondente curva de resposta espectral, significando maior resolução espectral;

Resolução Radiométrica: referente ao número de intervalos do contador digital (valor numérico que quantifica a radiância, visualizado em níveis de cinza) indicada pelo número de “bits” por pixel. Quanto mais “bits”, maior o número de níveis do contador digital (Schowengerdt, 1983).

3.3.1 Sistema LANDSAT TM (Thematic Mapper)

Os satélites da série LANDSAT já lançados até hoje, foram em número de 5: em 1972 (L1), 1975 (L2), 1978 (L3), 1981 (L4) e 1984 (L5). Os três primeiros satélites conduzindo sensor imageador multiespectral MSS (MultiSpectral Scanner) que, basicamente realiza a varredura do terreno com o auxílio de um espelho que oscila perpendicularmente ao deslocamento do satélite. Os sistemas LANDSAT 4 e 5 carregam mais um sistema sensor, é o Thematic Mapper (TM) que é um sensor de 2^a geração com dispositivo mecânico de

varredura (mapeador temático), com importantes modificações de características espectrais, espaciais e radiométricas, em relação ao sensor MSS.

O sensor TM oferece 7 bandas espectrais, enquanto o MSS dispõe de 4. Como resolução radiométrica apresenta 8 bits por pixel, o que implica em 256 valores distintos para o contador digital, sendo que para o MSS de 6 bits por pixel resultando em 64 níveis. Possui 3 bandas no visível, 1 no infravermelho próximo, 2 no infravermelho médio e 1 no infravermelho termal, totalizando 7 bandas espectrais como observa-se na Tabela 3.1 e Figura 3.4. Quanto a resolução espacial, de 120 m para a banda 7 (infravermelho termal) e 30 m para as outras 6 bandas. O sensor MSS apresenta resolução de 80 m para as 4 bandas. A altitude da órbita do satélite LANDSAT 4 e 5 é de 705 km, cobrindo uma faixa de 185 km de largura.

3.3.2 Características de Alvos

O produto obtido pelo sensor é colocado na forma de imagem digital, adequada à análise computacional. Esta imagem consiste em um arranjo bidimensional de células elementares **pixels**, organizadas em forma matricial e gravadas em fitas magnéticas, meio que já está sendo abandonado, sendo substituído por como os CDs. A cada pixel está associado um valor digital que representa a superfície terrestre na correspondente banda espectral. Depois dos dados serem expostos matricialmente, podem ser interpretadas as características espaciais dos dados, tais como tamanho, forma e textura.

Através de imagens digitais obtidas simultaneamente em várias bandas espectrais, identificam-se as características físicas dos alvos, sua distribuição espacial e, quando se dispõe de imagens obtidas em datas distintas, as variações que ocorrem ao longo do tempo. Esta variabilidade temporal ou mudanças sazonais ocorrem pela ação antrópica e da própria natureza, havendo, portanto, a necessidade de se monitorar e analisar dados de diferentes datas para se determinar onde e como se alteram as respostas espectrais.

Na aplicação da teoria de reconhecimento de padrões para dados obtidos por sistemas multiespectrais, com o objetivo de identificação e mapeamento de várias características da superfície da Terra, o princípio básico é que tipos de coberturas de interesse (vegetação, solo, água, ...) podem ser separados conforme as suas características de resposta.

A reflectância espectral da vegetação é distinta e bastante variável com o comprimento de onda. Na banda do visível, domina a absorção da radiação incidente pela pigmentação da planta, especialmente carotenóides e a clorofila. Na banda do infra-vermelho próximo há um domínio pela alta reflectância da vegetação devido à interferência da estrutura celular. A região que é dominada pela reflectância causada pelo conteúdo de águas das folhas encontra-se no infra-vermelho médio (Novo, 1988).

No caso dos solos, as respostas espectrais são menos complicadas, devido ao fato de que estes absorvem ou refletem a energia emitida, enquanto que a vegetação transmite através de sua matéria. No entanto, o solo é uma mistura de materiais com diferentes propriedades físico-químicas que podem afetar as características de absorvância e reflectância deste material como um todo. Os teores de umidade, matéria orgânica, óxidos de ferro, a percentagem de argila, silte e areia são influências significantes em sua resposta espectral. A água em seu estado líquido apresenta baixa reflectância na porção visível e absorve na região do infravermelho. Em forma de nuvens apresenta alta reflectância em parte do visível até o infra-vermelho médio.

A Figura 3.4 mostra as curvas de reflectância espectral média da vegetação, dos solos e da água. Na Tabela 3.1 são apresentadas as aplicações específicas das diferentes faixas do espectro e os alvos que melhor identificam.

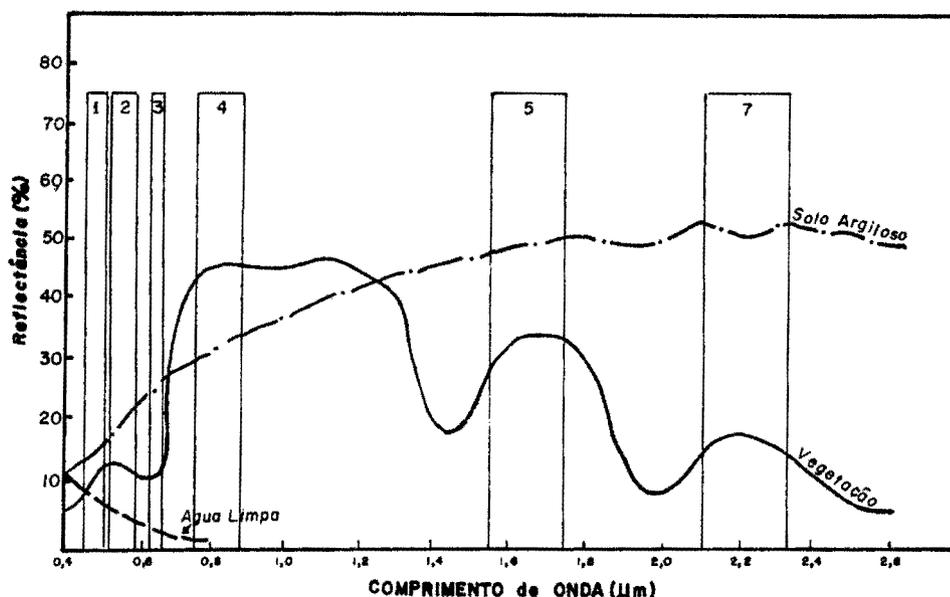


FIGURA 3.4 - Curvas de Respostas Espectrais de Alvos com os canais espectrais do sensor TM. (fonte: Swain e Davis, 1978).

TABELA 3.1 - Principais Aplicações das Bandas do Sensor TM do Satélite LANDSAT-5.

BANDA	INTERVALO ESPECTRAL (μm)	PRINCIPAIS APLICAÇÕES
1	0,45 - 0,52	→ mapeamento de águas costeiras; → diferenciação entre solo e vegetação; → diferenciação entre tipos de vegetação.
2	0,52 - 0,60	→ reflectância da vegetação verde sadia.
3	0,63 - 0,69	→ absorção da clorofila; → diferenciação de espécies vegetais.
4	0,76 - 0,90	→ levantamento da biomassa; → delineamento de corpos d'água
5	1,55 - 1,75	→ medidas de umidade da vegetação; → diferenciação de tipos de culturas; → medidas de umidade do solo; → diferenciação entre nuvens e neve.
6	10,40 - 12,50	→ mapeamento de estresse térmico em plantas; → outros mapeamentos térmicos.
7	2,08 - 2,35	→ mapeamento de formações rochosas; → mapeamento hidrotermal.

fonte: Novo, 1988.

3.3.3 Classificação Temática de Imagens

O mapeamento das diversas classes de cobertura da superfície de uma determinada cena pode ser executado de forma eficiente em computadores. Neste processo cada pixel da imagem é examinado e avaliado numericamente, com base em seus atributos. Existem métodos convencionais de interpretação de imagens como, por exemplo, a fotointerpretação que se baseia na capacidade de um ser humano treinado assimilar dados disponíveis em três ou menos bandas espectrais de todo um conjunto disponível. É evidente que o ser humano é incapaz de discriminar a resolução radiométrica disponível em qualquer sistema sensor (LANDSAT-MSS com 64 níveis ou LANDSAT-TM com 256 níveis), pois é incapaz de distinguir 64 ou mais tons de cinza, ficando muito abaixo do poder de discriminação de um computador.

A classificação de cada pixel da imagem de acordo com suas características espectrais, em alguma das classes identificadas (ou em nenhuma delas) é estabelecida por algoritmos específicos. As classes são definidas por temas e associadas a cores ou níveis de cinza que geram uma imagem temática a partir de uma imagem multiespectral. Existem duas formas principais de se abordar a classificação:

Classificação Supervisionada: consiste na partição do espaço multiespectral em regiões, associadas as classes, utilizando funções discriminantes. Essas funções podem ser de natureza probabilística ou não, sendo necessárias amostras de cada classe (áreas de treinamento), para estimativa dos parâmetros que ocorrem nas funções. As classificações por Máxima Verossimilhança e por Mínima Distância são supervisionadas, sendo a segunda um caso especial da primeira.

Classificação Não Supervisionada: consiste em algoritmos computacionais que localizam as ocorrências naturais de grandes concentrações de pixels com padrões semelhantes de uma imagem. Estas aglomerações (“clustering”) são assumidas como classes desta imagem. Nesta classificação não há a necessidade de treinamento, devendo o operador fornecer o número de aglomerados (ou, idealmente, classes existentes na cena). Essa escolha é muitas vezes difícil, podendo prejudicar o processo de classificação. Deve-se prever, no entanto, que estas áreas podem não corresponder às áreas de interesse. Os mais conhecidos algoritmos são o K-Médias e ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques A).

O método de classificação supervisionada por máxima verossimilhança gaussiana baseia-se na hipótese gaussiana, na qual cada classe é descrita por uma função densidade de probabilidade multivariada normal. O vetor $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ que descreve cada pixel x_i na banda i , é substituído na função densidade de probabilidade associada a cada classe ou tipo de cobertura presentes na cena representadas por w_j (com $j = 1, 2, \dots, m$ classes). O pixel é atribuído à classe que gerar o maior valor na função densidade de probabilidade. A classificação da imagem é feita pixel-a-pixel visando minimizar o erro, isto é, a perda esperada resultante da classificação do pixel x na classe w_j quando a verdadeira classe é w_k (Campana, 1992).

O método por mínima distância, também de grande utilização, conforme Schowengerdt (1983), consiste em atribuir a cada pixel desconhecido à classe cuja média esteja mais próximo no espaço espectral. Este processo é, na verdade, uma simplificação do anterior, para o qual as suposições seguintes são assumidas:

- (i) todas as classes têm iguais probabilidades “a priori”;

- (ii) as bandas espectrais utilizadas são do tipo não correlacionadas, isto é, a matriz de covariância para as classes consideradas é diagonal e as variâncias são idênticas para todas as bandas espectrais;
- (iii) as matrizes covariância devem ser iguais para todas as bandas espectrais.

Essas hipóteses dificilmente são satisfeitas, o que implica numa classificação menos precisa.

A área de treinamento deve ser uma área representativa de cada classe, observando-se que quanto maior a heterogeneidade de uma amostra, maior será a chance de se classificar elementos não desejados, comprometendo a representatividade estatística. Evidencia-se assim, a importância do prévio conhecimento sobre o comportamento espectral dos alvos de interesse, assim como da distribuição espacial destes (conhecimento de campo), pois é através das amostras que serão extraídos os parâmetros estatísticos (média e variância) que servirão de condições de contorno para o classificador. O treinamento não gerará, necessariamente, classes espectralmente separáveis, pois alvos diferentes podem possuir respostas espectrais próximas entre si, com áreas de superposição no espaço multi-espectral.

3.3.4 Classificador K-Médias

A classificação de imagens multiespectrais com o algoritmo K-médias, utiliza o critério “centro da classe mais próxima” e baseia-se na minimização da soma do quadrado da distância euclidiana (isto é, distância dos pontos ao centro do agrupamento). Este classificador foi instrumento no presente trabalho, devido ao desconhecimento de campo para as datas que se dispõe as imagens de satélite.

Nas imagens terrestres tomadas por satélite, cada ponto é caracterizado por um vetor de características, onde cada uma delas representa a radiância recebida pelo satélite em uma determinada banda do espectro. A classificação consiste em atribuir o pixel à classe mais adequada, segundo o critério do classificador. Segundo Tou e Gonzales (1974), consiste dos seguintes passos :

1. Escolher os centros iniciais dos k agrupamentos ("clusters") : $\mu_1(1), \mu_2(1), \dots, \mu_k(1)$. Estes são arbitrários e, normalmente selecionados como as primeiras k amostras do conjunto de elementos a classificar;
2. Distribuir os elementos entre os k agrupamentos, por meio de processo iterativo, usando a relação:

$$x \in S_j(k) \text{ se } |x - \mu_i(k)| < |x - \mu_j(k)|, \text{ com } i = 1, \dots, k \text{ e qualquer } j \neq i \quad (3.1)$$

onde: S_j - agrupamento j ;
 x - elemento ;
 $\mu_i(k)$ - centro do agrupamento ;
 $|x - \mu_i(k)|$ - distância euclidiana.

Se um elemento apresentar a mesma distância com relação a mais de um agrupamento, a situação é resolvida arbitrariamente;

3. Calcular a partir dos resultados obtidos, os novos centros $\mu_j(k+1)$, $j = 1, \dots, k$, tal que a soma do quadrado das distâncias em relação de todos os pontos em $S_j(k)$ para o novo centro seja minimizada:

$$J_j = \sum_{x \in S_j(k)} \|x - \mu_j(k+1)\|^2, \quad \text{com } j = 1, 2, \dots, k \quad (3.2)$$

onde $\mu_j(k+1)$ é a média de $S_j(k)$. Portanto, o novo centro do agrupamento é dado por :

$$\mu_j(k+1) = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in S_j(k)} x, \quad \text{com } j = 1, 2, \dots, k \quad (3.3)$$

onde n_j - número de elementos de $S_j(k)$;

4. Se $\mu_j(k+1) = \mu_j(k)$ para $j = 1, 2, \dots, k$, o algoritmo atinge a convergência e o procedimento é concluído, caso contrário voltar para o passo 2.

4. MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO

ANSWERS - “Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation” (Beasley e Huggins, 1981) é um modelo indicado para simular o comportamento de bacias hidrográficas cujo principal uso do solo é a agricultura. Seu objetivo originalmente é de planejamento e avaliação de várias estratégias para o controle da poluição de fonte não pontual em áreas de culturas intensivas, funcionando como um mecanismo de controle do transporte de poluentes da rede de drenagem.

Uma característica fundamental é o fato de ser um modelo distribuído e orientado para eventos determinados. Estas características operacionais geralmente trazem uma melhor compreensão das interações hidrológicas e de qualidade da água envolvidas numa bacia, permitindo ao usuário a descrição espacial e temporal da física desses processos. ANSWERS incorpora as influências dos controles de parâmetros variáveis espacialmente, como topografia, solos, cobertura e uso do solo, de uma maneira interna em seus algoritmos.

Uma vantagem de um modelo distribuído é a habilidade inerente em simular, simultaneamente, condições para todos os pontos na bacia hidrográfica, sem ignorar a influência da localização topográfica de fatores variantes espacialmente, dentro da bacia hidrográfica, aumentando a precisão da informação de entrada. Além disso, permite a simulação de outros processos que mudam tanto espacial quanto temporalmente por toda a bacia hidrográfica.

4.1 Estrutura do Modelo

Uma bacia hidrográfica a ser modelada, deverá ser considerada composta por elementos, de forma quadrada, como se apresenta na Figura 4.1, assim definida para facilitar a preparação dos arquivos de dados e a conveniência computacional.

As relações caracterizando a água e a produção de poluentes necessitam somente do comportamento de uma área elementar pequena e uniforme. Os parâmetros podem variar sem restrições entre os elementos de forma que a variabilidade espacial possa, facilmente, ser

representada. Elementos individuais, atuam como um sistema composto a partir de dados topográficos de cada elemento, delineando as direções de escoamento, de forma consistente com a topografia da bacia. A interação entre os elementos ocorre, pelo fato do escoamento superficial, a drenagem subsuperficial e o escoamento subterrâneo de cada elemento permitir o aflúvio aos elementos adjacentes.

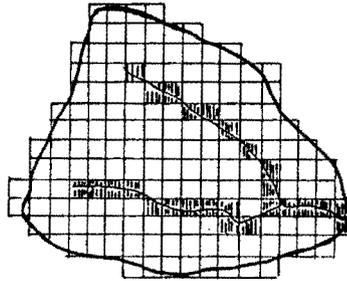


FIGURA 4.1 - Bacia hidrográfica dividida em elementos.

Basicamente, o ANSWERS consiste de quatro módulos: precipitação, infiltração, caracterização do escoamento e movimento/destacamento de sedimentos, os quais são interfaceados de modo a proporcionar previsões de respostas hidrológica (base conceitual por Huggins e Monke (1966)) e de erosão (baseado na equação da continuidade por Foster e Meyer(1972)) de uma dada área, citados por Beasley e Huggins (1981).

O tamanho elementar será definido de forma que as variáveis hidrossedimentológicas possam ser assumidas como uniformes dentro do elemento. No entanto, as condições podem variar muito dentro de um elemento para o outro. Vários fatores importantes influenciam o escoamento total de uma bacia para uma chuva constante.

A natureza distribuída do modelo é ao mesmo tempo vantagem e o fator limitante. Ela possibilita representar com maior precisão as variações espaciais dos parâmetros e variáveis do sistema. No entanto, a complexidade de seu arquivo de entrada e a discretização limitam o número de elementos a serem caracterizados e, conseqüentemente, o tamanho da bacia a ser simulada. Na prática, utilizam-se tamanhos de elementos entre 1 e 4 ha. até bacias inferiores a 10.000 ha..

4.2 Relacionamento dos Componentes

Todas as relações específicas selecionadas para este modelo, exceto o tempo de integração da equação da continuidade são incorporados em módulos, como pode ser visto na Figura 4.2. As modificações ou substituições das relações tais como infiltração e produção de sedimentos, não afetam os algoritmos das outras relações. Enfim, cada qual é suficientemente independente das demais subrotinas, permitindo ao usuário fazer as substituições convenientes ou anexar relações para simular outros processos importantes para aplicações específicas.

4.2.1 Precipitação e Intercepção

A precipitação efetiva depende da chuva medida pelos pluviógrafos e da taxa de intercepção vegetal. A precipitação efetiva para cada estação de medição de chuva e para cada cobertura vegetal é calculada pela função RAIN do modelo apresentada na Figura 4.3. Teoricamente, pode-se ter um coeficiente de Thiessen para cada elemento, mas na formulação normal do modelo, somente um total de 4 coeficientes são admitidos. A intercepção é obtida do volume total de água, subtraindo-se a precipitação total, a retenção da cobertura vegetal e a evaporação durante o evento. A intercepção, é considerada, geralmente, como parte insignificante na maioria dos eventos chuvosos. No entanto, seu efeito relativo pode ser importante quando o escoamento superficial é pequeno. As perdas por evaporação durante o evento podem ser negligenciáveis.

A intercepção máxima potencial (PIT), fornecida como dado de entrada, representa a capacidade de retenção das folhas em unidade de profundidade (volume/ unidade de área). Em cada incremento de tempo em que o volume de intercepção não for satisfeito, a precipitação retida é calculada como intercepção incremental (RIT), isto é, o produto da taxa de precipitação e da área coberta pela vegetação. O valor da intercepção potencial e a precipitação efetiva são correspondentemente reduzida até que toda a intercepção retida seja satisfeita. Neste estágio, PIT é igual a zero e a precipitação efetiva é igual a precipitação medida até o final da simulação.

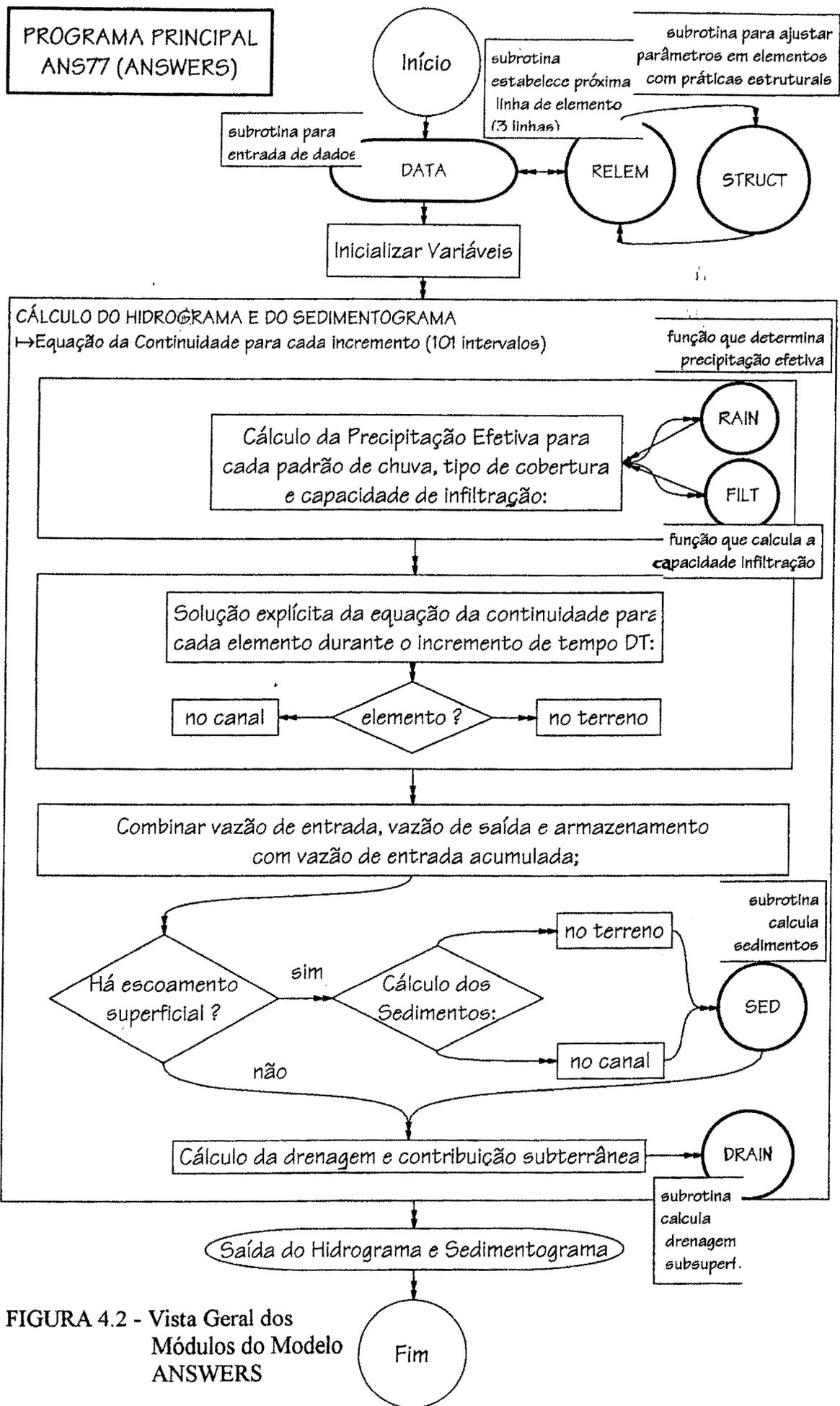


FIGURA 4.2 - Vista Geral dos Módulos do Modelo ANSWERS

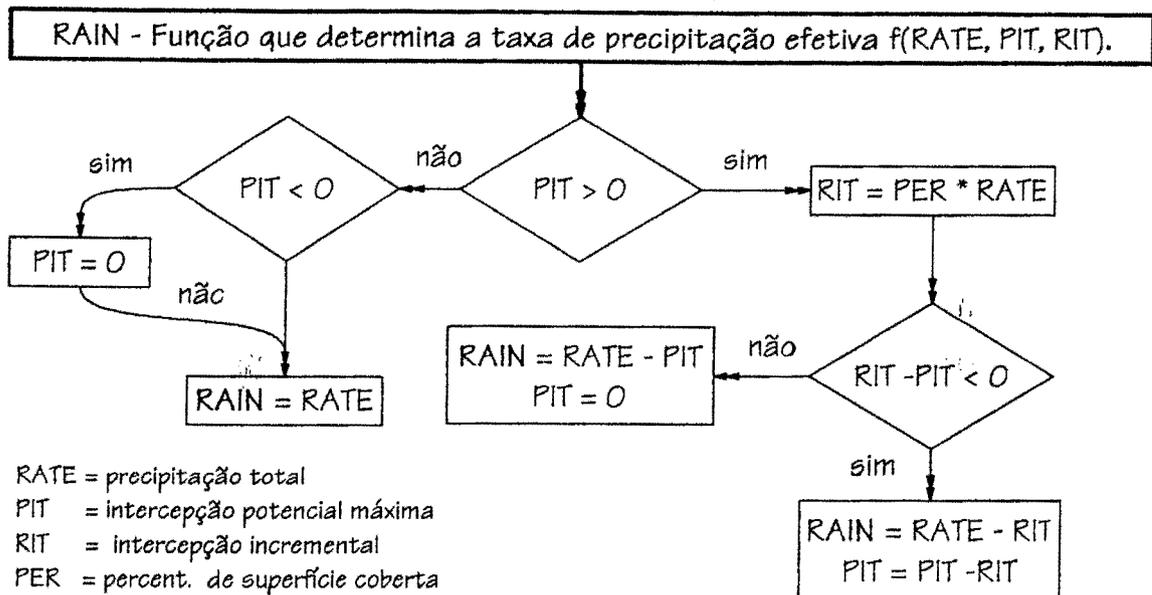


FIGURA 4.3 - Algoritmo da função que calcula a precipitação efetiva.

4.2.2 Infiltração

A infiltração afeta de forma marcante a resposta hidrológica de uma bacia, principalmente em chuvas de baixa a média intensidade. As taxas de infiltração maiores, reduzem tanto o volume total quanto o pico do escoamento superficial. A relação de infiltração no modelo é a desenvolvida por Holtan (1961) e Overton (1965) (apud Beasley e Huggins, 1981). É a que segue:

$$F_{MAX} = FC + A * \left(\frac{PIV}{TP} \right)^P \quad (4.1)$$

com $PIV = S - F$

onde F_{MAX} - capacidade de infiltração no tempo t (em mm/h);

FC - capacidade de infiltração mínima do solo (em mm/h);

A - capacidade de infiltração máxima em excesso a FC (em mm/h);

PIV - volume de água armazenado dentro do controle de infiltração antes da saturação (em %);

TP - porosidade total do solo (em %);

P - coeficiente relacionando o decréscimo da taxa de infiltração com o aumento da umidade (adimensional);

S - armazenamento potencial do solo acima de uma camada limite (em %);

F - volume total de água infiltrada (em %).

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 equação de Holtan requer seis parâmetros de infiltração para um solo específico: porosidade total (TP), capacidade de campo (FCAP), profundidade da zona de controle de infiltração (DF), taxa de infiltração em regime permanente (FC) e os dois coeficientes não permanentes (A e P).

A taxa de movimento de água dentro de uma zona de controle é dada em função da umidade existente nesta zona. As duas condições que existem são as seguintes: quando a umidade da zona de controle é menor que a capacidade de campo, a água não sai desta zona; quando a umidade da zona de controle excede a capacidade de campo, a água move-se desta zona de acordo com a equação:

$$DR = FC \left(1 - \frac{PIV}{GWC} \right)^b \quad (4.2)$$

com $GWC = TP - FC$

onde DR - taxa de drenagem do volume de controle (em mm/h);

FC - capacidade de infiltração mínima do solo (em mm/h);

PIV - volume de água armazenado dentro do volume de controle de infiltração antes da saturação (em %);

GWC- volume máximo de água gravitacional (em %);

TP - porosidade total (em %);

b - coeficiente de drenagem (adimensional).

O algoritmo esquemático da infiltração é apresentado na Figura 4.4. A água que deixa a zona de controle, contribui para os escoamentos subsuperficial e/ou subterrâneo. Alguns elementos especificados como elementos de drenagem dirigem o fluxo para elementos de drenagem vizinhos. A soma destas taxas constituem a taxa total de drenagem de cada elemento. Quando quer que esta taxa exceda seu coeficiente de drenagem (igual a zero para elementos sem drenagem subsuperficial), o volume em excesso a este limite conta para o escoamento subterrâneo.

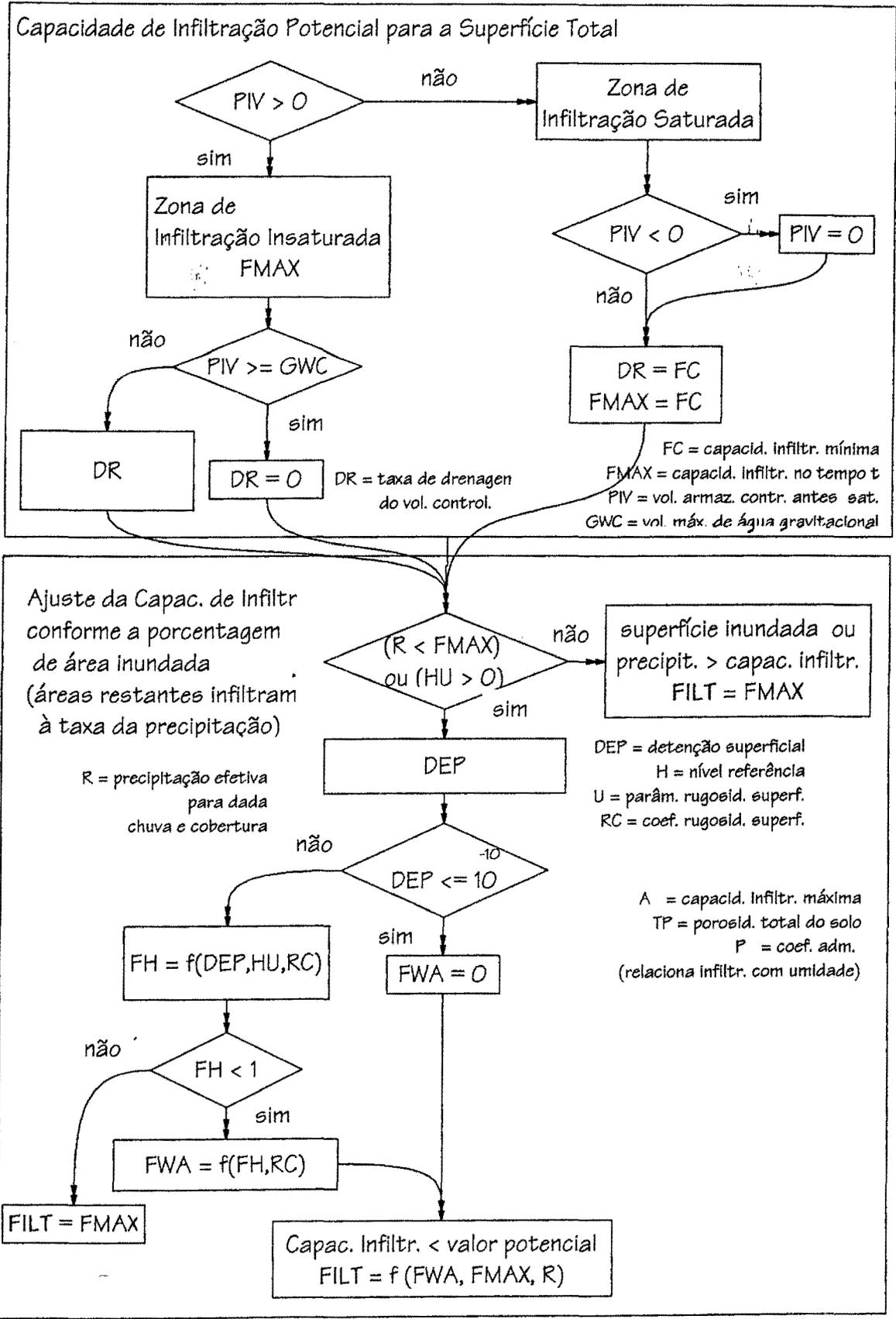


FIGURA 4.4 - Algoritmo da função que calcula a infiltração.

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.

4.2.3 Caracterização do Escoamento

Dentro do limite topográfico, a bacia hidrográfica é dividida numa matriz irregular de elementos quadrados, os quais atuam como um plano de escoamento com a declividade e direção de escoamento fornecidas pelo usuário indicando como a água produzida em cada elemento escoar para os elementos adjacentes.

Os elementos que contém canal, assumem um comportamento duplo, atuando 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 do 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.

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, em graus, no sentido anti-horário do eixo horizontal. O exemplo na Figura 4.5 mostra que a direção da declividade está no quarto quadrante. O ângulo da direção da declividade é igual a 270° mais o ângulo ANG. A fração do escoamento que segue para o elemento da linha adjacente, RFL, é:

$$RFL = \frac{\text{tg}(\text{ANG})}{2} \quad \text{se } \text{ANG} \leq 45^\circ \quad (4.3)$$

$$RFL = 1 - \frac{\text{tg}(90^\circ - \text{ANG})}{2} \quad \text{se } 45^\circ < \text{ANG} < 90^\circ \quad (4.4)$$

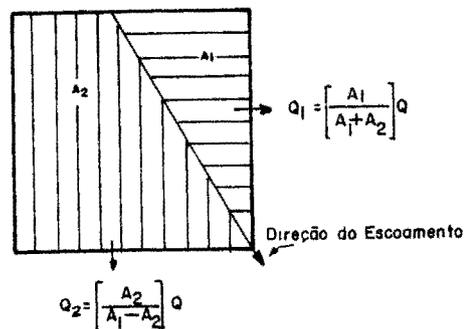


FIGURA 4.5 - Particionamento do escoamento na superfície.

O escoamento restante segue para o elemento da coluna adjacente. O fluxo é particionado entre os elementos adjacentes de forma proporcional a sua área de influência.

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 da bacia, a cada incremento de tempo.

Assim:

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad (4.5)$$

onde I - fluxo afluente a um elemento, advindo da chuva e de elementos adjacentes;

Q - fluxo defluente;

S - 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, com coeficientes diferentes, tanto para escoamento superficial quanto para escoamento concentrado em canais. Para o escoamento superficial, o raio hidráulico é suposto como igual à profundidade média de detenção superficial e a largura medida na direção perpendicular à direção de escoamento.

A retenção superficial tem um efeito pronunciado sobre o escoamento superficial e as características de drenagem da bacia. O solo rugoso pode armazenar uma grande quantidade de precipitação, a qual resulta em quantidades menores de água disponível para o escoamento superficial e quantidades de água maiores para infiltração e/ou evaporação.

O escoamento de base que provém do lençol freático, é simulado de forma simplificada no modelo. A água infiltrada que atravessa a zona de drenagem é assumida como entrada de um reservatório de armazenamento subterrâneo, de onde sairá para os segmentos de canal a uma taxa proporcional ao volume de armazenamento acumulado.

A detenção superficial é o volume de água que deve acumular-se para suprir o fluxo superficial podendo ser calculada pela seguinte equação:

$$DEP = HU * \left(\frac{H}{HU} \right)^{\frac{1}{RC}} \quad (4.6)$$

onde DEP - volume de água armazenado (detenção superficial) (em mm);

H - nível a partir de uma referência (datum) (em mm);

HU - parâmetro de rugosidade da superfície (em mm);

RC - coeficiente de rugosidade superficial (adimensional).

A profundidade de detenção é calculada como o volume total da água superficial, menos o volume de retenção (que pode infiltrar somente), dividido pela área do elemento. Isto implica que o volume de retenção específico total de um elemento, seja completado antes que qualquer água torne-se disponível para detenção superficial e escoamento superficial.

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

Permite-se especificar a declividade, largura e coeficientes de rugosidade de Manning para cada segmento independente dos valores correspondentes para seu elemento de escoamento sobre o terreno. É preferível um único grupo de valores para cada segmento de canal agrupados com coeficientes similares. A equação de Manning é usada como o relacionamento do escoamento necessário juntamente com a equação da continuidade para obter os cálculos de perda.

4.2.4 Movimento e Destacamento do Sedimento

A erosão do solo pode ser entendida como dois processos separados: o destacamento de partículas da massa de solo e o transporte destas partículas para os rios e lagos. O destacamento pode ocorrer devido ao impacto da chuva ou devido ao escoamento da água. 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), conforme Beasley e Huggins (1981), considerando os coeficientes utilizados na USLE (Universal Soil Loss Equation):

$$\text{DETR} = 0,108 * \text{CDR} * \text{SKDR} * A_i * R^2 \quad (4.7)$$

onde DETR - taxa de destacamento pela chuva (kg/min);

CDR - fator de cobertura e manejo, C da USLE (adimensional);

SKDR - fator de erodibilidade de solo da USLE (adimensional);

A - incremento de área (m²);

R - intensidade de chuva efetiva (mm/min).

O destacamento das partículas de solo pelo escoamento superficial foi descrito por Meyer e Wischmeier (1969) e modificado por Foster (1976) (apud Beasley e Huggins, 1981) como segue:

$$\text{DETF} = 0,90 * \text{CDR} * \text{SKDR} * A_i * \text{SL} * Q \quad (4.8)$$

onde DETF- taxa de destacamento pelo escoamento superficial (kg/min);

SL - declividade (em %);

Q - taxa de escoamento por unidade de largura (m²/min).

Uma vez que uma partícula tenha sido destacada, será transportada a jusante se houver energia suficiente para tal, caso contrário 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.

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

$$\text{TF} = 161 * (\text{SL} * Q^{0,5}) \quad \text{se } Q \leq 0,046 \text{ m}^2/\text{min} \quad (4.9)$$

$$\text{TF} = 16,32 * (\text{SL} * Q^2) \quad \text{se } Q > 0,046 \text{ m}^2/\text{min} \quad (4.10)$$

onde TF - capacidade de transporte do escoamento (kg/min.m);

Q - taxa de escoamento por unidade de largura (m²/min);

SL - declividade do elemento.

A Figura 4.6 apresenta o algoritmo esquemático do módulo de sedimentos.

SED - subrotina para destacamento de sedimento e cálculo de transporte

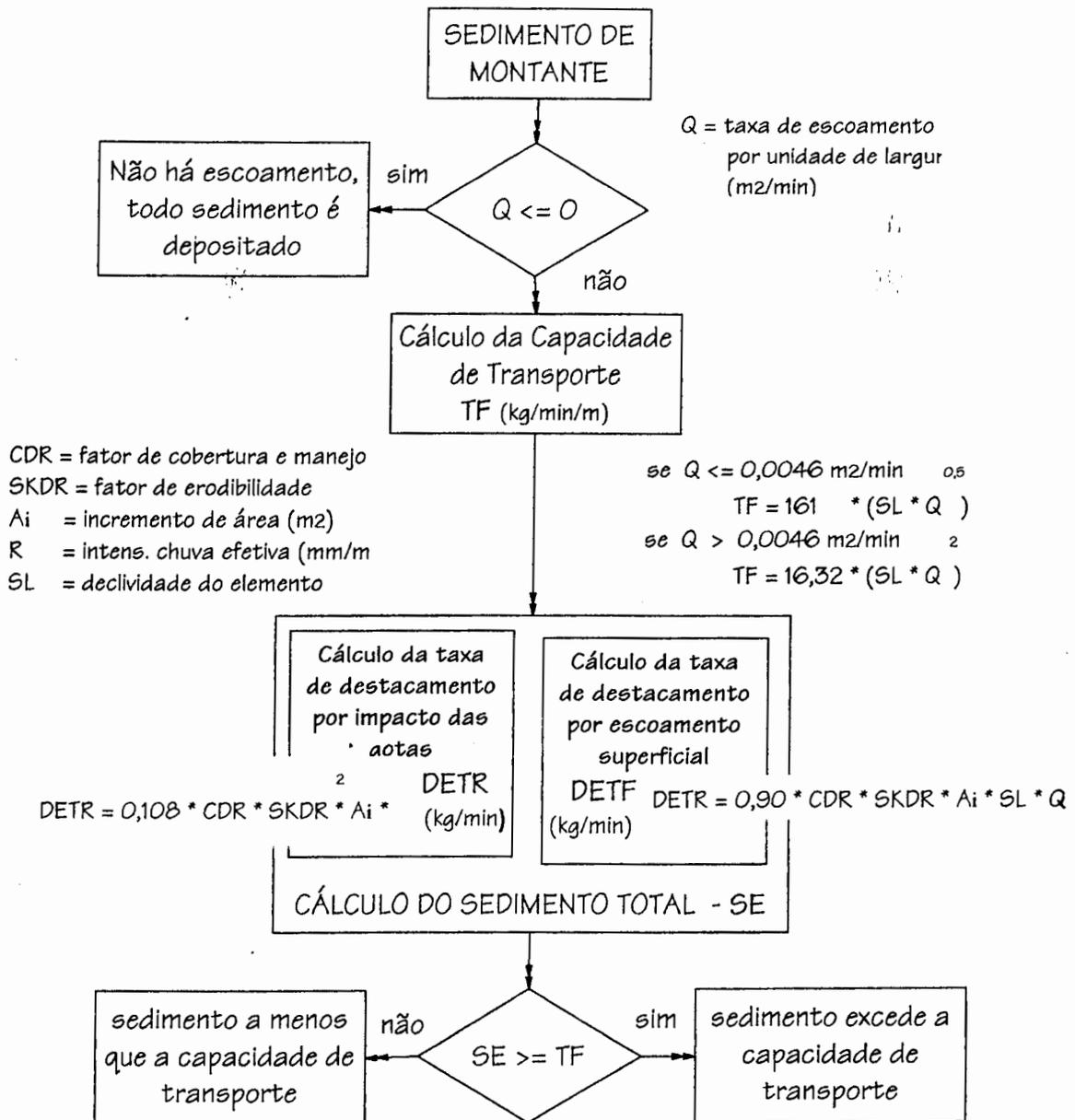


FIGURA 4.6 - Algoritmo da subrotina de movimento e destacamento do sedimento.

Embora o transporte seja definido como ocorrente em regiões de escoamento turbulento ou laminar, a equação do escoamento turbulento (equação de Manning) foi usada para taxas de escoamento no canal e sobre a superfície. Cálculos para profundidades de escoamento raso indicaram diferenças muito pequenas em taxas de escoamento preditos usando outras equações de escoamento laminar ou turbulento.

O modelo de erosão do ANSWERS admite as seguintes simplificações:

1. drenagem subterrânea não produz sedimentos;

2. sedimento destacado num ponto e depositado em outro é reincorporado à superfície do solo;
3. o redestacamento do sedimento requer a mesma quantidade de energia requerida para o destacamento inicial;
4. em canais, o destacamento pela chuva é assumido igual a zero e somente sedimentos depositados estão disponíveis para o destacamento pelo escoamento, ou seja, os revestimentos originais dos canais não são erodíveis.

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

4.3 Dados de Entrada para o Modelo

As informações de entrada do modelo contém seis tipos gerais de dados:

1. Requisitos de Simulação (unidades de medidas e controle de saída);
2. Informações de Precipitação (tempos e intensidades);
3. Informações de Solo (umidade anterior, resposta de drenagem, infiltração e erodibilidade potencial);
4. Uso do terreno e informação da superfície (tipo de cobertura, rugosidade da superfície e características de retenção);
5. Descrições do canal (largura e rugosidade);
6. Informações do elemento individual (localização, topografia, drenagem, tipo de solos, cobertura e uso do solo).

A informação do elemento individual é o maior corpo de dados e detém o maior tempo exigido para coleta. Portanto, uma vez a topografia, solos, uso do terreno e padrões de drenagem sejam determinados para todos os elementos, modificações no planejamento da bacia podem ser acrescentadas, sem ter que reconstruir o arquivo de entrada por completo.

A configuração de um arquivo de dados de entrada permite que o arquivo seja construído em duas partes: arquivo básico e arquivo dos elementos. Todos os dados, exceto os dados de elemento individual estão contidos num arquivo separado. Este primeiro arquivo “predata” contém todas as informações gerais necessárias para descrever os vários solos, uso do terreno e sistemas de planejamento numa dada região.

4.4 Programas ELEVAA e ADDINFO

O elemento padrão é definido pela aplicação de uma grade quadrada para mapas de solos ou topográficos. Feito isto, a informação adicional relacionando solos específicos, uso do solo e drenagem podem ser acrescentadas.

Foi elaborado, o programa ELEVAA em FORTRAN 66 por HUGGINS, L.F.(nov/1978) e BEASLEY, D.B.(jun/1987), com o objetivo de obter dados de altitude tomados de um mapa topográfico (uma leitura de altitude para cada vértice do elemento), afim de facilitar a transcrição manual da informação e convertê-lo num formato de arquivo de dados elementares requerido pelo modelo ANSWERS.

Faz-se necessário preparar em papel transparente, uma grade que subdivide a bacia em elementos quadrados no tamanho desejado. Esta grade é sobreposta nos mapas de topografia e solos para delinear as grade correspondentes.

Os programas de formatação dos dados disponíveis foram elaborados com a expectativa que arquivos separados sejam manualmente preparados para cada parâmetro físico diferente no arquivo do elemento (isto é, solo, cultura, tipo de canal, padrão de chuva).

Este programa calcula as declividades e direções do escoamento para cada elemento e estabelece o formato para o arquivo de dados elementar. O arquivo é subseqüentemente atualizado para adicionar informações relacionando o tipo de solo, de cultura e manejo para cada elemento e para identificar elementos que contém um canal definido.

Algumas dificuldades surgiram da experiência de gerar o arquivo de dados elementares das altitudes dos cantos. Geralmente algumas direções de escoamento calculadas com base nas altitudes dos cantos ficam insatisfeitas e necessitam ser manualmente editadas, especialmente para os elementos limites da bacia. Os elementos divisores que estão sobre a linha de topo e sobre a linha de fundo de vale da bacia, às vezes podem ser calculados numa direção que resulta em escoamentos dirigindo-se fora da bacia. Também, é necessário que todo o escoamento do elemento de saída da bacia dirija-se diretamente fora, isto é, deve ter uma das direções cardinais (0° , 90° , 180° ou 270°) e, ser especificado como um elemento canal. É

provável que elementos localizados próximos dos canais de escoamento não tenham direções de declividade apropriadas à declividade retornada do ELEVAA, devido às irregularidades topográficas ao longo de um canal. É imprescindível que toda edição manual do arquivo de dados elementar seja feita após o processamento dos solos básicos e dados dos canais.

Uma advertência no que diz respeito à saída de ELEVAA para casos onde a bacia de interesse tem áreas substanciais, relativamente planas ou mesmo depressionais, o programa retornará as direções do escoamento do elemento para um grupo de elementos que resultam num “alagamento”, isto é, o escoamento para os elementos não tem saída.

O algoritmo que calcula as declividades neste programa de pré-processamento é o que segue:

1. Determinam-se as cotas dos vértices da quadrícula em planta, na escala estabelecida;
2. Calculam-se as cotas corrigidas dos vértices, de forma que a quadrícula forme um plano, mantendo a mesma cota média da quadrícula original. Determinam-se duas retas:

V1-V3: diagonal do vértice de maior e menor cota, dado V1 o de maior cota;

V2-V4: diagonal dos outros dois vértices, sendo que a cota V4 o 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 quadrícula. Esta cota média é calculada como a média das cotas dos quatro vértices. As cotas corrigidas dos vértices obtidas por:

$$CM = \frac{(C1 + C2 + C3 + C4)}{4} \quad (4.11)$$

$$DEL1 = \frac{(C1 + C3)}{2} - CM \quad \quad \quad DEL2 = \frac{(C2 + C4)}{2} - CM \quad (4.12)$$

$$Z_i = C_i - DEL_i \quad \text{com } i \text{ variando de } 1 \text{ a } 4 \quad (4.13)$$

onde: C1, C2, C3, C4 são as cotas medidas dos vértices;
Z1, Z2, Z3, Z4 são as cotas corrigidas dos vértices;

3. A declividade é calculada por:

$$S = \frac{1}{A} * \left[(Z1 - Z2) + (Z3 - Z4) * \frac{(Z2 - Z3)}{(Z1 - Z2)} \right] \quad (4.14)$$

$$A = a * \left[1 + \frac{(Z2-Z3)^2}{(Z1-Z4)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (44159)$$

onde: S - declividade;
a - comprimento do lado da quadrícula;

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

As declividades e as direções do escoamento são obtidas e organizadas no formato do arquivo de entrada do ANSWERS. A declividade mínima permitida de um elemento é 0,2%.

O programa ADDINFO desenvolvido em FORTRAN 66, por PURSCHWITZ, M. (ago/1979) e BEASLEY, D.B. (jun/1987) consiste em um programa de adição de dados para inclusão de informações de solos e culturas para um arquivo de dados elementares gerado pelo programa ELEVA.

4.5 Saídas do Modelo

A listagem de saída consiste de cinco seções básicas:

- * uma listagem dos dados de entrada;
- * as características da bacia;
- * informações de escoamento e sedimentos da saída da bacia;
- * produção de sedimentos efetivos transportados ou deposição para cada elemento;
- * deposição do canal.

Listagem das Informações de Entrada: quando acionado no arquivo de entrada, reimprime o arquivo "predata".

Características da Bacia Hidrográfica: contém as informações de cabeçalho do arquivo de dados elementares. O tamanho dos elementos é calculado a partir do comprimento lateral e a área da bacia é apresentada, baseada no número total de elementos. São fornecidos números dos elementos do canal para dar algum sentimento da densidade de drenagem, informações sobre declividades mínima, média e máxima, tanto para escoamentos sobre o terreno quanto

para canais, informações sobre drenagem subsuperficial, umidade antecedente média e a localização do elemento de saída. Contém ainda, um resumo dos usos do terreno e solos contidos na bacia, a percentagem de área ocupada, assim como os vários descritores pertinentes para cada solo ou uso do solo.

Informações de Escoamento e Sedimentos: são apresentados o hidrograma de escoamento com concentração de sedimentos associados ao escoamento ao longo do tempo e a produção de sedimentos acumulados. A precipitação total, o escoamento total, a produção média de sedimentos e o escoamento total, são apresentados no fim do hidrograma. Embora o hidrograma e o sedimentograma impresso sejam somente do elemento exutório, é possível acessar a informação de saída para qualquer elemento na bacia. Uma pequena modificação na seção de saída do modelo, permite a obtenção do hidrograma e sedimentograma associados a qualquer ponto na bacia.

Produção ou Deposição de Sedimentos Transportados Efetivos: as estatísticas são obtidas por toda a simulação, na quantidade real de solo removido ou depositado em cada elemento. Embora este solo realmente parta do elemento (em caso de um número negativo), pode ou não estender-se ao sistema do canal. Isto é devido ao fato de que a deposição pode ocorrer além da parte baixa da declividade.

Deposição no Canal: detalha a quantidade de sedimentos depositados em cada um dos elementos do canal e adjacências. Atualmente não prevê erosão no canal.

4.6 Síntese

Os modelos de base física devem, tanto quanto possível, possuir módulos separados para cada relação de seus componentes, de forma a dar flexibilidade ao hidrólogo de modificar ou substituir as relações, de acordo com as exigências e peculiaridades da região que se pretende estudar.

A montagem de um arquivo básico, relacionando as informações dos diversos padrões de precipitação que ocorrem na bacia, as características dos possíveis tipos solos, suas coberturas

e uso do solo dentro de uma região, informações sobre a rede drenagem e suas características básicas, facilitam em muito a entrada de dados para uma série de bacias.

Com a possibilidade de agilizar a caracterização dos diversos panoramas surgindo com a variação temporal, através de planos de informações de fácil manipulação, mais e mais estimula-se a utilização de um modelo conceitual distribuído, como o ANSWERS, por exemplo.

Estes planos de informação (PIs) são grades compostas de elementos que contém a informação média ou o tema predominante, da área de cada célula da grade. Se o PI se refere a um quesito definido por temas diferentes, então caracteres específicos para cada tema serão definidos no arquivo básico e no PI o tema predominante para cada célula será representado pelo caracter relacionado. No caso de valores numéricos, será atribuído o valor médio de cada célula. A Tabela 4.1 descreve todos os PIs necessários para o modelo ANSWERS e esclarece a que tipo de informação pertence.

O número de elementos admissíveis para o cálculo restringirá o tamanho do elemento. O programa ANS77.EXE (15/fev/1988), desenvolvido na Linguagem FORTRAN 77 v.4.01, permite a análise para bacias de até 1700 elementos.

TABELA 4.1 - Descrição dos Vários Planos de Informação e seus Formatos:

PI_Nº	Discriminação do PI	Tipo de Informação
PI_01	PI de distribuição da chuva	caracter que designa um tema
PI_02	PI de projeto de canais revestidos (<i>opcional</i>)	caracter que designa um tema
PI_03	PI da rede de drenagem (<i>se houver</i>)	caracter que designa um tema
PI_04	PI da declividade da superfície	valor numérico
PI_05	PI da orientação do escoamento	valor numérico
PI_06	PI do tipo de solo	caracter que designa um tema
PI_07	PI do tipo de cobertura e uso do solo	caracter que designa um tema
PI_08	PI da declividade do canal (<i>se houver</i>)	valor numérico
PI_09	Número do identificado da prática de manejo	caracter que designa um tema
PI_10	PI da prática de manejo 1 (<i>opcional</i>)	caracter que designa um tema
PI_11	PI da altitude do elemento	valor numérico

Embora reconhecendo a necessidade de intensificação da obtenção de dados de campo, intercalada com o aprofundamento nas investigações do relacionamento físico dos componentes do modelo, a automação de um modelo distribuído parece se autojustificar, pois com a disponibilidade de se traçar diversos panoramas para um evento, tornando mais viável a análise e definições de encaminhamentos mais coerentes para a modelação conceitual.

A variação da escala ou resolução de estudo também é um fator a ser considerado. Se existe a possibilidade desta análise sem grande acréscimo no custo operacional, é importante a investigação do “ganho” obtido com o aumento da resolução, isto é, maior detalhamento dos elementos, e investigação também da relação existente entre a escala de coleta de informações e a escala de processamento da simulação.

5. METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

5.1 Considerações Iniciais

O capítulo anterior esclareceu sobre as entradas exigidas pelo modelo hidrológico ANSWERS, sendo o próximo passo a reunião das informações disponíveis sobre a área de aplicação, para então serem definidos os encaminhamentos necessários à obtenção desses arquivos de entrada.

Os mapas disponíveis de altimetria, pedologia, cobertura e uso do solo, distribuições da pluviometria, bem como a disponibilidade de imagens do satélite nas datas dos eventos a serem simulados devem ser organizados e estão descritos, especificamente, para cada área de estudo no capítulo 6 que trata da aplicação propriamente dita. Neste capítulo serão expostos os procedimentos, de forma genérica.

Os planos de informação (PIs) de distribuição da precipitação, solo e cobertura do solo, foram obtidos através da geração de imagens temáticas pelo SIG desenvolvido pelo INPE, o SGI. Os PIs de altitude do terreno foram obtidos de grades regulares, os MNTs. Os PIs de declividade e direção ou orientação do escoamento são obtidos do SGI na forma de imagem temática ou a partir da grade de altitude utilizando softwares auxiliares, desenvolvidos por Risso (1993).

Os PIs obtidos por imagem de satélite para diferentes datas só foram possíveis para a região do Rio Potiribu e utilizadas somente para a classificação da cobertura do solo, de acordo com as bandas espectrais disponíveis.

5.2 Plano de Cobertura do Solo Utilizando o SITIM

5.2.1 Sistema de Tratamento de Imagens SITIM-150

O software SITIM-150 de Sensoriamento Remoto é, basicamente, um sistema para processamento e classificação de imagens. Com ele é possível manipular imagens de dois tipos: imagens de satélite e imagens temáticas.

Como uma imagem de satélite tem, normalmente um conjunto de bandas espectrais, estas foram classificadas a partir da combinação das bandas de interesse, resultando numa imagem temática tratado como um PI único no SGI. As imagens classificadas foram transferidas para o SGI, como mapas temáticos a partir das imagens de satélites classificadas no SITIM.

Imagem multiespectral. é o conjunto de várias imagens de determinada região, adquiridas simultaneamente em diferentes faixas do espectro eletromagnético (bandas espectrais). O valor de cada pixel de imagem é proporcional à radiância do elemento do solo correspondente na banda espectral;

Imagem temática: é a imagem resultante da classificação sobre uma imagem multiespectral, onde cada ponto está associado a uma classe. Também pode ser obtida da varredura correspondente a uma poligonal digitalizada ou a um MNT fatiado;

Imagem da composição de bandas (composição colorida): é a imagem que tem utilização apenas para visualização, resultante de um algoritmo que obtém, a partir de uma composição colorida (RGB) de três bandas de uma imagem. Esta imagem aproxima as cores presentes na composição colorida original.

5.2.2 Classificação da Cobertura do Solo

Os 3 PIs contendo o mapeamento temático de 3 datas distintas da cobertura vegetal e uso do solo das sub-bacias Donato e Turcato, foram obtidas através da classificação das imagens digitais do satélite Landsat 5-TM, órbita 223, ponto 80, quadrante B, que abrange a Bacia do Potiribu, disponíveis nas datas 16/dez/89, 03/out/91 e 08/fev/92. As bandas espectrais utilizadas foram a 3, 4 e 5, que discriminam melhor a cobertura por possuírem as seguintes utilidades:

banda 3 - caracteriza absorção da clorofila, importante para definir a vegetação;

banda 4 - indica delineamento da rede de drenagem e o conteúdo de biomassa;

banda 5 - indica a umidade da vegetação e do solo.

Os PIs de cobertura do solo das 3 datas foram pré-processados, processados e classificados com técnicas de sensoriamento remoto. O pré-processamento consistiu em corrigir erros geométricos através do registro das 3 bandas de cada uma das imagens, referenciando-as a uma base cartográfica.

O registro da imagem é feito definindo-se 9 detalhes de fácil identificação, denominados pontos de controle, na imagem e na base cartográfica. Aplicou-se, então, a rotina de modelagem matemática polinomial existente no SITIM, estimando-se assim os parâmetros do modelo. Em seguida, a imagem corrigida é obtida a partir da original, por um processo de interpolação.

Na fase de processamento da imagem torna-se, conveniente por vezes, uma suavização da imagem, para eliminar ou diminuir pequenas variações locais, obtendo-se uma classificação mais uniforme, feita através de um filtro “passa-baixas” (Schowengerdt, 1983).

Para classificação das imagens multiespectrais de cada uma das datas, optou-se pela classificação não supervisionada K-médias, devido à ausência de viagem de campo. Pelas informações foram definidas 6 classes de cobertura do solo: solo nú, área cultivada 1, área cultivada 2, pastagem, resteva e mata. A área urbana foi digitalizada do mapa e inserida na imagem temática após a transferência para o SGI.

5.2.3 Interface com SGI

O SGI foi desenvolvido para funcionar de forma integrada com o SITIM existindo, portanto, a possibilidade de transferência de imagens do SITIM para o SGI.

Existem duas particularidades ao usar imagens no SGI que são as seguintes:

1. no caso do SITIM, uma imagem é entendida como um conjunto de bandas espectrais e para o SGI, cada banda espectral é vista como um PI distinto ou no caso de ser classificada a imagem temática é um PI único no SGI;
2. no SGI os dados são manipulados, na projeção da base cartográfica e portanto, as imagens devem ser corrigidas geometricamente e transformadas para o referencial da carta.

5.3 Planos de Informações Obtidos pelo SGI

5.3.1 Entrada de áreas

Para a entrada de dados poligonais (mapas temáticos), após o preparo do mapa com a identificação de todas as classes (temas) existentes, criou-se o PI e foram digitalizados os mapas temáticos de acordo com as características: arcos, polígonos abertos, ilhas, efetuando-se a identificação da área de cada classe. Finalmente, gerou-se o arquivo referente ao plano de informação e o arquivo descritor.

Estes procedimentos foram repetidos para obtenção dos PIs-imagem de distribuição de chuva, rede de drenagem, pedologia e cobertura do solo. No caso de existir o projeto de canais revestidos e prática de manejo do solo, estes também seriam obtidos da mesma forma.

5.3.3 Cruzamento de Planos

Para uma melhor definição dos limites de cada classe existente nas cartas, é conveniente usar o cruzamento de planos, isto é, definir o contorno da bacia cheia com a classe predominante e cruzar com as ilhas das demais classes.

A função CRUZAR planos encontra-se nas opções de manipulação do SGI, sendo possível o cruzamento de até 10 PIs através das operações E, OU e NÃO entre as classes.

Os PIs utilizados devem ter todos a mesma resolução e estar no formato raster, assim como o PI resultante. Os planos com resoluções diferentes da desejada podem ser convertidos através da função CONVERTER RESOLUÇÃO.

As operações entre classes devem ser definidas através de um arquivo de regras, cujo formato compreende três partes:

- * indicação dos planos a serem usados como entrada;
- * declaração de cada classe dentro do PI resultante;
- * as regras indicando a letra e índice de classe do PI envolvido.

5.4 Análise da Topografia por um MNT

5.4.1 Entradas de MNT's

A entrada de MNT no SGI requer a digitalização do mapa de isolinhas, a definição do retângulo envolvente, o tamanho da grade (conforme a resolução desejada), o tipo de interpolador (foi utilizada a interpolação local por média móvel ponderada), o número de pontos e o expoente da função de peso. Obtendo-se, assim o arquivo descritor da matriz ligado aos dados descritores da matriz.

Os PIs-grade de altitude para cada uma das resoluções de interesse foram obtidos pela repetição destes procedimentos.

5.4.2 Geração da Declividade e Orientação do Escoamento

A função GERAR DECLIVIDADE está disponível no SGI e consiste em gerar, a partir da grade de altimetria em formato raster, 2 PIs de imagem temática em formato raster: o primeiro, denominado declividade, representa o ângulo (em graus) de inclinação da superfície em cada ponto; o segundo, denominado orientação, representa o ângulo da projeção normal no plano horizontal, contado a partir da direção Norte, no sentido horário. Os ²⁵⁶265 níveis de cinza mapeiam, no caso da declividade, o intervalo de 0° a 90° e, no caso da orientação, de 0° a 360°.

Existe a opção de gerar um PI com regiões que agrupam classes de intervalos de cotas de um MNT, na função FATIAR. O plano de entrada deve ser um MNT e o resultado é o obtido no formato "varredura" da categoria "área". É solicitado o nome dos planos de entrada e saída, os intervalos das cotas e os rótulos e cores das classes de intervalo.

A Figura 5.1a exemplifica a representação do PI de declividade, utilizando o recurso de fatiamento podendo-se visualizado ao lado da outra forma de obtenção da declividade que será exposta no item a seguir (Figura 5.1b).

5.4.3 MNT da Declividade e MNT da Direção

Os valores de declividade e direção do escoamento obtidos pelas rotinas existentes no SGI, não são média de cada célula, mas estão inseridos em faixas estabelecidas pelo analista. A

apresentação em forma de imagem temática exige uma série de tratamento para a definição de um valor estimado por célula, sendo seriamente comprometida a confiabilidade do dado.

Risso (1993) desenvolveu e utilizou algoritmos, partindo das proposições de Mark et al. (1984), para a determinação dos valores de declividade e orientação do escoamento de cada célula da grade, além de definir os divisores da bacia e os caminhos de drenagem por uma série de rotinas, associado ao SGI. Este software foi utilizado na obtenção dos PIs-grade de declividade e orientação no presente trabalho, sendo a seguir descritos:

Suavização: B_CRIMA.EXE cria imagem a partir da grade de MNT sem interpolação para o SGI (com refinamento) e B_ETSG.EXE suaviza a matriz de altitudes, com o intuito de preencher as depressões ali presentes, fruto de erros na interpolação do MNT e que, conseqüentemente, acabariam prejudicando as rotinas posteriores;

Orientação: B_CAB.EXE cria uma matriz derivada do MNT, representando as orientações de cada célula. Este processo, de uma forma simplista, define a orientação no sentido da maior declividade às células vizinhas, determinando a rede de drenagem. B_DEC2.EXE calcula a declividade em relação aos vizinhos de menor cota;

Acumulação: B_DBG1.EXE a partir da matriz referente às orientações, traça a rede de drenagem do terreno, em função do número de células atravessadas para chegar a uma célula em questão e em função da área de cada pixel;

Divisão: esta rotina segue o algoritmo de Mark et al. (1984), para o traçado dos divisores de água das bacias e sub-bacias hidrográficas. As células referentes aos exutórios, podem ser marcadas por intervalo de cotas (para o caso da área de contribuição de lagos) ou marcados manualmente sobre um par de coordenadas x,y.

As matrizes possíveis de serem calculadas nesta seqüência de rotinas devem resultar, no máximo, em 32000 células. São criados os PIs de declividade e orientação do escoamento, além do PI que apresenta os limites da bacia analisada e a rede de drenagem, de acordo com o acúmulo de células no caminho do escoamento até o exutório da bacia. A grade de altitude que

dos MNTs que existem algumas pequenas discordâncias nas delimitações feitas pelos dois processos distintos como pode ser observado nas Figuras 5.2a e 5.2b.

TABELA 5.1 - Declividades médias obtidas pela rotina A DEC2.EXE:

SUB-BACIA	RESOL. (m)	DECLIV. MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO (%)
FOA	10	15,892	± 2,051
	25	16,987	± 1,200
	50	17,983	± 0,890
FOB	10	14,712	± 1,770
	25	15,179	± 0,855
	50	15,181	± 0,642
DON	30	3,092	± 0,186
	60	3,091	± 0,132
TUR	50	2,665	± 0,132
	100	2,523	± 8,683 x 10 ⁻²
	200	2,297	± 4,615 x 10 ⁻²

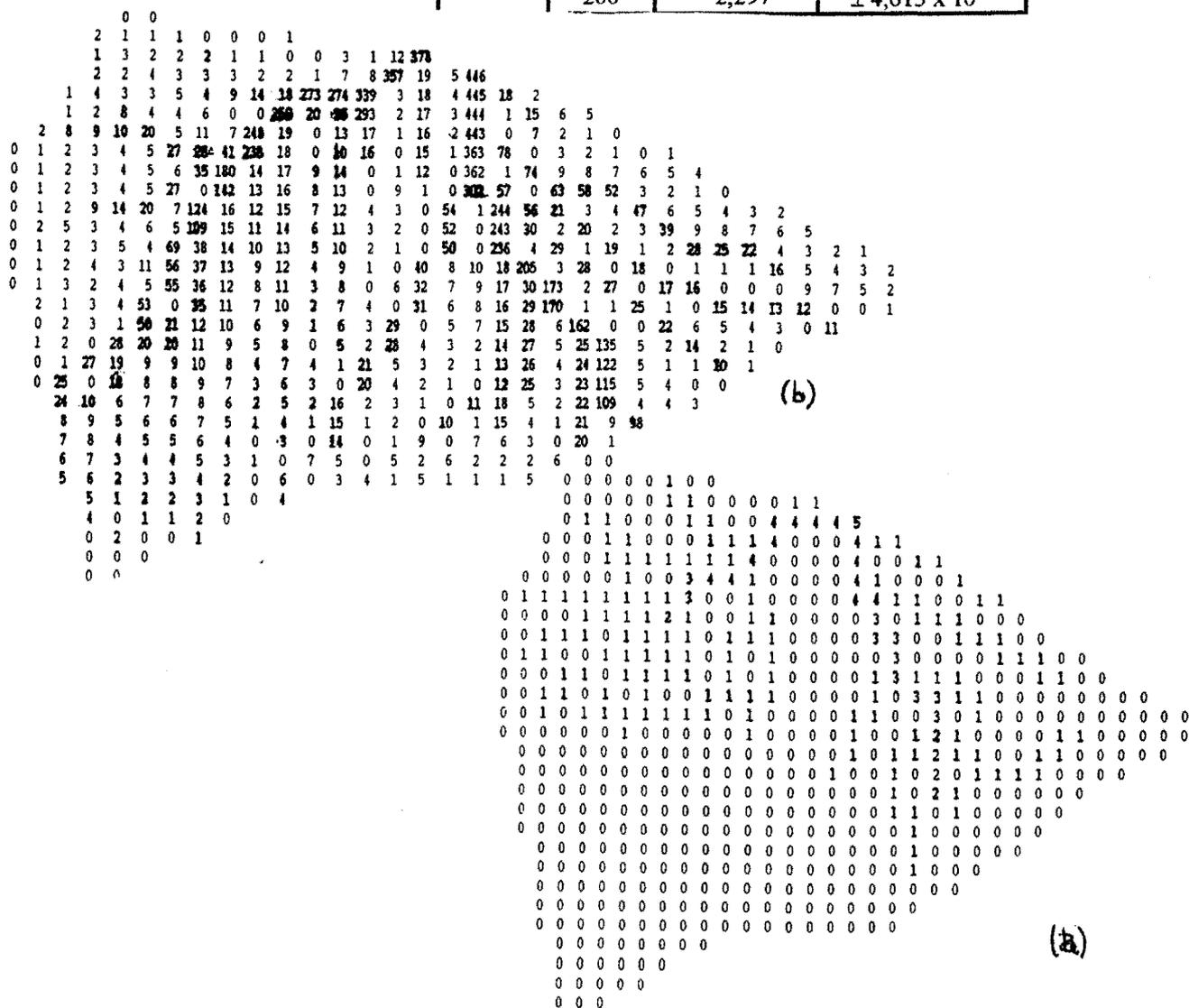


FIGURA 5.2 - Os limites da bacia hidrográfica e rede de drenagem obtida por digitalização (a) e análise do MNT (b).

Ainda com respeito às declividades, restou a montagem do PI com a informação da declividade dos elementos que caracterizam os canais. Foi necessário utilizar um algoritmo específico para o cálculo das declividades dos canais, CANAL.EXE, a partir do PI com a drenagem digitalizada e PI com as altitudes dos elementos foi possível criar um PI com as altitudes do canal. As declividades foram calculadas a partir deste novo PI declividade do canal.

5.5 Adaptações para Utilização no Modelo ANSWERS

Algumas rotinas foram elaboradas para facilitar a entrada dos dados e verificação destes, outras são essenciais para compatibilização de formatos e dimensões, agilidade do manuseio dos PIs e, finalmente, a montagem do arquivo elementar. Estas rotinas foram desenvolvidas para este trabalho em Turbo Pascal v.6, sendo as listagens com os procedimentos principais apresentados no Anexo D.

A seqüência dos procedimentos necessários para a utilização adequada das informações no modelo ANSWERS, são a seguir expostas:

1. Formulação do arquivo básico, no formato de entrada exigido para o modelo: procedimento **BASICO.EXE**;
2. Elaboração dos planos de informação: PIs das imagens classificadas no SITIM, PIs de imagem temática e Pis de matriz numérica no SGI e PIs-grade a partir de MNT específico, expostos respectivamente no itens 5.2, 5.3 e 5.4;
3. Conversão dos PIs de imagem temática e PIs matriz numérica em formato e descritores padrão: procedimento **TEXTTO.EXE**;
4. Montagem dos PIs de declividade e de direção de todos os elementos da bacia: rotinas desenvolvidas por **RISSO (1993)**;
5. Compatibilização das dimensões de todos os PIs (imagem e grade), retirando os excessos e complementando os elementos ausentes, procurando otimizar a informação: procedimento **SUPERPOE.EXE**;
6. Montagem do PI declividade do canal já em dimensões compatíveis uma vez que guiado pelos PI de drenagem e altitude compatibilizados: procedimento **CANAL.EXE**;

7. Montagem do arquivo com informação específica dos elementos, observando o número de elementos da bacia: ELEMENTO.EXE;
8. Execução do programa ANSWERS (15/fev/1988) em FORTRAN 77 v.401: ANS77.EXE;
9. Saída do hidrograma e sedimentograma.

Estes procedimentos foram repetidos para as 4 sub-bacias: Forquetinha A1 (FOA), Forquetinha B1 (FOB), Donato (DON) e Turcato (TUR). Foram também repetidos para 3 resoluções diferentes, como observa-se na Tabela 5.2.

TABELA 5.2 - Dimensões das Matrizes Geradas para as bacias do estudo:

SUB-BACIA	ÁREA (km ²)	RESOL (m)	(Lin x Col)	TOTAL (células)	REAL (células)	SAÍDA (Lin x Col)
FOA	0,550	10	95 x 75	7125	5462	35 x 74
		25	38 x 30	1140	874	15 x 30
		50	19 x 15	285	215	7 x 14
FOB	0,393	10	75 x 85	6375	3835	9 x 43
		25	30 x 34	1020	606	4 x 18
		50	15 x 17	255	150	2 x 9
DON	1,100	10	120 x 144	17820	11858	99 x 144
		30	40 x 48	1900	1303	33 x 48
		60	20 x 24	480	319	17 x 24
TUR	19,400	50	101 x 108	10908	7612	98 x 19
		100	50 x 54	2700	1875	49 x 10
		200	25 x 27	675	478	25 x 5

O PI de altitude (grade básica) serviu de guia para os demais PIs de cada projeto. Algumas vezes foram necessários ajustes de linha ou de coluna, ou simplesmente de elemento nos PIs-imagem. Procurou-se minimizar a perda de informação. A Tabela 5.2 apresenta as dimensões em termos de linhas e colunas da matriz completa, total de células assumidas como padrão para cada resolução de cada projeto. É apresentado também o número de elementos que estão nos limites da bacia e a linha e coluna do elemento de saída.

O programa ANS77.EXE na versão utilizada admite somente bacias com no máximo 1700 elementos, portanto algumas resoluções do estudo foram abandonadas para este trabalho. No entanto, os PIs com resoluções de maior detalhamento, apesar de gerarem matrizes que extrapolam a capacidade do programa, serviram de apoio para análise e verificação das resoluções adotadas para o presente estudo.

6. APLICAÇÕES

6.1 Seleção das Sub-bacias

As quatro sub-bacias selecionadas para a aplicação deste estudo encontram-se dentro de duas bacias representativas dos estudos de predisposição aos riscos de erosão, pois localizam-se sobre afloramento de basalto (Bordas et al., 1988). Tratam-se da Bacia do Rio Forquetinha (450 km²) representando as encostas do basalto, com relevo moderado a íngreme, solos de média erodibilidade e chuvas com erosividade média e da Bacia do Rio Potiribu (563 km²) representando a zona do planalto de relevo ondulado suave, com altitude média de 400 m, solos medianamente erodíveis, onde predomina o solo latossolo roxo distrófico e as chuvas de maior erosividade da região.

O Rio Forquetinha é um importante afluente da margem direita do Rio Forqueta, pertencente à bacia do Rio Taquari-Antas. 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 450 km², até a foz do Rio Forqueta. Sua localização dentro do Estado pode ser observada, juntamente com um zoom das sub-bacias de aplicação, na Figura 6.1.

Foram selecionadas as bacias A1 e B1, também apresentadas por Goldenfum (1991) para aplicação do ANSWERS, de modo a se efetuar as comparações entre as metodologias. São, assim classificadas em função de sua declividade ("A" correspondente a declividades de 40% e "B" correspondente a declividades de 30%) e cobertura vegetal ("1", correspondente à lavoura). As principais características físicas das duas sub-bacias são apresentadas na Tabela 6.1.

O Rio Potiribu é afluente do Rio Ijuí, contribuinte do Rio Uruguai e do Rio de La Plata. A Bacia do Rio Potiribu com uma área de 563 km², está localizada na latitude de 28° 24' 25" Sul e longitude 53° 48' 33" Oeste, entre as cidades de Ijuí e Cruz Alta-RS. Sua localização encontra-se também na Figura 6.1, com destaque às sub-bacias da aplicação.

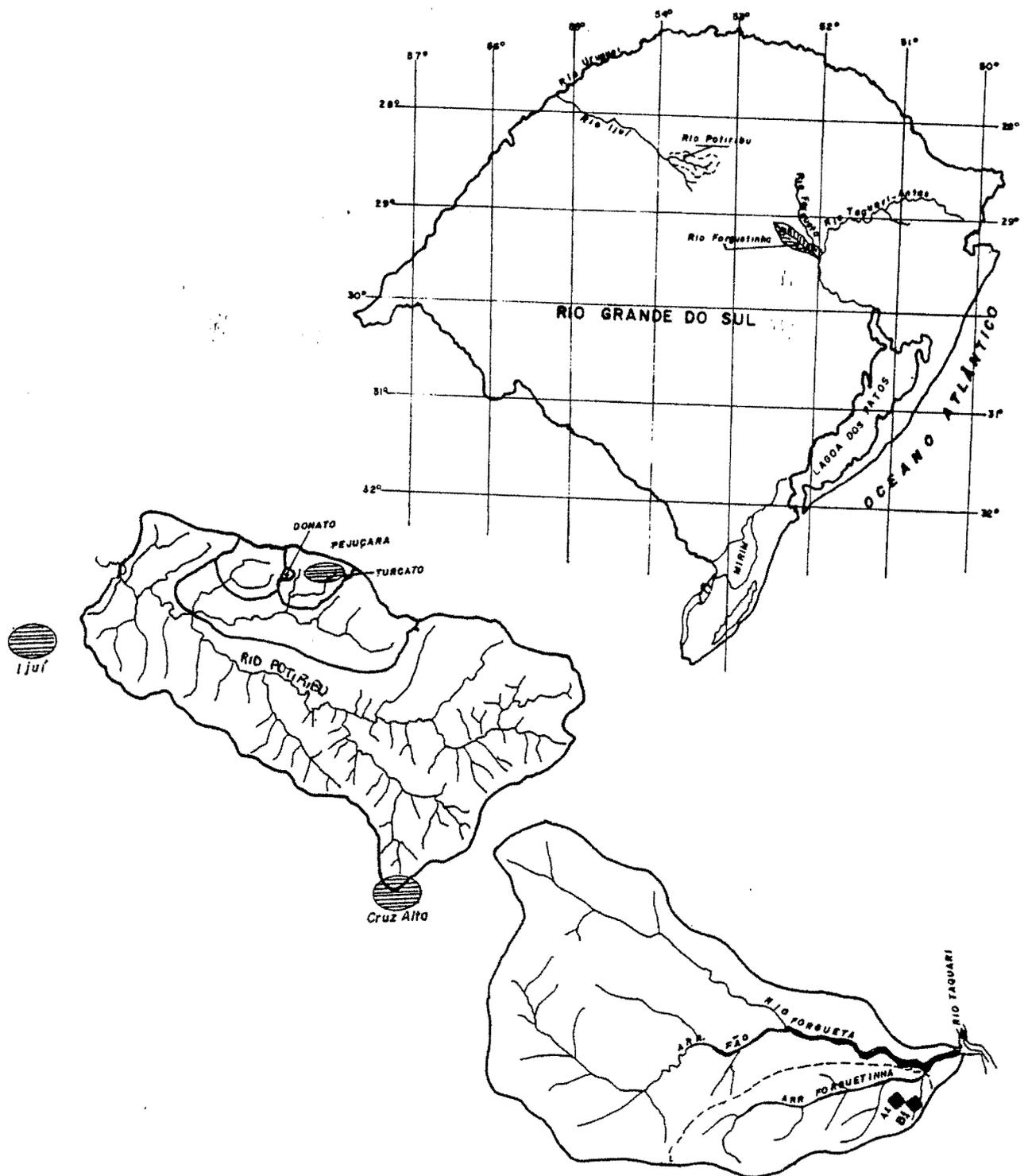


FIGURA 6.1 - Localização das Bacias do Potiribu e Forquetinha no Estado e destaque das sub-bacias de interesse.

TABELA 6.1 - Características Físicas das Sub-bacias do Rio Forquetinha:

CARACTERÍSTICA FÍSICA	SUB-BACIA	
	A1	B1
ÁREA (km ²)	0,55	0,393
PERÍMETRO (km)	3,00	2,625
DECLIVIDADE MÉDIA (%)	32,5	28,90
ALTITUDE MÉDIA (m)	230,00	210,00

Fonte: Goldenfum (1991).

A sub-bacia do Rio Turcato e a sub-bacia do Rio Donato (interna à sub-bacia do Turcato) foram identificadas e instrumentalizadas, propiciando os estudos de processos físicos, em escalas diferentes, de modo a conhecer a resposta de cada solo típico, dos interflúvios e do conjunto de bacias ao impacto de uma chuva, sob diversas condições de ocupação do solo. As principais características destas sub-bacias são apresentadas na Tabela 6.2.

TABELA 6.2 - Características Físicas das Sub-bacias do Rio Potiribu:

CARACTERÍSTICA FÍSICA	SUB-BACIA	
	DONATO	TURCATO
LATITUDE	28°25'24" S	28°26'19" S
LONGITUDE	53°40'33" O	53°40'57" O
ÁREA (km ²)	1,10	14,90
PERÍMETRO (km)	4,54	18,10
COMPR. DRENAGEM (km)	1,14	1,18
DECLIVIDADE (m/km)	47,40	20,20
DENSID. DRENAGEM (km/ km ²)	2,21	1,40

Fonte: Levantamento topográfico feito pelo IPH, apud Castro (1992).

Chevallier e Castro (1991) (apud Castro,1992) fizeram uma homogeneização da pluviometria da região e chegaram à pluviometria média mensal de 120 mm, mas a pluviometria interanual é bastante variada, chegando a ter um ano úmido e o ano subsequente seco. Assim, apresenta-se a pluviometria média anual de 1710 mm, com recorrência decenal seca de 1234 mm e a decenal úmida de 2264 mm. A pluviografia diária apresenta um valor de 88,9 mm para recorrência anual.

6.2 Organização dos Dados Disponíveis

6.2.1 Informações Topológicas e Topográficas

Para o estudo nas sub-bacias do Forquetinha foram utilizadas as plantas das sub-bacias A1 e B1, na escala 1:2500, com curvas de nível intervaladas de 10 m, que digitalizadas formam as grades de altitudes (MNT) dos projetos FOA (Forquetinha A1) e FOB (Forquetinha B1). A rede de drenagem, com os divisores de bacia e os fundos de vale (os canais, propriamente ditos), das sub-bacias também foram digitalizadas para obtenção dos PIs imagem de drenagem, sendo que os mapas podem ser vistos no Anexo C.

Para as sub-bacias do Potiribu, foi utilizado como base de dados o levantamento da Bacia do Arroio Taboão, executado em 1989, na escala 1:25000, com curvas de nível intervaladas de 20 m. Foram digitalizadas, considerando-se as coordenadas UTM e formando uma grade de altitude geral. Posteriormente delimitaram-se as grades das sub-bacias de interesse, criando-se os projetos DON (sub-bacia Donato) e TUR (sub-bacia Turcato). Da mesma forma, a rede de drenagem das sub-bacias, com os divisores e canais, também foram digitalizadas a partir dos mapas que encontram-se no Anexo C.

A altitude da região do Rio Potiribu é de 300 a 500 m, possuindo relevo ondulado a suavemente ondulado, formado por elevações com centenas de metros de comprimento e declividade que varia de 3 a 10%, podendo ocorrer, em relevo mais forte, no máximo com 15% de declive. A amplitude vertical das ondulações situa-se entre 50 e 100 m.

6.2.2 Informações dos Eventos

Dos 34 eventos utilizados por Goldenfum (1991), 6 foram selecionados para as aplicações nas sub-bacias do Forquetinha, sendo 3 eventos da sub-bacia A1 e 2 eventos da sub-bacia B1, com dados de pluviografia e fluviografia, volume total escoado, vazão de pico e o total de produção de sedimentos. Os PIs-imagem que definem a distribuição espacial do padrão de chuva na sub-bacia, apresentam um único padrão sobre toda a sub-bacia coincidindo com os limites das sub-bacias, expostos no Anexo C.

Quanto aos dados de linigrafia e pluviografia das sub-bacias de interesse do Rio Potiribu foram selecionados três eventos coincidentes para as duas sub-bacias, um do pluviógrafo no centro da sub-bacia do Donato e de outro pluviógrafo no interior da sub-bacia do Turcato. São eventos de 04/jun/1991, 18/jun/1991, 05/out/1991 e 09/fev/1992, sendo que os dois últimos foram selecionados conforme a disponibilidade das imagens de satélite com informação da cobertura do solo de 03/out/1991 e 08/fev/1992, no evento de 1992 somente estava disponível a pluviografia do posto da sub-bacia do Donato. Os dois eventos de junho de 1991 foram utilizados no trabalho de Castro (1992) e, como as imagens disponíveis mais próximas dessa data, são somente a 16/dez/1991 e 03/out/1991, foi necessário testar o evento para as duas imagens de cobertura do solo, sendo que adaptou-se melhor à primeira data. Também para as sub-bacias Donato e Turcato, a distribuição espacial apresenta-se com padrão de chuva único, considerado para toda a bacia.

Os pluviogramas e linigramas usados foram digitalizados, consistidos e armazenados em um banco de dados através da utilização do programa HYDRON (Cochonneau, 1989). A distribuição temporal da chuva encontra-se descrita no Anexo B. Para as sub-bacias FOA e FOB, o intervalo de medição de precipitação é de 15 min. e para as sub-bacias DON e TUR, o intervalo é de 10 min. Na Tabela 6.3 são apresentados os eventos selecionados para cada sub-bacia do estudo.

TABELA 6.3 - Eventos Selecionados

EVENTO	PRECIPIT. TOTAL (mm)	IPA (dias)	QTOT (mm)	qp (mm/h)	SEDIM. PRODUZ. (t)
Forquetinha - Sub-bacia A1 - FOA					
03/08/79	73,0	13	17,025	1,178	20,934
31/08/79	23,0	6	3,004	0,425	2,806
04/10/79	102,0	4	41,745	1,505	114,915
Forquetinha - Sub-bacia B1 - FOB					
23/06/79	36,0	20	6,357	0,531	1,033
03/08/79	59,0	13	20,103	1,777	11,182
Potiribu - Sub-bacia do Donato - DON					
04/06/91	142,7	12	10,299	11,324	ND
18/06/91	57,6	2	11,350	4,124	ND
05/10/91	54,2	5	1,313	0,596	ND
09/02/92	26,2	4	0,438	0,056	ND
Potiribu - Sub-bacia do Turcato - TUR					
04/06/91	142,7	12	11,385	1,266	ND
18/06/91	57,0	2	8,494	0,791	ND
05/10/91	54,2	5	4,389	0,562	ND
09/02/92	35,6	4	2,453	0,221	ND

IPA = número de dias anteriores sem chuva;

QTOT = volume total escoado;

qp = vazão de pico;

ND = dado não disponível.

6.2.3 Informações do Solo

Os solos predominantes da Bacia do Rio Forquetinha são a associação das unidades taxonômicas Ciriaco-Charrua, sendo a Ciriaco classificada como solo Brunizem Avermelhado e Charrua como solo Litólico Eutrófico. Para a Bacia do Rio Potiribu são identificados Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho Escuro, Terra Roxa, Glei pouco Húmico e Solos Aluvionais, pelo Levantamento de Reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul (1973), todos descritos a seguir:

Brunizem Avermelhado: de textura argilosa, relevo forte ondulado e substrato basalto, mediamente profundo (80 a 120 cm), moderadamente drenado, com horizonte A espesso (47 a 55 cm), de coloração bruno avermelhado escuro e horizonte B pouco espesso de coloração vermelho escuro;

Litólico Eutrófico: de textura média, relevo montanhoso e substrato basalto amigdalóide, raso (20 a 40 cm) com horizonte A (entre 20 e 40 cm) de coloração bruno avermelhado escura e horizonte B raro e incipiente;

Latossolo Roxo: de textura argilosa, formado a partir de basalto. Possui coloração arroxeada, muito profundo, muito friável e acentuadamente drenado;

Latossolo Vermelho Escuro: de textura argilosa, formado a partir de basalto, muito profundo, bem drenado, bastante poroso, com boa permeabilidade e friável quando úmido;

Terra Roxa Estruturada: formado a partir de basalto, de coloração avermelhada-escuro, bem drenado, textura argilosa;

Glei Pouco Húmico: constituído por um horizonte superficial de coloração clara e com cerca de 20 cm de espessura, sobre horizonte glei de cor neutra (cinzenta), normalmente com mosqueados de coloração brunada ou amarelada. Formado em terrenos baixos com grande influência do lençol freático à superfície ou próximo dela, por todo o ano ou longo período, condicionado pelo relevo plano que ocasiona a má drenagem;

Aluvial: de textura argilosa e espessura variável, podendo às vezes ocorrer camadas gleizadas ou mosqueados, refletindo más condições de drenagem.

Os mapas de pedologia das sub-bacias do Forquetinha, de acordo com LEPRUN (1987), foram digitalizados e constituíram os PIs imagem de solos, conforme descrição no item 4.3. As sub-bacias Donato e Turcato foram digitalizadas do mapa do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul (1973). Os mapas pedológicos podem ser vistos no Anexo C.

Os oito parâmetros que caracterizam cada tipo de solo, considerados pelo modelo, são a seguir definidos, bem como a forma de obtê-los:

Porosidade Total (TP): é o volume de poros no solo diretamente relacionado à densidade bruta (peso/unid. volume) do solo. A Tabela 6.4 lista as densidades brutas e outras propriedades físicas do solo para diferentes classes de textura do solo. Para as classes não listadas pode ser feita uma interpolação.

TABELA 6.4 - Algumas Propriedades Físicas Representativas de Solos:

TEXTURA DO SOLO	DENSIDADE BRUTA (g/cc)	POROSIDADE TOTAL (% volume)	CAPACIDADE DE CAMPO (% saturado)	PONTO DE MURCHA (% saturado)
Arenoso	1,65 (1,55-1,80)	38 (32-42)	39 (31-47)	17 (10-24)
Franco-argiloso	1,50 (1,40-1,60)	43 (40-47)	49 (38-57)	21 (15-26)
Franca	1,40 (1,35-1,50)	47 (43-49)	66 (59-74)	30 (26-34)
Franco-argiloso	1,35 (1,30-1,40)	49 (47-51)	74 (66-82)	36 (32-40)
Argilo-siltoso	1,30 (1,25-1,35)	51 (49-53)	79 (72-86)	38 (34-42)
Argiloso	1,25 (1,20-1,30)	53 (51-55)	83 (76-89)	40 (37-43)

Obs.: Os números em parênteses indicam intervalo normal.

Adaptado de Israelsen and Hansen, 1962 (apud Beasley e Huggins, 1981).

Capacidade de Campo (FCAP): é o limite superior da água disponível no solo, quantificando também o volume dos poros que pode conter de água gravitacional, expressa em percentagem de saturação. A saturação ocorre quando os espaços dos poros no solo são completados pela água.

Profundidade da Zona de Controle de Infiltração (DF): descreve o volume do solo (profundidade) que afeta a infiltração na superfície do solo. Em geral, a profundidade da zona de controle é igual ou menor que a profundidade do horizonte A (entre 0,25 a 0,75 da profundidade do horizonte A).

Umidade Antecedente do Solo (ASM): quantifica o ponto de início da umidade do solo baseado na equação da infiltração. Uma simples equação de balanço da umidade para a determinação do ASM, é:

$$ASM = ASML + RAIN - ET - RO - PERC \quad (6.1)$$

onde ASM - umidade antecedente do solo;

ASML - umidade antecedente inicial;

RAIN - precipitação diária;

ET - evapotranspiração;

RO - escoamento superficial;

PERC - percolação (drenagem da água gravitacional).

As seguintes hipóteses podem ser consideradas, sugeridas por Beasley e Huggins (1981):

1. a profundidade da camada do solo que influencia a umidade é igual a profundidade da zona de controle (DF);
2. a evapotranspiração é 1/2 da normal nos dias que a precipitação é maior que 5,1 mm;
3. o solo drena abaixo da capacidade de campo em um dia para infiltração constante (FC);
4. quando a umidade do solo busca o ponto de murcha, a umidade não adicional é perdida devido à ET;
5. em dias que a precipitação é menor que 7,6 mm, RO = zero;
6. em dias que a precipitação está entre 7,6 mm e 20,3 mm, RO = 0,10 * RAIN;
7. em dias que a precipitação está entre 20,3 mm e 38,1 mm, RO = 0,15 * RAIN;
8. em dias que a precipitação é maior 38,1 mm, RO = 0,20 * RAIN.

A evapotranspiração pode ser calculada usando qualquer equação. Cada método acarreta certas hipóteses e o analista deve determinar qual a equação que melhor se adapta às proposições e utiliza os dados disponíveis. Os cálculos de umidade antecedente devem ser iniciados, aproximadamente um mês antes do tempo a ser simulado. A capacidade de campo ou qualquer outra umidade razoável pode ser considerada como ponto inicial.

Descritores da Taxa de Infiltração: FC (da equação 4.1) é a taxa de infiltração permanente indicando a taxa para a qual o solo absorve água quando o mesmo está saturado e A (da equação 4.1) é a diferença entre as taxas de infiltração máxima e a permanente. Os intervalos

de permeabilidade para um dado tipo de solo são usados da seguinte maneira: (i) o ponto médio do 1/3 inferior do intervalo é usado para FC; (ii) ponto médio dos 2/3 superior do intervalo é usado para taxa máxima; e (iii) o valor de A é igual a taxa máxima menos FC. A Tabela 6.5 demonstra algumas sugestões para estes parâmetros, conforme as considerações apresentadas:

TABELA 6.5 - Alguns Valores para os Descritores da Taxa de Infiltração, FC e A:

Inferior (mm/h)	Superior (mm/h)	Intervalo (mm/h)	1/3 do intervalo	pt.méd. do 1/3 = FC (mm/h)	pt.méd. do 2/3 = Tx.Máx. (mm/h)	Tx.Máx. - FC = A (mm/h)
5,08	38,10	33,02	11,01	10,58	27,09	16,51
3,33	43,33	40,0	13,33	10,0	30,0	20,0
3,0	33,0	30,0	10,0	8,0	23,0	15,0
5,0	35,0	30,0	10,0	10,0	25,0	15,0
3,0	39,0	36,0	12,0	9,0	27,0	18,0
5,0	41,0	36,0	12,0	11,0	29,0	18,0
3,0	45,0	42,0	14,0	10,0	31,0	21,0
5,0	47,0	42,0	14,0	12,0	33,0	21,0
3,0	51,0	48,0	16,0	11,0	35,0	24,0
5,0	53,0	48,0	16,0	13,0	37,0	24,0

Expoente de Infiltração (P): relaciona a taxa de decrescimento da capacidade de infiltração para o aumento da umidade. Estas propriedades variam entre tipos de solos e são mais relacionadas à classe textural do solo. O maior peso para textura mais argilosa, o maior valor de P. Ao contrário, solos arenosos mostram pouca alteração na infiltração com aumento da umidade do solo e, desta maneira, tem um valor P menor. A Tabela 6.6 lista alguns valores de pontos iniciais para várias classes texturais.

TABELA 6.6 - Valores de "P" para Várias Texturas de Solos:

TEXTURA DO SOLO	SUGESTÕES PARA "P"
Argila	0,75-0,80
Argila Siltosa	0,65-0,75
Franco Argilosa	0,60-0,70
Franco	0,55-0,65
Franco Arenosa	0,50-0,60
Areia	0,35-0,50

fonte: Manual do ANSWERS (Beasley e Huggins, 1981).

Erodibilidade do Solo ("K" da MUSLE - SKDR): Wischmeier e Smith(1978) desenvolveram uma técnica de nomograma para a determinação do fator, baseando nas classes texturais e outras características do solo. A técnica envolve o agrupamento de solos pelas similaridades em resposta de drenagem. O fator efetivo poderá ser obtido da média ponderada de áreas de diferentes valores numa classe de drenagem ou pelo valor do solo predominante.

Para as sub-bacias A1 e B1 do Rio Forquetinha foi utilizada a técnica citada, como o realizado por Goldenfum (1991). Já para as sub-bacias Donato e Turcato foram observadas as considerações de Risso (1993) que buscou valores obtidos para condições brasileiras, semelhantes aos solos em estudo, segundo aplicações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1987) (apud Risso, 1993) e baseado nos valores de Bertoni e Lombardi Neto (1985). Os valores considerados são apresentados na Tabela 6.7.

TABELA 6.7 - Fator de Erodibilidade (SKDR) para os tipos de solo identificados nas regiões de interesse:

TIPO DE SOLO	FATOR DE ERODIBILIDADE (SKDR)
Associação Brunizem-Litólico	0,23
Litólico	0,32
Brunizem	0,14
Latossolo Roxo	0,12
Latossolo Vermelho Escuro	0,16
Terra Roxa Estruturada	0,18
Glei pouco Húmico	0,00
Aluvial	0,00

fonte: Manual do ANSWERS (Beasley e Huggins, 1981).

Características de Drenagem Subsuperficial : DC é o coeficiente de drenagem, para drenagem com manilha e GRF é a fração de perda de água subterrânea ou interflúvio consiste numa fração de de água considerada para o reservatório subterrâneo, no sistema de canal para cada intervalo de tempo. Estes valores podem variar entre 0 e 0,01. Valores pequenos podem causar um aumento do escoamento na recessão do hidrograma, devido a taxa de drenagem da zona de controle ser maior que o movimento de água subterrânea. Assim, o reservatório subsuperficial de água aumenta, conseqüentemente elevando o interflúvio. Valores mais altos causam a estabilidade do hidrograma num período de tempo, decrescendo a taxa de drenagem subsuperficial e reduzindo o interflúvio.

6.2.4 Informações da Cobertura do Solo

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). Os mapas com a delimitação das áreas cultivadas e mata apresentados por

Goldenfum (1991), expostos no Anexo C, foram digitalizados e constituíram os PIs no imagem de cobertura do solo (descrição no item 5.3).

Na região da Bacia do Rio Potiribu, há aproximadamente 30 anos, a exploração vem sendo intensificada com o plantio da soja, chegando nos tempos atuais com uma agricultura totalmente mecanizada e o uso de pesticidas e fertilizantes. Conforme Castro (1992), as principais culturas da região são a soja e o milho no verão e o trigo e a aveia no inverno. Na maior parte da bacia, em geral os solos permanecem cobertos o ano inteiro, seja com lavoura ou pastagem. O solo fica descoberto apenas após a colheita de uma safra, imediatamente após a colheita a próxima cultura é plantada, ficando pouco tempo sem cobertura. O plantio das culturas de verão (soja e milho) ocorre em novembro e sua colheita em abril. As culturas de inverno (trigo e aveia), geralmente são plantadas em maio e colhidas em outubro. Na sub-bacia do Turcato está localizada a cidade de Pejuçara que ocupa aproximadamente 10% de sua área. Essa bacia é ocupada com agricultura na maior parte de sua extensão e com pecuária em uma área menor. A agricultura ocupa a totalidade da sub-bacia do Donato.

Uma informação importante é que 1990 foi um ano úmido (com total anual de 2159 mm) e as fortes chuvas da verão causaram um atraso na colheita da soja em 1991. Devido a essa demora, alguns agricultores atrasaram o plantio do trigo, e outros nem chegaram a plantar, deixando o solo descoberto, ou plantaram aveia apenas para usar como adubo. Já o ano de 1991, seco (total anual de 1225,3 mm), sendo que no mês de junho ocorreram chuvas acima da média (total mensal de 306,6 mm), apresentando-se como o mês mais chuvoso.

Os PIs com a informação da cobertura e uso do solo, obtidos a partir das imagens de satélite, das bandas 3, 4 e 5, dos dias 08/fev/1992, 03/out/1991 e 16/dez/1989, conforme descrito no item 5.2 e presentes no Anexo C.

Os seis parâmetros exigidos pelo modelo, que descrevem os tipos específicos de cobertura e manejo da bacia em questão, são a seguir comentados:

Parâmetros de Intercepção (PIT e PER): PIT é o volume de intercepção potencial que descreve o volume de umidade que pode ser removido se a área fosse completamente coberta pela

aquela cultura ou uso do solo. PER é a percentagem real da cobertura que considera a área sem cobertura não tendo intercepção. A Tabela 6.8 exemplifica alguns valores para PIT.

TABELA 6.8 - Valores de Intercepção Potencial:

COBERTURA VEGETAL	PIT (mm)
Aveia	0,5-1,0
Milho	0,3-1,3
Gramma	0,5-1,0
Pastagens	0,3-0,5
Trigo, centeio e cevada	0,3-1,0
Feijão, batata e couve	0,5-1,5
Mata	1,0-2,5

fonte: Manual do ANSWERS (Beasley e Huggins, 1981).

N de Manning (RN): a medida da rugosidade da superfície ou retardamento do escoamento usada na equação do escoamento no ANSWERS é o “n” de Manning. Esta informação, quando combinada com elementos como declividades, precipitação, intercepção, infiltração e considerações de perdas busca uma solução da equação da continuidade, a qual é a base do modelo ANSWERS. Há inúmeras fontes para obtenção de valores razoáveis de n, para canais e situações de escoamento na superfície.

Descritores de Armazenamento Superficial (HU e RC): HU é a altura máxima da rugosidade, usada para estabilizar os limites superiores da rugosidade da superfície, sendo fisicamente mensurável. RC é um coeficiente de rugosidade para descrever as características de armazenamento da superfície e a área da superfície alagada sendo, essencialmente, um fator de forma que descreve a frequência e o grau de severidade da rugosidade. A Tabela 6.9 mostra alguns valores típicos para HU e RC.

Erosividade Relativa (CDR): é usada na determinação de como muitos solos poderiam erodir, devido a uma cultura particular ou uso do solo quando comparado à lavra do subsolo sob condições idênticas. É uma combinação direta dos parâmetros de “C” e de “P” da USLE (Universal Soil Loss Equation) com um ajustamento sazonal.

TABELA 6.9 - Coeficientes Típicos de Armazenamento Superficial:

CONDIÇÃO SUPERFICIAL	HU (mm)	RC
Solo Arado		
Primavera - liso	100	0,53
Primavera - normal	130	0,48
Primavera - rugoso	130	0,59
Outono - liso	60	0,37
Outono - normal	70	0,33
Outono - rugoso	130	0,45
Arado de Disco e Grade		
liso	30	0,42
rugoso	60	0,43
Resteva de milho	110	0,59

fonte: Manual do ANSWERS (Beasley e Huggins, 1981).

Os valores do fator de cobertura e manejo (CDR) adotadas para as coberturas do solo existente nas sub-bacias do Potiribu são os sugeridos por Wischmeier e Smith (1978), considerados por Risso (1992) e também por Castro (1992), apresentados na Tabela 6.10.

TABELA 6.10 - Fator de Cobertura do Solo (CDR):

USO DO SOLO	FATOR COBERTURA SOLO (CDR)
ÁREA CULTIVADA	0,100
PASTAGEM	0,010
ÁREA URBANA	0,030
SOLO NÚ	0,500
RESTEVA	0,025
FLORESTA	0,001

fonte: Risso, 1992.

6.3 Delimitação das Bacias Hidrográficas

Foram utilizados os programas desenvolvidos por Risso (1993), adaptados dos algoritmos de Mark et al. (1984) e de Jenson e Domingue (1988) já descritos no item 4.4, para a determinação das declividades e orientação do escoamento, para cada um dos elementos da grade, definida na digitalização das curvas de níveis, nas diferentes resoluções. Obtendo-se assim, os PIs-grade de declividade e os PIs-grade de direção do escoamento para cada sub-bacia e para cada resolução definida.

É possível obter a definição dos divisores de água da bacia e os caminhos de drenagem através destes algoritmos como já foi exposto no item 3.2. Embora seja mais adequado, não foi este o procedimento utilizado neste trabalho, devido ao fato das sub-bacias de aplicação já

terem uma definição obtida por método tradicional, considerado em estudo comparativo. Os divisores de bacia e rede de drenagem considerados foram os digitalizados dos mapas altimétricos. Este encaminhamento implicou em algum ajuste visual obrigatório, da direção do escoamento nos limites da bacia, para que os cálculos transcorressem normalmente.

6.4 Discretização das Bacias

A escolha da dimensão dos elementos que compõem a grade da bacia a ser estudada é um passo tão importante quanto a escolha do modelo distribuído a ser utilizado. Os objetivos a serem alcançados, o tamanho da bacia, a topografia da região e as escalas das informações disponíveis, são fatores definidores da resolução (ou seja, tamanho do pixel) mais adequada a ser adotada.

O objetivo a ser alcançado nesta seção é analisar os benefícios trazidos pela entrada de informações em grades mais detalhadas, para a simulação do escoamento em bacias agrícolas. Para tanto, foram utilizados PIs em duas resoluções espaciais diferentes para os projetos FOA e FOB, com relevo pouco íngreme e cujas áreas são inferiores a 1 km² (< 100 ha.), a menor tendo os elementos de 50 x 50 m (a mesma discretização utilizada por Goldenfum (1991)), e a maior de 25 x 25 m, de modo a dar algum sentimento dos “ganhos” em reduzir o elemento, isto é, aumento da resolução, ainda que a escala da informação de entrada seja mantida. Para o projeto DON, representando bacias de 1 km², foram utilizadas as resoluções de 30 m, 60 m, 100 m e 200 m, e para o projeto TUR (>1000 ha.), que é 18 vezes maior e que contém a sub-bacia de 1 km², adotou-se a discretização de 200 m. As duas últimas sub-bacias apresentam relevo ondulado suave.

As áreas das bacias e as declividades dos elementos da bacia e dos elementos do canal sofrem uma pequena variação conforme a resolução em que se está trabalhando, e são apresentadas nas Tabelas 6.11 e 6.12.

A área total da bacia diminui com o aumento do tamanho da grade. A diferença da sub-bacia DON, por exemplo, é de 0,05 km² entre a grade de células 30 m e a de 200 m, correspondendo a 4,5% da área da bacia.

TABELA 6.11 - Declividades Calculadas pelo Modelo para as sub-bacias do Rio Forquetinha:

BACIA		FOA			FOB		
Resolução		Anterior	50 m	25 m	Anterior	50 m	25 m
Total Elementos	(n°)	220	215	874	157	150	606
Canal Elementos	(n°)	25	30	66	53	70	166
Área Total	(km ²)	0,550	0,538	0,545	0,393	0,375	0,379
Declividade da Bacia (%)	mín.	4,50	0,10	0,10	5,10	0,10	0,10
	méd.	32,56	19,80	19,77	28,90	16,76	17,29
	máx.	59,10	36,40	43,40	42,60	28,30	31,00
Declividade do Canal (%)	mín.	5,00	6,80	4,40	5,00	0,10	0,10
	méd.	21,35	22,38	23,17	22,72	20,53	21,20
	máx.	37,80	45,30	49,70	43,30	37,00	41,20

anterior: método manual utilizado por Goldenfum (1991).

TABELA 6.12 - Declividades Calculadas pelo Modelo para as sub-bacias do Rio Potiribu:

BACIA		DON				TUR
Resolução		200m	100m	60 m	30 m	200 m
Total Elementos	(n°)	28	112	319	1303	478
Canal Elementos	(n°)	14	30	46	84	152
Área Total	(km ²)	1,12	1,11	1,148	1,171	19,12
Declividade da Bacia (%)	mín.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30
	méd.	2,77	2,81	3,58	3,51	2,90
	máx.	6,20	10,90	20,80	14,10	9,60
Declividade do Canal (%)	mín.	1,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	méd.	5,24	8,79	3,88	3,93	4,41
	máx.	10,00	13,60	32,60	18,30	13,90

anterior: método manual utilizado por Goldenfum (1991).

As declividades mínima, média e máxima de toda a bacia e do canal, para FOA e FOB, calculadas para cada resolução, analisadas com as obtidas pelo algoritmos utilizados descritos no capítulo 5, resultaram menores que as obtidas por Goldenfum (1991) ainda que partindo do mesmo mapa altimétrico, sendo explicado pelas distinções entre os algoritmos de interpolações utilizadas em cada caso.

No caso da declividade do canal, no entanto, o processo utilizado por Goldenfum (1991) foi o cálculo manual, através de pontos definidos no canal, especificamente (e não a média do elemento), já o processo utilizado no presente estudo foi através da rotina CANAL (apresentada no Anexo D), que calcula a declividade do canal para uma resolução 50 m, por exemplo, a partir de um plano que destaca as cotas do canal, em resolução maior, 10 m por exemplo. Este processo demonstrou uma subestimativa do valores das declividades do canal, sendo mais aconselhável entrar com os valores pontuais das seções do canal no PI contendo os elementos de canal assinalados. No caso da sub-bacia FOA as declividades do canal exigiram uma supervisão visual e reavaliação de alguns elementos.

Já as declividades de DON e TUR calculadas, são coerentes com as apresentadas na Tabela 6.2. Embora tenha sido utilizado o mesmo algoritmo, Risso (1993) obteve declividades maiores para estas duas sub-bacias: 7,2% e 7,4%, respectivamente. O fator que explica esta diferença, é que no presente estudo a grade utilizada no MNT já estava “mascarada” com os limites da bacia, enquanto que no outro trabalho as declividades foram geradas da grade completa, ou seja, contendo as extrapolações.

Visando a escolha do tamanho ideal para as bacias desse estudo, foram considerado o tamanho da bacia, a escala das cartas plani-altimétricas a serem digitalizadas, a resolução espacial do sensor TM quando utilizadas as imagens de satélite, analisando também o espaçamento das curvas de nível e a declividade média de cada região. A Tabela 6.13 reúne todas estas informações e conduz à definição da grade mais adequada para cada caso.

TABELA 6.13 - Relação entre as Resoluções Utilizadas:

Sub-bacia	Área (ha.)	Resolução		Escala de Informação	Resolução (m)	Curva Nível (m)	Decliv. Média (m/10m)	Res. Satélite	
		larg. (m)	área (ha.)					larg. (m)	área (ha.)
FOA	55,0	50	0,25	1:2500	25	10	3,26	—	—
		25	0,0625						
FOB	39,3	50	0,25	1:2500	25	10	2,89	—	—
		25	0,0625						
DON	110,0	200	4,00	1:25000	250	20	0,47	30	0,09
		100	1,00						
		60	0,36						
		30	0,09						
TUR	1940,0	200	0,04	1:25000	250	20	0,20	30	0,09

Uma análise “a priori”, conduz a investigação de uma grade já utilizada no estudo anterior, para as bacias pequenas, FOA e FOB e uma grade mais detalhada observando o aproveitamento da escala dos mapas de informação. Para DON optou-se por tamanhos diferenciados para enfatizar o que ocorre com o distanciamento entre a resolução de simulação e a escala dos mapas de entrada de informação, salientando-se que neste caso foram utilizadas as imagens da cobertura do solo, obtidas numa resolução maior de 30 m. Na simulação de TUR é visto claramente que pelo tamanho da bacia e da informação da entrada não haveria muitas vantagens em trabalhar com elementos menores que 200 x 200 m.

6.5 Simulações

As simulações foram programadas com as seguintes etapas:

Simulação sem ajuste : Este procedimento configura a situação que freqüentemente deverá ocorrer com o uso desse modelo na prática, uma vez que dificilmente existirão dados de bacias pequenas para este tipo de simulação;

Simulação com ajuste : Esta situação mais rara, permite analisar o grau de dificuldade em ajustar um modelo a uma bacia pequena, onde o modelo distribuído possui um número muito grande de parâmetros em função do número de elementos.

As simulações das 4 sub-bacias feitas sem ajuste, obtidos somente a partir das características físicas dos sistemas, têm seus resultados expostos na Tabela 6.14. Os valores de volume escoado medido relacionado com os calculados, para cada sub-bacia são demonstrados graficamente nas Figuras 6.3a, 6.4a , 6.5a, 6.6a, (respectivamente, FOA, FOB, DON e TUR) enquanto que as figuras respectivas, com o índice b relacionam a vazão de pico. Estes gráficos auxiliam na visualização dos valores apresentados na Tabela 6.14.

A Figura 6.2 relaciona os volumes escoados, medido e calculado para cada uma das 4 resoluções, para a sub-bacia do Donato. Os hidrogramas da sub-bacia DON e TUR estão expostos nas Figuras 6.7 até 6.10.

Os hidrogramas resultantes das sub-bacias menores FOA e FOB, são apresentados nas Figuras 6.13, 6.15 e 6.17, sem ajuste dos parâmetros e com ajuste para os mesmos eventos, respectivamente nas Figuras 6.14, 6.16 e 6.18.

TABELA 6.14 - Resultados do Modelo ANSWERS:

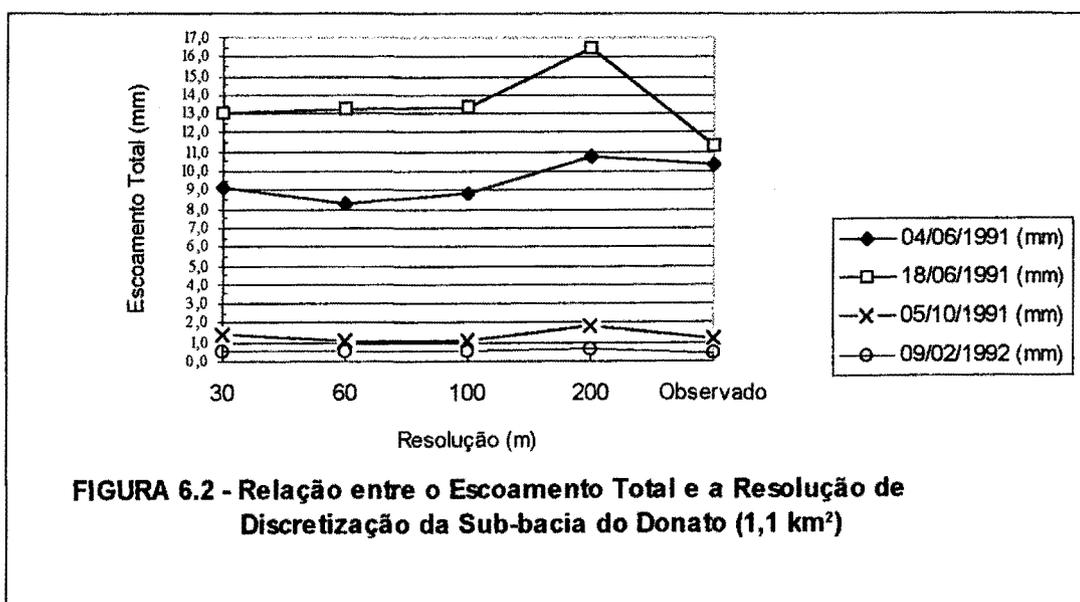
SUB-BACIA	EVENTO	PRECIP. TOTAL (mm)	IPA (dia)	QTOT MEDIDO (mm)	SEDIM. MEDIDO (t)	qp MED. (mm/h)	ESC. (m)	QTOT CALC. (mm)	SEDIM. CALC. (t)	qp CALC. (mm/h)
FOA	03/08/79	73,0	13	17,03	20,93	1,02	50 25	16,03 18,95	5,31 8,42	4,60 6,94
	31/08/79	23,0	6	3,00	2,81	0,51	50 25	0,30 0,39	0,13 0,12	0,57 0,74
	04/10/79	102,0	4	41,75	114,92	1,70	50 25	39,52 41,54	18,83 19,96	11,45 12,04
FOB	23/06/79	36,0	20	6,36	1,03	0,53	50 25	6,38 6,91	0,06 0,07	0,30 0,32
	03/08/79	59,0	13	20,29	11,18	1,78	50 25	11,97 12,25	1,28 1,28	1,86 1,83
DON	04/06/91	142,7	12	10,30	ND	4,78	200	10,72	8,27	4,15
							100	8,38	7,01	3,28
							60	8,30	6,71	3,08
							30	9,14	6,96	2,64
	18/06/91	57,6	2	11,35	ND	4,12	200	16,46	1,83	2,23
100							13,29	1,71	1,17	
60							13,20	1,67	0,74	
05/10/91	54,2	5	1,31	ND	0,60	200	1,83	1,78	1,12	
						100	1,12	3,18	1,01	
9/02/92	26,2	4	0,44	ND	0,06	60	1,06	1,35	0,94	
						30	1,41	2,16	0,90	
						200	0,68	0,09	0,13	
TUR	04/06/91	142,7	12	11,39	ND	1,27	200	11,03	103,89	1,37
	18/06/91	57,0	2	8,49	ND	0,79	200	13,40	23,20	0,53
	05/10/91	54,6	5	4,39	ND	0,52	200	4,76	46,38	0,88
	9/02/92	35,6	4	2,45	ND	0,22	200	2,64	47,60	0,85

IPA = número de dias anteriores sem chuva;

QTOT = volume total escoado;

qp = vazão de pico;

ND = dado não disponível.



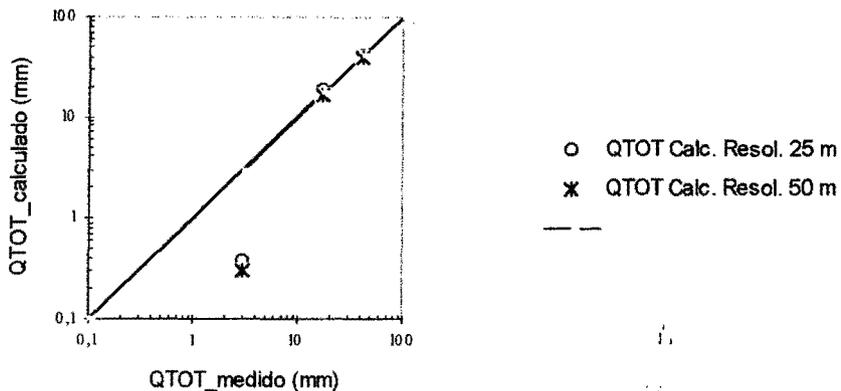


FIGURA 6.3a - Resultados de Volume Escoado - sub-bacia FOA

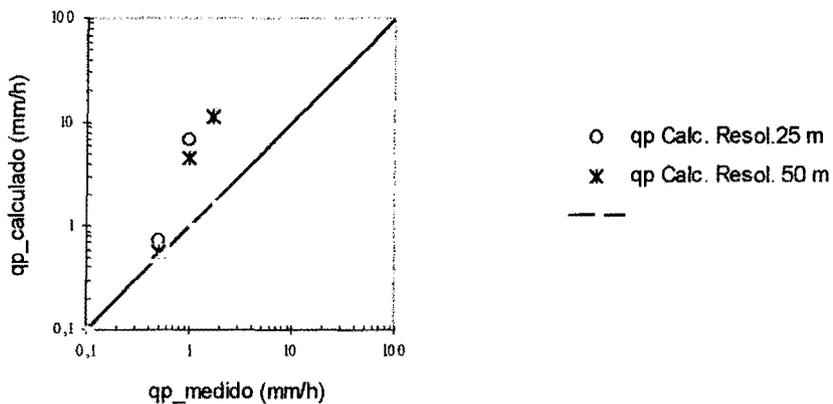


FIGURA 6.3b - Resultados de Vazão de Pico - sub-bacia FOA

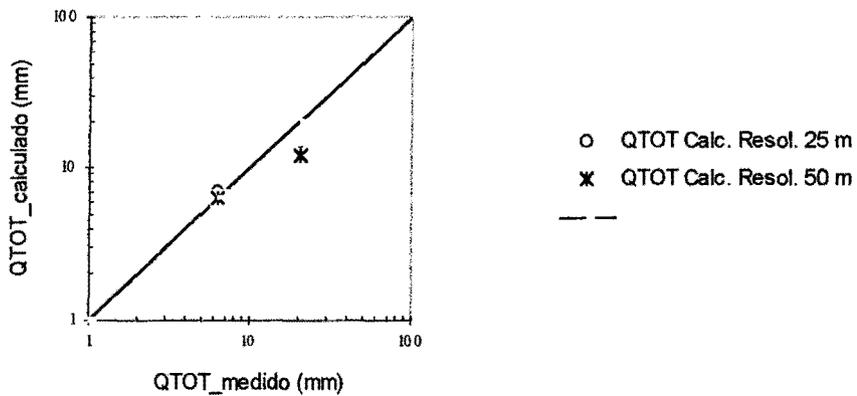


FIGURA 6.4a - Resultados de Volume Escoado - sub-bacia FOB

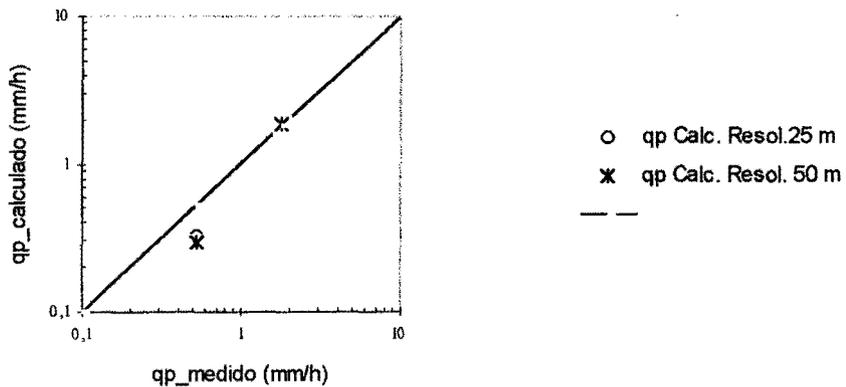


FIGURA 6.4b - Resultados de Vazão de Pico - sub-bacia FOB

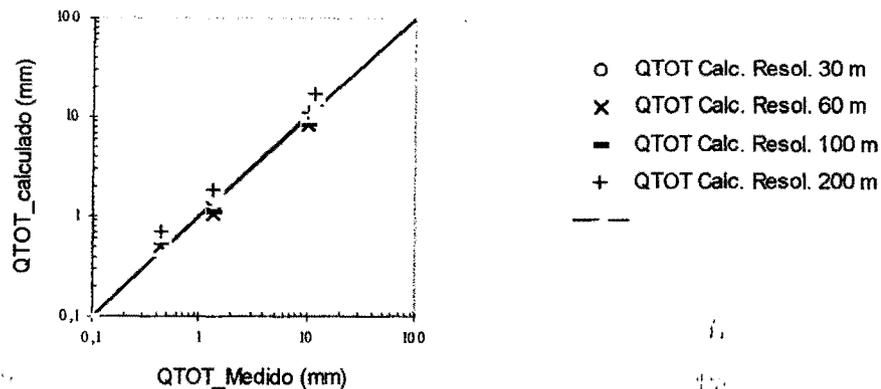


FIGURA 6.5a - Resultados de Volume Escoado - sub-bacia DON

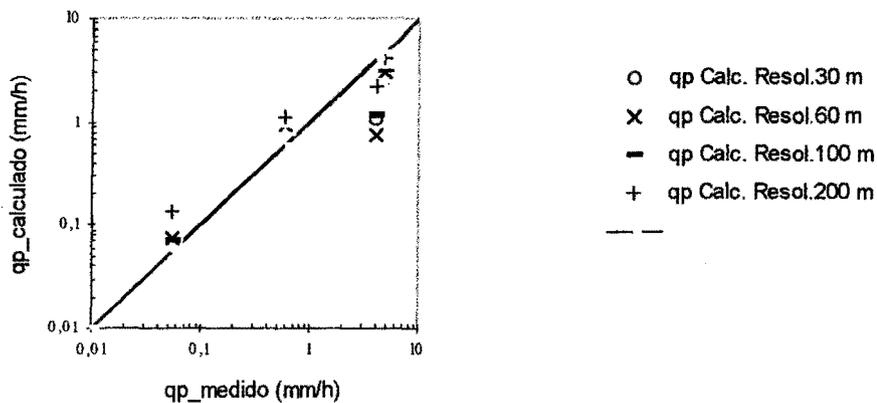


FIGURA 6.5b - Resultados da Vazão de Pico - sub-bacia DON

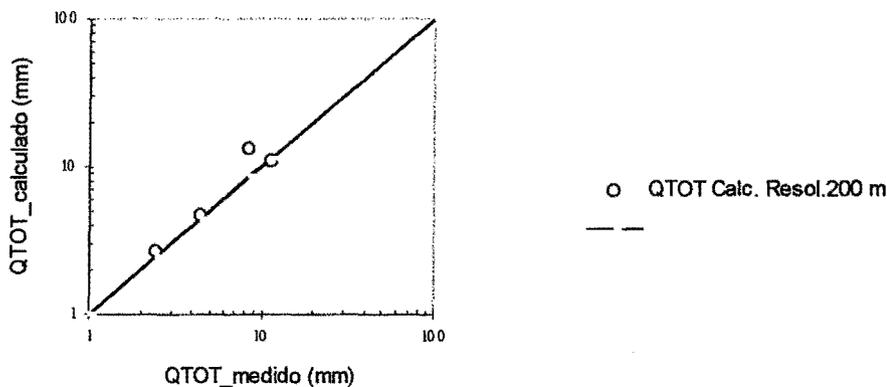


FIGURA 6.6a - Resultados de Volume Escoado - sub-bacia TUR

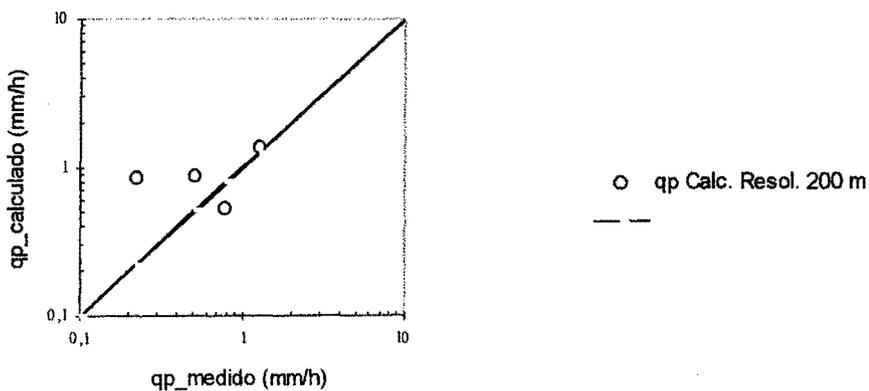


FIGURA 6.6b - Resultados de Vazão de Pico - sub-bacia TUR

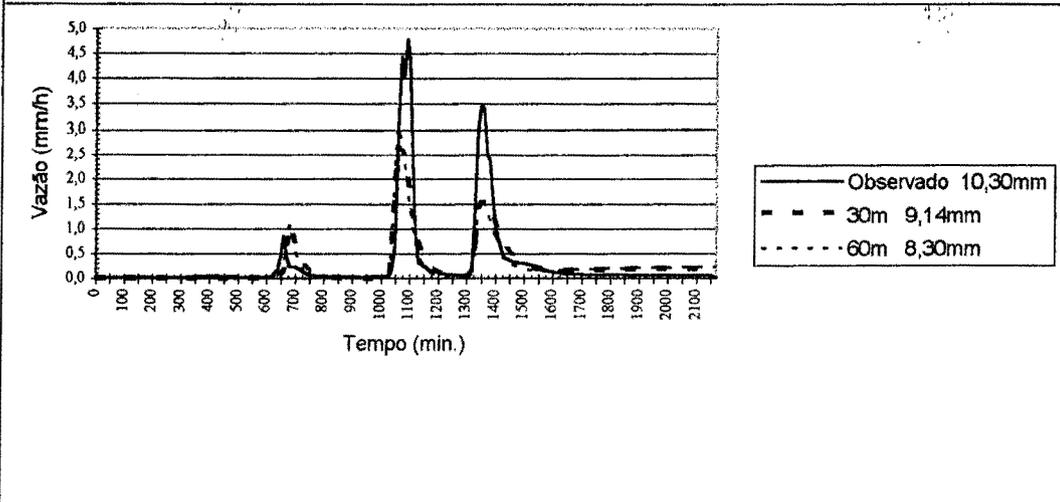
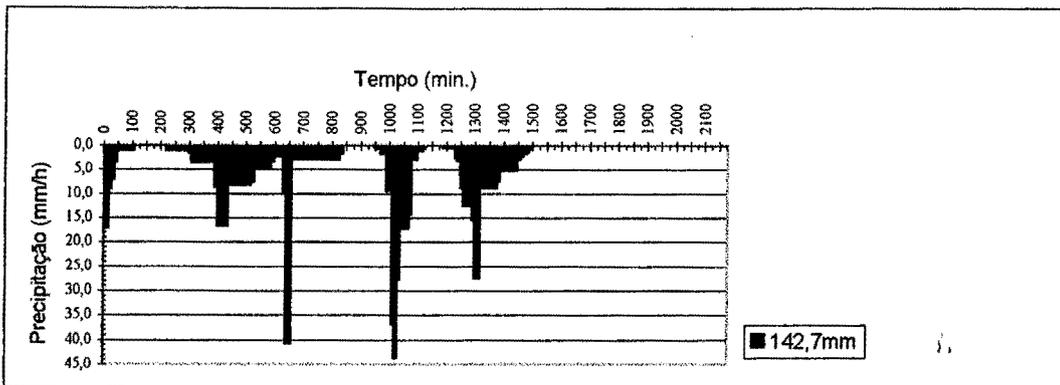


FIGURA 6.7a - Evento 04/06/1991 - sub-bacia Donato (DON - 1,1 km²)

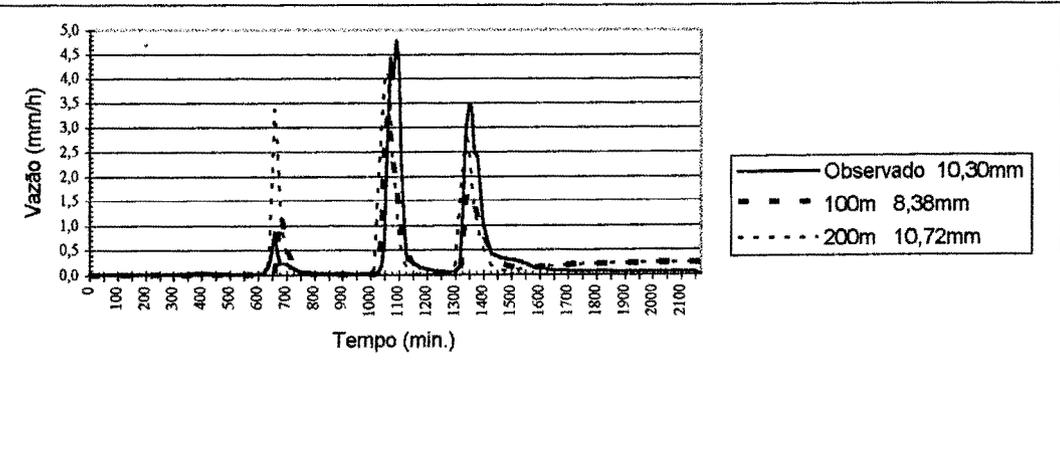
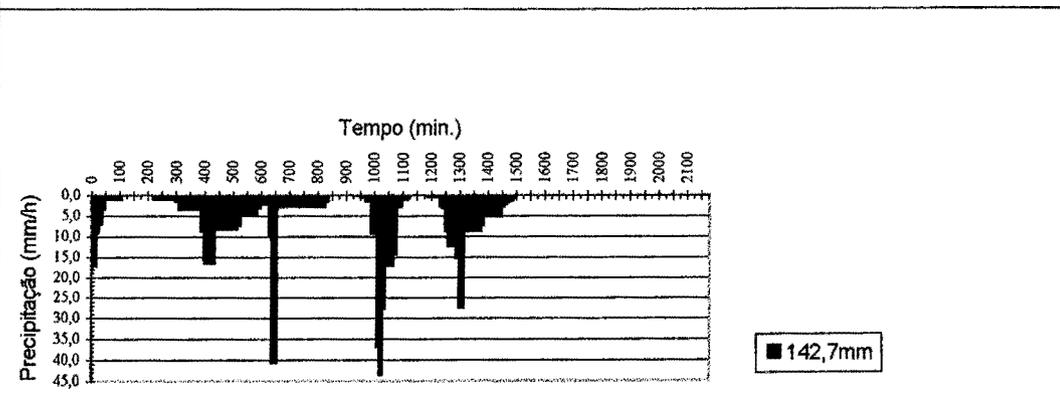


FIGURA 6.7b - Evento 04/06/1991 - sub-bacia Donato (DON - 1,1 km²)

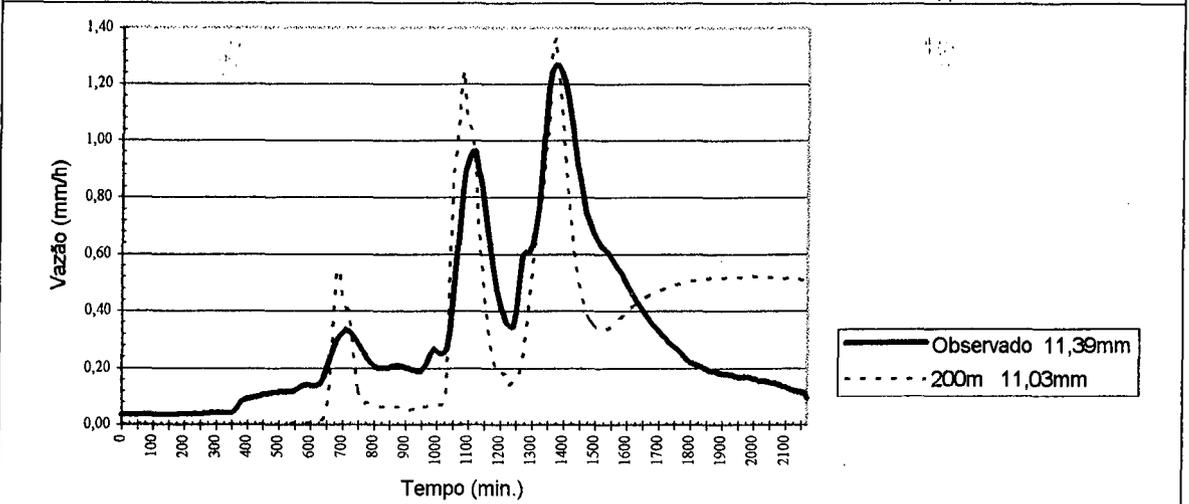
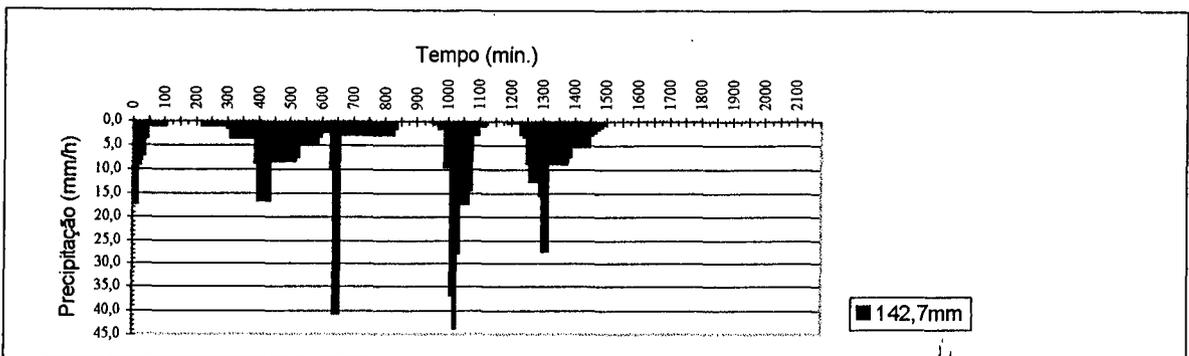


FIGURA 6.8 - Evento 04/06/1991 - sub-bacia Turcato (TUR - 19,4 km²)

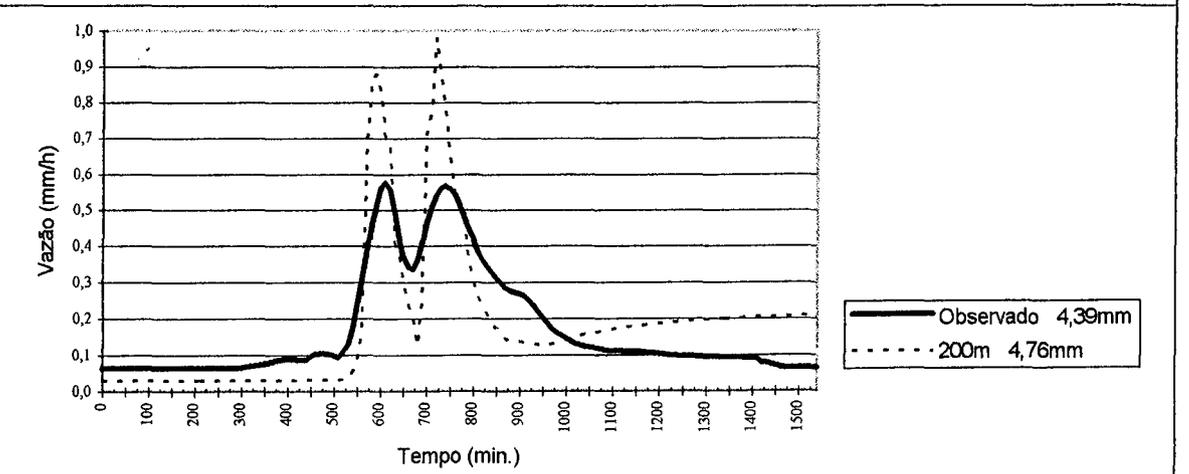
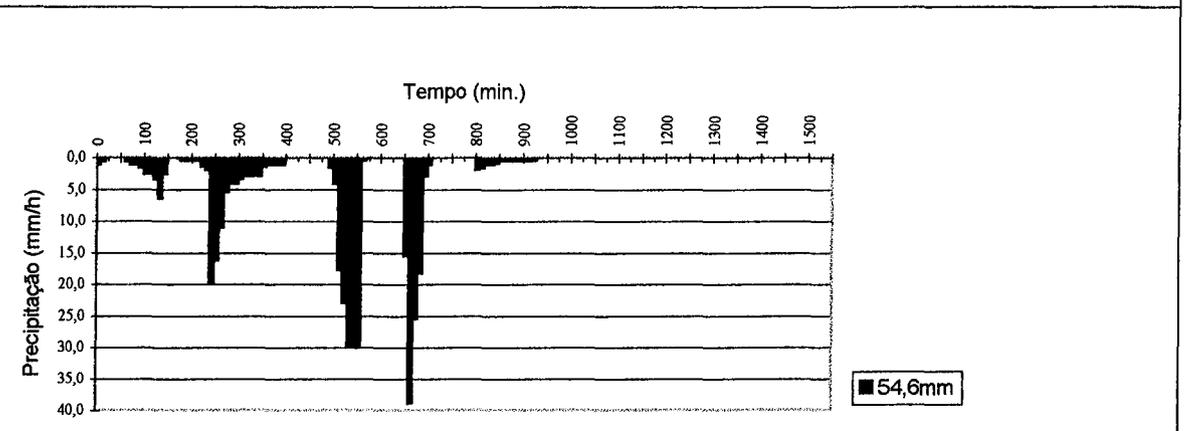


FIGURA 6.9 - Evento 05/10/1991 - sub-bacia Turcato (TUR - 19,4 km²)

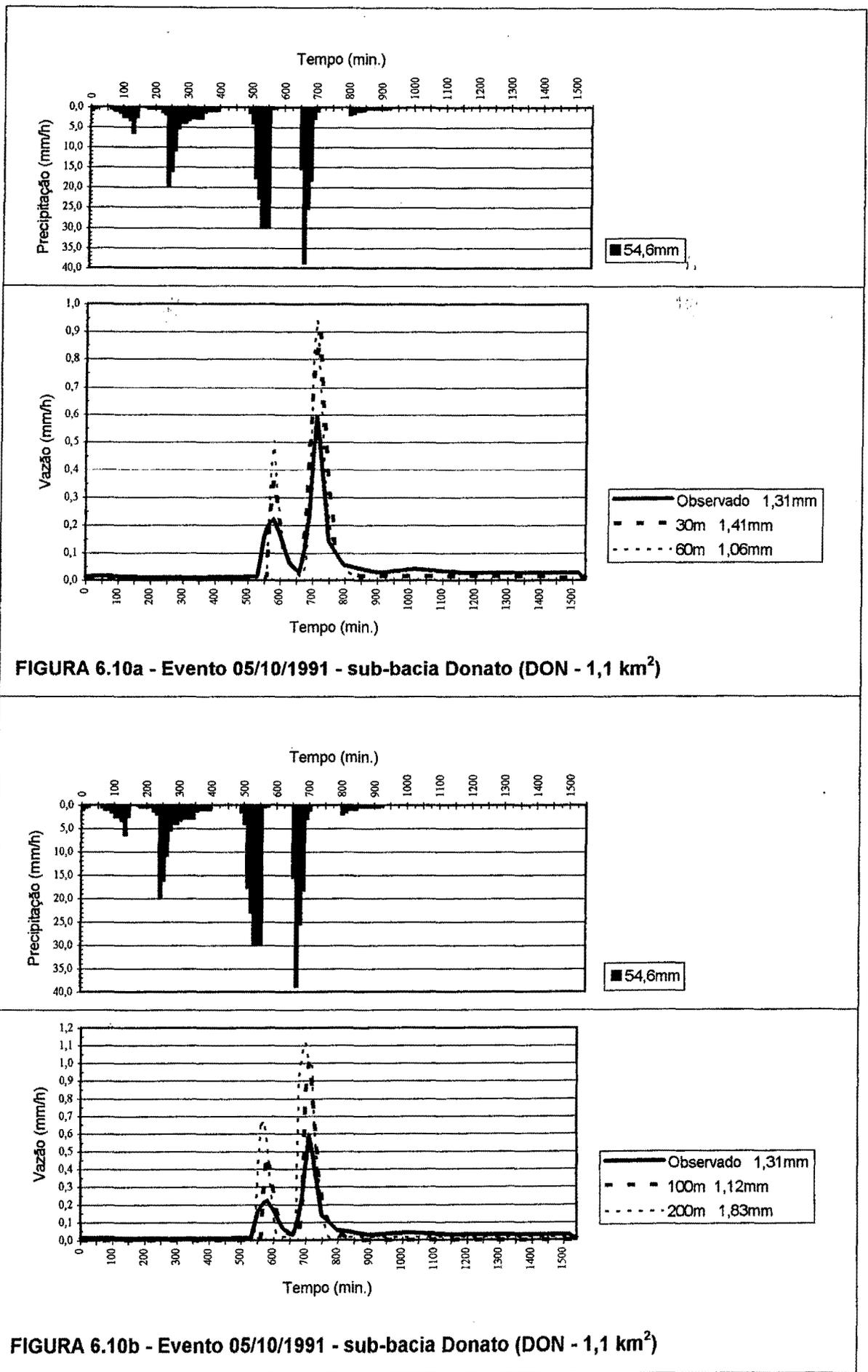


FIGURA 6.10a - Evento 05/10/1991 - sub-bacia Donato (DON - 1,1 km²)

FIGURA 6.10b - Evento 05/10/1991 - sub-bacia Donato (DON - 1,1 km²)

6.5.1 Análise dos Resultados sem Ajuste

A análise dos resultados das aplicações realizadas com este modelo conceitual distribuído, se baseiam em poucos eventos analisados para cada sub-bacia. A pouca disponibilidade de dados observada de sedimentos produzidos nas sub-bacias, restringe às discussões do aspecto sedimentológico do modelo.

A investigação dos resultados obtidos tem o principal objetivo de questionar a validade da utilização das informações geoprocessadas em substituição à forma tradicional, com possibilidade de se trabalhar com resoluções espaciais maiores, verificando qual o “ganho” obtido com o aumento da grade de estudo. A avaliação da adaptabilidade do modelo conceitual em questão às situações propostas também é incentivada observando o ajuste de alguns eventos das sub-bacias A1 e B1.

Os parâmetros utilizados na simulação das sub-bacias A1 e B1 do Forquetinha, aqui chamadas de projeto FOA e FOB, observam as considerações feitas por Goldenfum (1991), que apresenta uma análise de sensibilidade do modelo. Também para as outras duas sub-bacias, Donato e Turcato (DON e TUR) tomou-se como base esta análise. Consideraram-se os parâmetros para solo franco-argiloso para as sub-bacias do Forquetinha, e solo argilo-siltoso e argiloso para as sub-bacias do Potiribu. Não foi feito o ajuste para as duas últimas, sendo adotados os parâmetros apenas considerando as características físicas da bacia. Os valores adotados para cada parâmetro exigido pelo modelo, para cada sub-bacia são demonstrados no Anexo B.

Assim, são apresentados os resultados das simulações e os erros relativos correspondentes, tanto para a lâmina do total escoado como também para a vazão de pico, apresentando também os resultados obtidos por processo manual, por Goldenfum (1991), para efeito de comparação. As Tabelas 6.15 e 6.16 demonstram estes valores para as sub-bacias FOA e FOB, e a Tabela 6.17 apresenta os valores das sub-bacias DON e TUR. O erro relativo apresentado é a diferença entre o dado calculado e o observado em relação ao dado observado, possibilitando a comparação dos resultados obtidos.

TABELA 6.15 - Comparação dos Escoamentos Obtidos para as sub-bacias A1 e B1 do Rio Forquetinha:

SUB-BACIA	EVENTO	MEDIDO		ANTERIOR*		ESC. (m)	CALCULADO	
		QTOT(mm)	qp(mm/h)	QTOT(mm)	qp(mm/h)		QTOT(mm)	qp(mm/h)
FOA	03/08/79	17,03	1,02	15,42	4,18	50	16,03	4,60
						25	18,95	6,94
	31/08/79	3,00	0,51	0,22	0,46	50	0,30	0,57
						25	0,39	0,74
	04/10/79	41,75	1,70	34,67	7,68	50	39,52	11,45
						25	41,54	12,03
FOB	23/06/79	6,36	0,53	1,01	0,04	50	6,38	0,30
						25	6,91	0,32
	03/08/79	20,29	1,78	8,24	0,83	50	11,97	1,86
						25	12,25	1,83

* Resultados obtidos por Goldenfum (1991), com método manual.

TABELA 6.16 - Erro Relativo (em %) do Modelo para as aplicações das sub-bacias A1 e B1 do Rio Forquetinha:

SUB-BACIA	EVENTO	ANTERIOR*		50 m		25 m	
		QTOT	qp	QTOT	qp	QTOT	qp
FOA	03/08/79	-9,46	+309,06	-5,87	+350,40	+11,32	+579,66
	31/08/79	-92,61	-9,09	-89,95	+12,65	-87,02	+45,45
	04/10/79	-16,95	+351,12	-5,33	+572,80	-0,50	+607,11
FOB	23/06/79	-84,10	-92,12	+0,39	-43,75	+8,62	-39,02
	03/08/79	-59,40	-53,29	-41,02	+4,73	-39,63	+3,04

* Resultados obtidos por Goldenfum (1991), com método manual.

TABELA 6.17 - Comparação dos Escoamentos Obtidos para as sub-bacias DONato e TURcato e respectivos erros relativos:

SUB-BACIA	EVENTO	MEDIDO		ESC. (m)	CALCULADO			
		QTOT(mm)	qp (mm/h)		QTOT(mm)	ERRO (%)	qp (mm/h)	ERRO (%)
DON	04/06/91	10,299	4,778	200	10,72	+4,08	4,15	-13,21
				100	8,38	-18,61	3,28	-31,27
				60	8,30	-19,41	3,08	-35,54
				30	9,14	-11,21	2,64	-44,73
	18/06/91	11,350	4,124	200	16,47	+45,07	2,23	-45,85
				100	13,29	+17,11	1,17	-71,70
				60	13,20	+16,27	0,74	-82,00
				30	13,05	+14,93	1,08	-73,84
	05/10/91	1,313	0,596	200	1,83	+38,99	1,12	+87,25
				100	1,12	-14,93	1,01	+68,96
				60	1,06	-19,42	0,94	+58,22
				30	1,41	+7,69	0,90	+50,84
	10/02/92	0,438	0,056	200	0,68	+55,94	0,13	+139,28
				100	0,56	+27,40	0,07	+28,57
				60	0,49	+12,56	0,07	+32,14
				30	0,49	+11,64	0,07	+23,21
TUR	04/06/91	11,385	1,266	200	11,03	-3,15	1,37	+7,80
	18/06/91	8,494	0,791	200	13,40	+57,76	0,53	-32,49
	05/10/91	4,389	0,517	200	4,76	+8,48	0,88	+52,51
	10/02/92	2,453	0,221	200	2,64	+7,62	0,85	+284,62

Com respeito às simulações efetuadas para as sub-bacias do Forquetinha, nas Tabelas 6.15 e 6.16 e Figuras 6.3a,b e 6.4a,b, observa-se que os eventos escolhidos da série de eventos já simulados no estudo comparativo, resultam em estimativas razoáveis, considerando-se que ainda não houve ajuste dos parâmetros. Os resultados obtidos para a resolução de 25 m, apresentam-se com menores erros relativos que para a resolução de 50 m. Isto justifica-se por apresentar-se mais compatível à escala das cartas com informações de entrada de altitudes, solos e cobertura do solo. Considerando o tamanho das sub-bacias, seria válido uma malha mais detalhada (resolução espacial de 10 m), no caso de que a entrada de informação também aumentasse o detalhamento. As melhorias são evidenciadas quando a simulação é feita com os parâmetros do modelo ajustados, constatados pelas Tabela 6.18 e pelas Figuras 6.14, 6.16 e 6.18.

Para as simulações feitas para as sub-bacias do Potiribu, considerando que não houve ajuste, os resultados são aceitáveis. Os erros relativos menores são referentes às simulações feita para a resolução de 200 m, principalmente para TUR ($> 10 \text{ km}^2$). Observa-se, que a escala utilizada para entrada das informações topográficas e também pedológica, 1:25000 é pouco indicada para estudos com resoluções muito detalhadas (30 m e 60 m). A informação de cobertura e uso de solo, obtida por imagens de satélite, com resolução de 30 m não representa melhoria significativa se for utilizada juntamente com informações obtidas de escalas menores.

Ainda assim, os resultados obtidos para as simulações de DON ($1,1 \text{ km}^2$) para as resoluções 60 m e 100 m, merecem atenção. Analisando o gráfico da Figura 6.2, denota-se que não há muitos benefícios em aumentar o número de elementos da grade (isto é, reduzir o tamanho do elemento). No entanto, deve-se considerar que se houver um maior detalhamento na entrada de informações (escala maior, menor intervalos de curvas de nível, maior quantidade de pontos particulares do canal), combinadas às informações fornecidas por imagens de satélite poderiam trazer um melhor ajuste dos hidrogramas, demonstrados nas Figuras 6.7 a 6.10.

Em síntese, considerando que não houve ajuste dos parâmetros, os resultados mostraram o seguinte:

- a . Os volumes calculados se aproximaram bem dos observados nos eventos analisados;

- b. Na bacia do Donato, o modelo tende a subestimar os maiores eventos e superestimar os menores, quanto ao pico e vazões maiores. Na bacia do Turcato, nos dois eventos menores o modelo superestimou os picos;
- c. Em quase todos os eventos o modelo conseguiu sincronizar o tempo de pico com relação aos valores observados;
- d. na discretização, observou-se um pequeno ganho relativo.

6.5.2 Tentativa de Ajuste

O ajuste de parâmetros com modelo distribuído é um processo que envolve um profundo conhecimento e sensibilidade do modelo e da bacia em estudo. O grande número de fatores constitui um processo extremamente demorado e de resultados incertos. Neste trabalho, buscou-se melhorar os resultados da bacia do Rio Forquetinha onde estes apresentaram-se mais deficientes. Considerando as conclusões de Goldenfum (1991) a respeito da sensibilidade dos parâmetros do modelo ANSWERS, que analisou 9 parâmetros, sendo 3 de caracterização do solo (TP, FP, SKDR), 2 de cobertura e uso do solo (PIT e RN) e 4 de infiltração (P, A, ASM e FC), o principal alvo de investigações foram os últimos que relacionam à infiltração que apresentam alta sensibilidade.

Os parâmetros A e FC (que variam de acordo com o intervalo de permeabilidade, como pode ser visto na Tabela 6.5), o ASM (condições iniciais relacionado aos dias antecedentes sem chuva), também DF (profundidade da zona de controle de infiltração) e GRF (fração de perda de água subterrânea) foram alterados para o ajuste dos eventos nas sub-bacias FOA e FOB. Foi ainda feita uma pequena alteração no expoente de infiltração “P”, dentro do intervalo admissível para a textura de solo adotada, causando pequena alteração na recessão e no pico do hidrograma resultante.

Os descritores da infiltração, A e FC, foram analisados conjuntamente observando o intervalo de permeabilidade, inicialmente adotado como 40 mm/h, foi reduzido para 36 mm/h, chegando a A de 18 mm/h e FC de 9 mm/h, conforme a Tabela 6.5. O intervalo de permeabilidade ao ser reduzido, implicou no aumento do volume total escoado. Assim também, a umidade antecedente do solo (ASM) foi reavaliada para cada evento, mas não sofreu grande variação, somente para o evento 03/08/79 para a sub-bacia FOB, que foi acrescido de 10%, acarretando o aumento do volume total escoado.

As profundidades de controle de infiltração foram alteradas em alguns tipos de solo para a sub-bacia FOB, causando a redução na vazão de pico do hidrograma. Foi perceptível a variação deste parâmetro quando feita a alteração de resolução dos elementos de 50 m para 25 m. É interessante observar que estes parâmetros médios para os diversos tipos de solo, podem alcançar resultados melhores se forem analisados por regiões da bacia.

Os resultados obtidos com ajuste dos parâmetros para um evento de FOA e de dois eventos FOB são apresentados na Tabela 6.18.

Os resultados referentes as descargas de sedimentos são apresentados na Tabela 6.19, para as bacias simuladas inferiores a 1 km², as quais dispõem apenas de volumes totais observados. Os resultados de sedimentos totais após o ajuste de parâmetros, não são representativos. A subestimativa dos valores, de maneira geral, salienta a necessidade de reavaliação das constantes internas do modelo, procurando adaptá-lo para a região de interesse. Os volumes totais medidos em relação aos calculados com ajuste são demonstrados, também graficamente, nas Figuras 6.11 (FOA) e 6.12 (FOB).

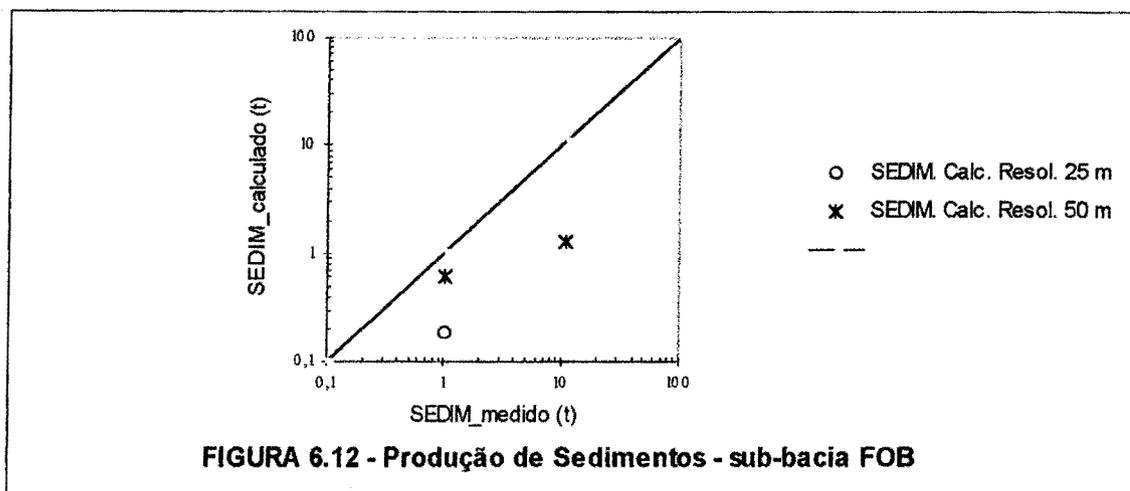
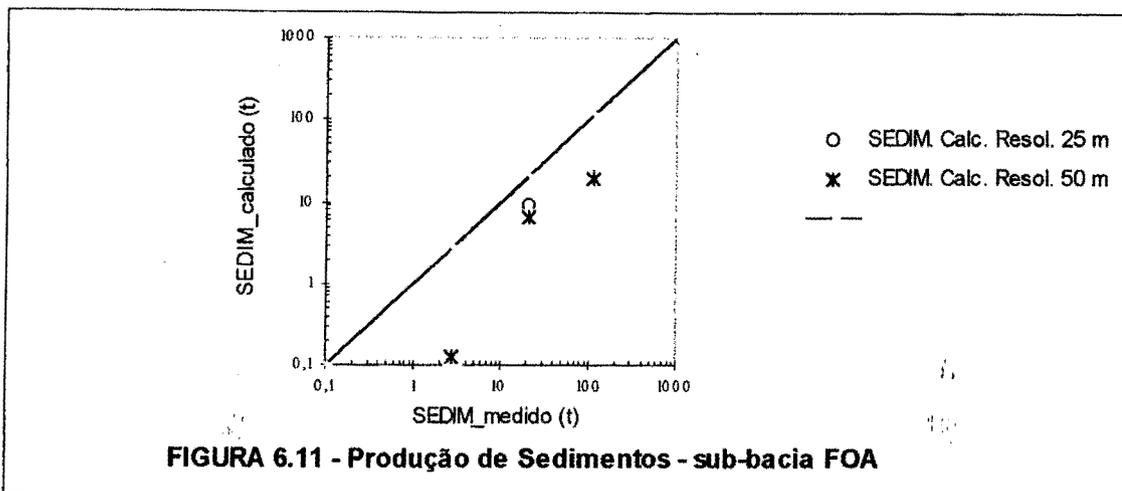
TABELA 6.18 - Comparação dos Escoamentos Obtidos com Ajuste das sub-bacias A1 e B1 do Rio Forquetinha:

SUB-BACIA	EVENTO	MEDIDO			AJUSTADO		ERRO RELATIVO	
		QTOT(mm)	qp(mm/h)	(m)	QTOT(mm)	qp(mm/h)	QTOT(%)	qp(%)
FOA	03/08/79	17,03	1,02	25	16,05	1,40	-5,75	+37,02
FOB	23/06/79	6,36	0,53	25	6,33	0,53	-0,47	+0,38
	03/08/79	20,29	1,78	25	18,73	1,86	-7,69	+4,84

TABELA 6.19 - Comparação dos Sedimentos Totais Obtidos das sub-bacias A1 e B1 do Rio Forquetinha:

SUB-BACIA	EVENTO	SEDIM. MEDIDO	SEDIM.* ANT.	ERRO RELAT.	SEDIM. CALC.	ERRO RELAT.	SEDIM. CALC.	ERRO RELAT.
		(t)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)
		50 m			50 m		25 m	
FOA	03/08/79	20,93	7,30	-65,13	5,31	-74,63	8,42	-59,80
	ajuste				6,42	-69,33	9,32	-55,48
	31/08/79	2,81	0,13	-95,37	0,13	-95,40	0,12	-95,90
	04/10/79	114,92	24,60	-78,60	18,83	-83,61	19,96	-82,63
FOB	23/06/79	1,03	0,00	-100,0	0,60	-41,92	0,07	-93,32
	ajuste				0,60	-41,92	0,18	-82,57
	03/08/79	11,18	0,87	-92,22	1,28	-88,56	1,28	-88,54
	ajuste				1,28	-88,56	1,28	-88,54

* Resultados obtidos por Goldenfum (1991), com método manual.



Em ambos os casos (Forquetinha e Potiribu), são necessários estudos mais específicos para as definições dos parâmetros do modelo e adaptabilidade deste para cada região. Pesquisas de campo mais aprofundadas tornariam as investigações mais consistentes e possibilitariam a avaliação das constantes utilizadas internamente nos algoritmos do modelo. Outros trabalhos de avaliação e validação do modelo ANSWERS, como os de Thomas e Beasley (1986) e mais atualmente, De Roo (1993) concluíram a necessidade de modificações para a utilização deste modelo quando usado em outras áreas que não as originais para as quais foram testados e desenvolvidos, implicando em maior incentivo à exploração e medições mais adequadas dos dados de campo.

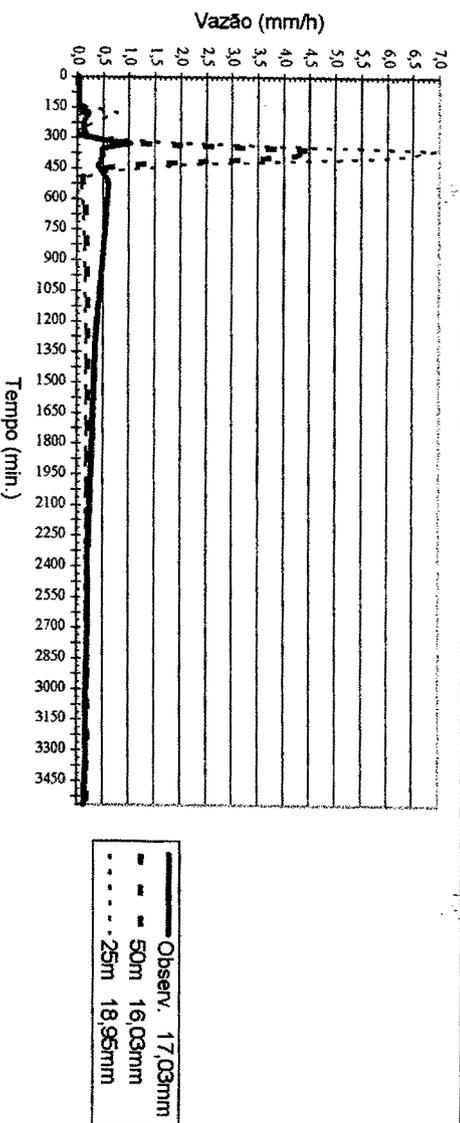
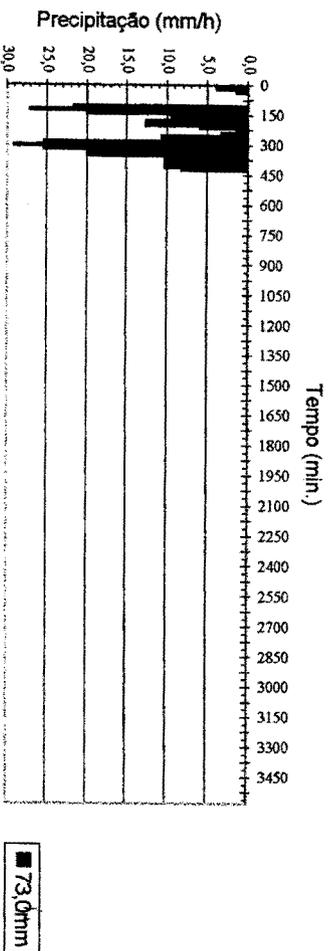


FIGURA 6.13 - Evento 03/08/1979 - sub-bacia A1 (FOA - 0,55 km²)

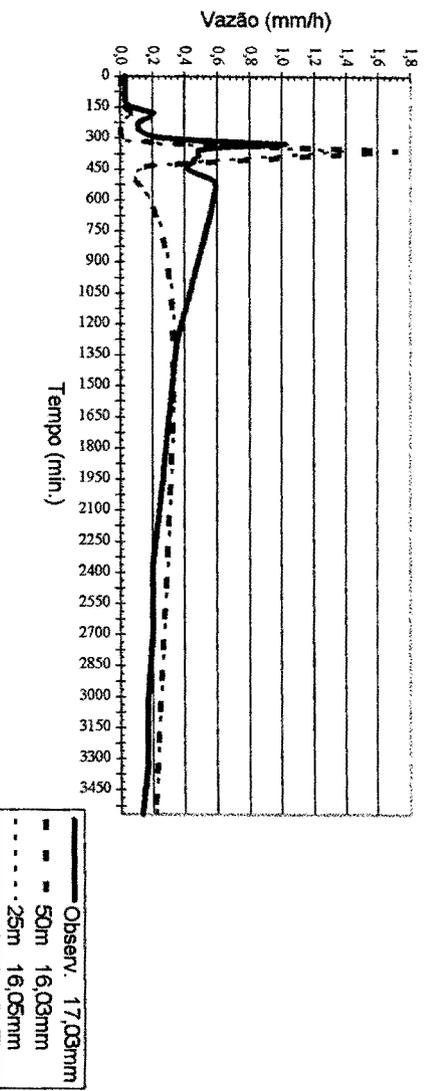
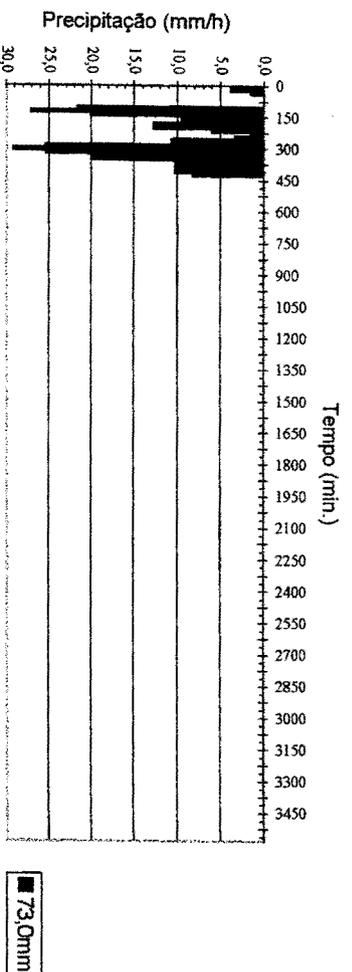


FIGURA 6.14 - Evento 03/08/1979 - sub-bacia A1 (FOA - 0,55 km²) - AJUSTE

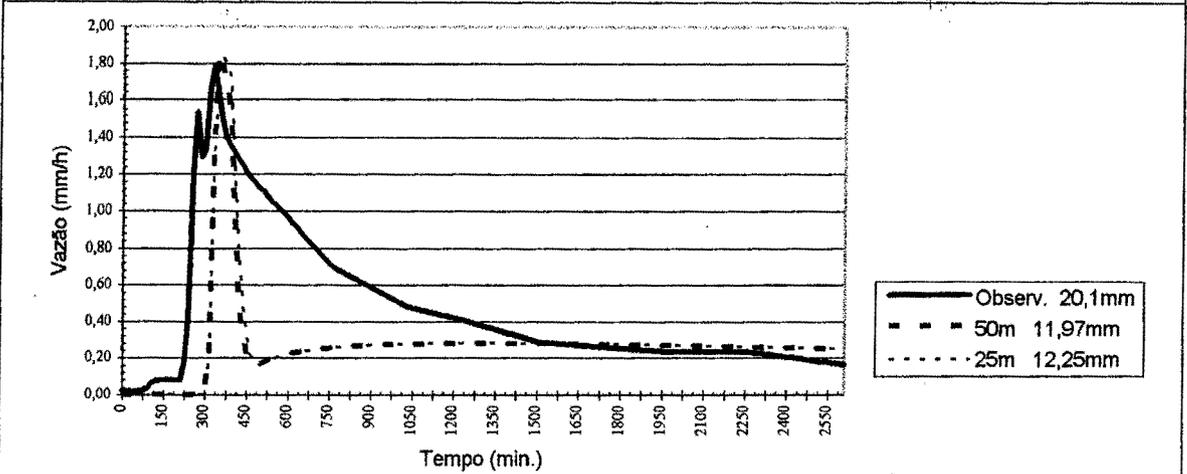
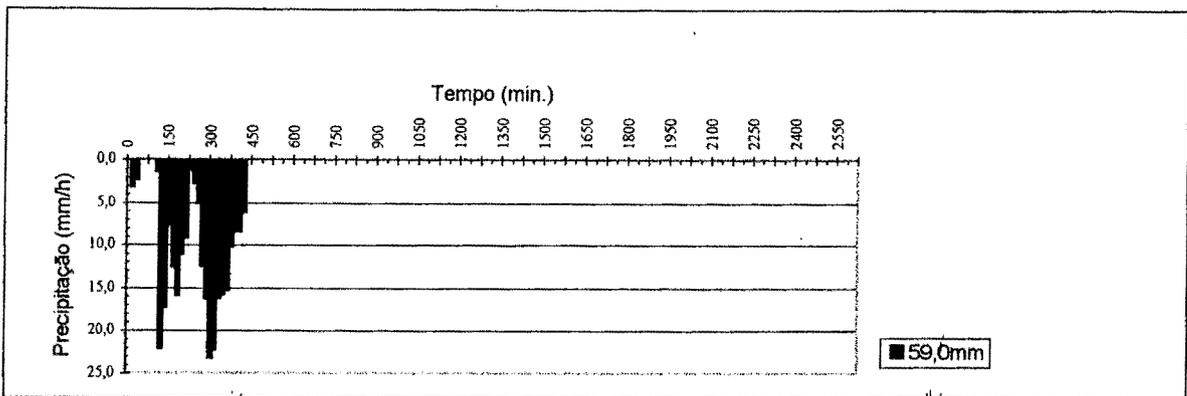


FIGURA 6.15 - Evento 03/08/1979 - Sub-bacia B1 (FOB - 0,393 km²)

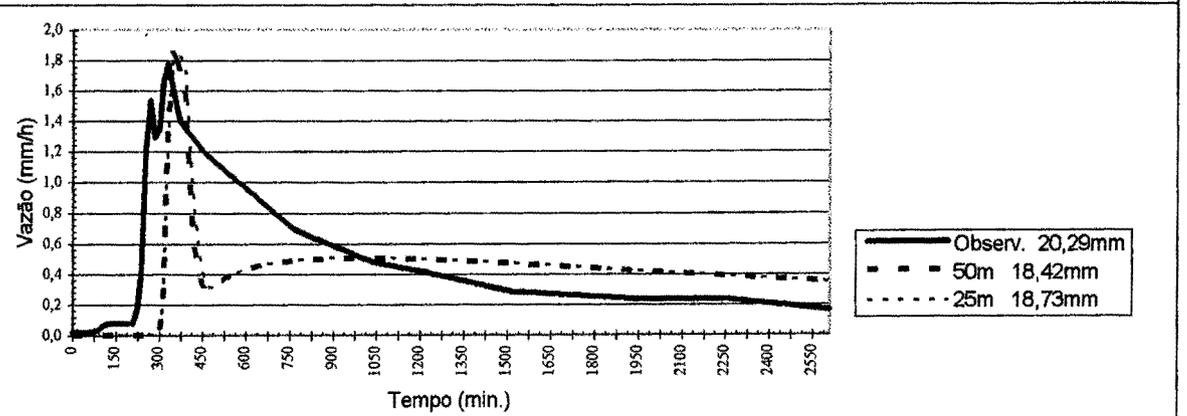
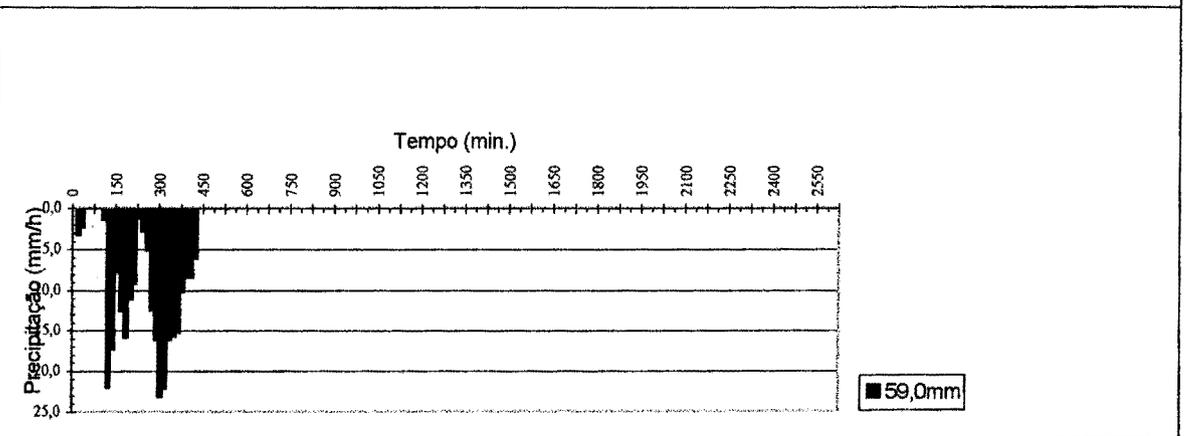


FIGURA 6.16 - Evento 03/08/1979 - sub-bacia B1 (FOB - 0,393 km²) - AJUSTE

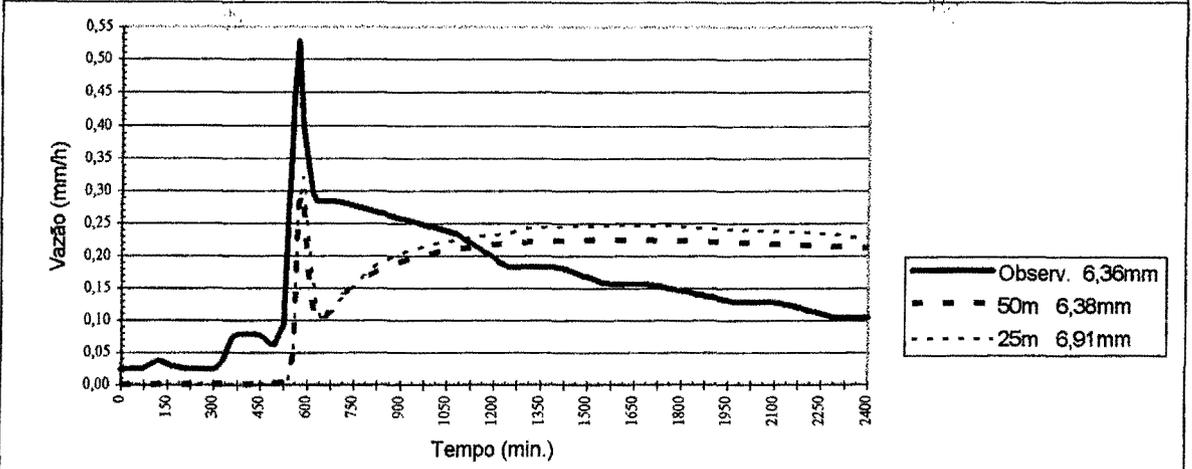
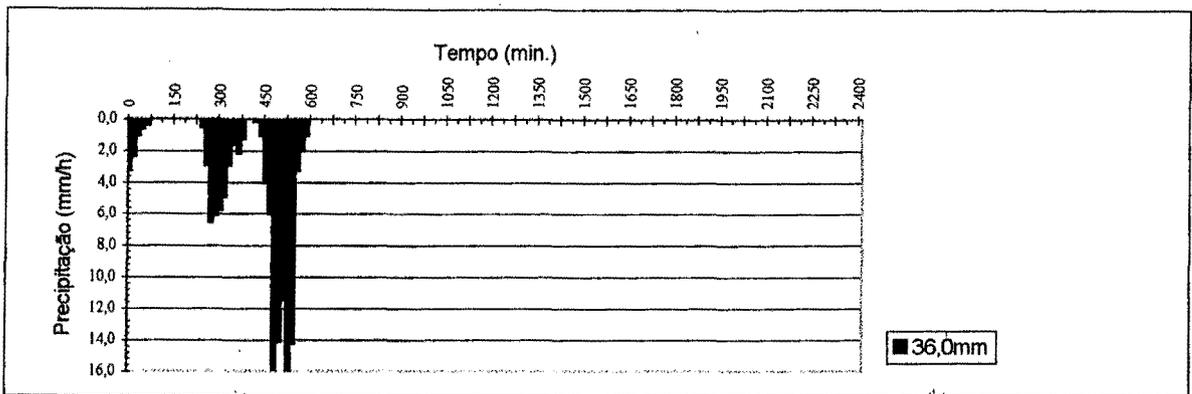


FIGURA 6.17 - Evento 23/06/1979 - sub-bacia B1

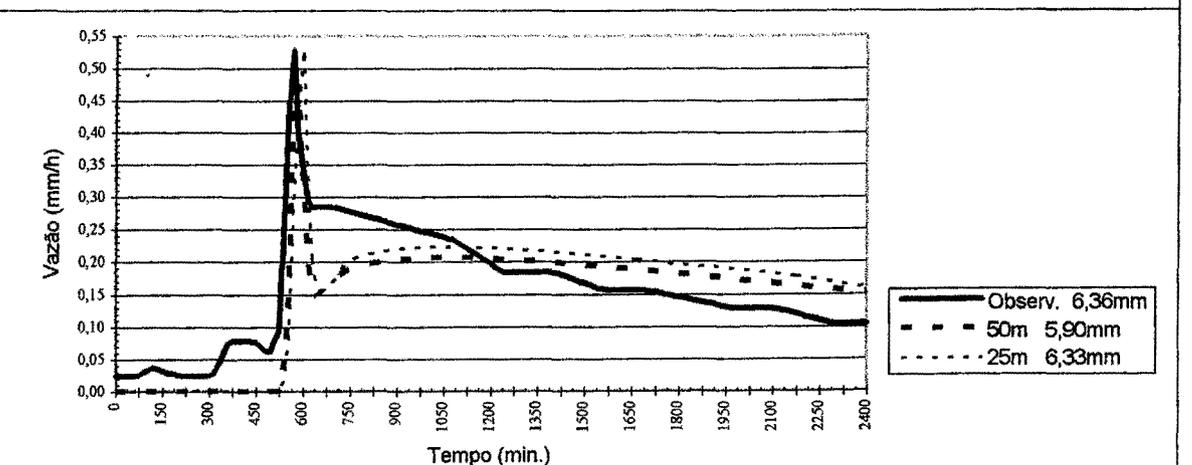
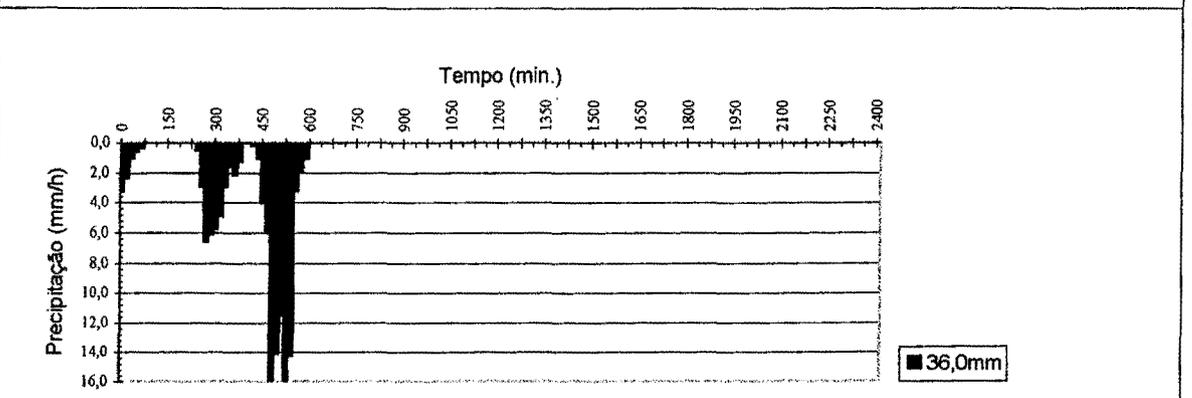


FIGURA 6.18 - Evento 23/06/1979 - sub-bacia B1 (FOB - 0,393 km²) - AJUSTE

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 Conclusões

A metodologia de obtenção dos atributos topográficos e características físicas gerais de PIs obtidos por geoprocessamento, com o aproveitamento da informação de imagens de satélite para as entradas no modelo ANSWERS e a avaliação das melhorias proporcionadas por estas técnicas, foram os objetivos perseguidos neste trabalho.

A união de um modelo distribuído a um SIG demonstrou, sem dúvida, sensíveis benefícios em termos de tempo e precisão na montagem dos arquivos do modelo, permitindo que várias análises fossem feitas com a variação da escala. No entanto, no decorrer da pesquisa muitas dificuldades foram detectadas e questionadas.

Embora a aplicação do MNT para obter declividades e direções, apresente ainda alguns inconvenientes para a montagem do arquivo de entrada deste modelo, ainda assim seu algoritmo se mostrou mais eficiente do que da forma proposta inicialmente. O principal problema encontrado foi na obtenção das declividades para o canal, sendo que este depende prioritariamente de mais informações de campo. Os elementos localizados próximos dos canais de escoamento não têm direções apropriadas devido às irregularidades topográficas ao longo de um canal, se fazendo necessária a utilização de um algoritmo capaz de tratar das informações em área de relevo mais acidentados, modificando o tamanho da grade e aumentando a densidade de pontos.

As dificuldades encontradas com as definições dos limites da bacia só existiram, porque considerou-se a delimitação digitalizada das cartas altimétricas definidas por método tradicional, ao invés da análise numérica da grade feita pelo MNT, acarretando em alguma adaptação visual e implicando também na redução das declividades. Foi possível com esta dificuldade, avaliar as simplificações grosseiras, dependendo da escala da carta utilizada, que são causadas pela digitalização dos divisores de água, definidos visualmente nas curvas altimétricas das cartas topográficas.

Os questionamentos à respeito da compatibilidade das resoluções de estudo com as escalas das informações a serem geoprocessadas, são evidenciados nas observações dos resultados. Os dados obtidos de imagem de satélite, em maior resolução que as demais informações introduzidas no modelo, em escalas inferiores, acabam por não descreverem grandes benefícios. A escolha da resolução do estudo também deve ter em consideração o tipo de relevo com que se está tratando, tanto mais detalhada quanto mais irregular o relevo, sem perder de vista a compatibilidade com a escala da entrada da informação. Torna-se inconveniente o preciosismo de resolução de análise com informações obtidas de escalas muito pequenas.

O modelo distribuído mostrou-se aceitável na estimativa do volume e pico de algumas pequenas bacias rurais, considerando-se a estimativa de seus parâmetros com base apenas em dados físicos. No entanto, considerando-se a variabilidade temporal, os resultados não são bons. As tentativas de ajuste também mostraram que é necessário um esforço muito grande para buscar um melhor ajuste devido ao grande número de parâmetros e também devido a discretização com vários elementos sujeito a vários “layers” de informação. Esse processo de ajuste pode ser mais facilmente obtido por um modelo conceitual de poucos parâmetros, mas sem benefícios de conhecimento do comportamento da variabilidade espacial das características físicas da bacia.

É possível agilizar as informações dos elementos, obtendo-se flexibilidade para simular diversos panoramas, relacionando os principais fenômenos envolvidos no processo e de adicionar considerações específicas para cada aplicação, justificando-se uma investigação mais aprofundada com dados de campo. Uma melhor definição das características físicas para a bacia, com testes e verificações feitas com dados de campo coletados em escala compatível à resolução que se pretende trabalhar, é um fator prioritário para o funcionamento adequado do modelo conceitual.

De maneira geral, as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do trabalho, os questionamentos acrescentados aos encaminhamentos, as alternativas propostas e aplicadas para contornar alguns dos obstáculos, vem contribuir e incentivar a utilização do Modelo ANSWERS como mais um instrumento na avaliação de descargas líquidas e também das descargas sólidas.

7.2 Recomendações

O aprimoramento e a disponibilidade de recursos como SIGs e MNTs, para a entrada de dados dos elementos estimula o desenvolvimento da modelação distribuída, pois economiza o tempo do analista para maior dedicação deste ao ajuste dos parâmetros do modelo. O processo de ajuste, sensibilidade e análise de incertezas dos modelos distribuídos devem ser tema de desenvolvimento para pesquisas futuras.

A análise da sensibilidade da resolução temporal para os modelos, tais como o ANSWERS também pode oferecer algumas melhorias na avaliação e compreensão dos resultados, ficando como sugestão para continuidade da pesquisa.

O avanço nas técnicas de medição de campo, são de vital importância para a estimativa de parâmetros para uma escala apropriada, na validação do modelo e na redução de incertezas. O modelo distribuído tem a finalidade de ser aplicado em locais sem medições disponíveis e os aperfeiçoamentos computacionais vem permitindo uma aplicação imediata do modelo, colaborando para evidenciar a necessidade da modelação computacional e as medições de campo, em conjunto. As técnicas de medição devem estar em concordância com a escala e a natureza distribuída dos dados a serem preditos, permitindo medições apropriadas e experimentos críticos de modo a questionar a incerteza na modelação.

As saídas gráficas dos SIGs são recursos que podem e devem ser explorados para a visualização dos resultados simulados e melhor compreensão dos panoramas, pelo analista. Contudo, as sugestões anteriores para o aprimoramento dos modelos distribuídos, devem ser consideradas prioritárias, uma vez que as saídas sofisticadas de resultados pouco confiáveis, possam fazer com que o analista seja induzido a uma idéia não realística da precisão do modelo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, M.G., BURT, T.P. 1985. Modelling strategies. In: HYDROLOGICAL FORECASTING. New York: John Wiley. ch.1, p.1-13.
- ARNOLD, J.G., SAMMONS, N.B. 1988. Decision support system for selecting inputs to a basin scale model. *Water Resources Bulletin*, Bethesda, v.24, n.4, p.749-759, Aug.
- BATHURST, J.C., O'CONNELL, P.E. 1992. Future of distributed modelling: the Système Hydrologique Européen. *Hydrological Processes*, Chichester, v.6, n.3, p.265-277, Jun/Sep.
- BEASLEY, D.B., HUGGINS, L.F., MONKE, E.J. 1980. ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of ASAE*, Saint Joseph, v.23, n.4, p.938-944.
- BEASLEY, D.B., HUGGINS, L.F. 1981. ANSWERS: user's manual. Chicago: U.S. Environmental Protection Agency. 54p.
- BERRY, J.K., SAILOR, J.K. 1987. Use of a geographic information system for storm runoff prediction form small urban watersheds. *Environmental Management*, New York, v.11, n.1, p.21-27.
- BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. 1985. Conservação do solo. Piracicaba: Livroceres. 386p.
- BEVEN, K. 1985. Distributed models. In: HYDROLOGICAL FORECASTING. New York: John Wiley, ch.13, p.405-435.
- BEVEN, K. 1989. Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.105, p.157-172.
- BEVEN, K., BINLEY, A. 1992. The future of distributed modelling : the Systeme Hydrologique Europeen. *Hidrological Processes*, Chinchester, v.6, n.3, p.279-298.
- BLACKIE, J.R., EELES, C.W.D. 1985. Lumped catchment models. In: HYDROLOGICAL FORECASTING. New York: John Wiley. ch.11, p.311-345.
- BORDAS, M.P., LANNA, A.E., SEMMELMANN, F.R. 1988. Evaluation des risques d'érosion et de sédimentation au Brasil à partir sédimentologiques rudimentaires. In: PORTO ALEGRE SYMPOSIUM, 1988. *Sediment budgets*. Wallingford: IAHS, p.359-368.
- BURROUGH, P.A. 1986. *Principles of geographical information for land resources assessment*. Oxford: Clarendon. 185p.

- BRUNEAU, P, GASCUEL-ODOUX, C. 1995. Sensitivity to space and time resolution of a hydrological model using digital elevation data. *Hydrological Processes*, Chichester, v.9, n.1, p.69-81, Jan.
- CAMPANA, N.A. 1992. *Estimativa de parâmetros físicos de bacias utilizando técnicas de sensoriamento remoto e o sistema de informações geográficas*. Porto Alegre: UFRGS- Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 88f. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- CANALI, G.E. 1981. *Produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais*. Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós- Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- CASTRO, N.M. DOS C. 1992. *Formação das cargas sólidas em suspensão em pequenas bacias rurais do derrame basáltico sulriograndense*. Porto Alegre: UFRGS - Curso Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 101f. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- CHOU, V.H. 1992. Slope-line detection in a vector-based GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Falls Church, v.58, n.2, p.227-233, Feb.
- COCHONNEAU, G. 1989. *HYDROM: logiciel de banque de données hydrometriques; manuel de l'utilisateur*. Montpellier: ORSTOM. paginação irregular.
- DE ROO, A.P.J. 1993. Validation of the ANSWERS catchment model for runoff and soil erosion simulation in catchments in the Netherlands and the United Kingdom. *HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources*. Vienna: IAHS. p.465-474.
- DJOKIC, D., MAIDMENT, D.R. 1991. Terrain analysis for urban stormwater modelling. *Hydrological Processes*, Chichester, v.5, n.1, p.115-124, Jan/Mar.
- DRAYTON, R.S., WILDE, B.M., HARRIS, J.H.K. 1992. Geographical information system approach to distributed modelling. *Hydrological Processes*, Chichester, v.6, n.3, p.361-368, Jun/Sep.
- EHLERS, M., EDWARDS, G., BEDARD, I. 1989. Integration of remote sensing with geographic information systems: a necessary evolution. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Falls Church, v.55, n.1, p.1619-1627, Nov.
- GOODRICH, D.C., WOOLHISER, D.A. 1991. Catchment Hydrology. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Washington, p.202-209, Apr. Supplement.

- GOLDENFUM, J.A. 1991. *Simulação hidrossedimentológica em pequenas bacias rurais*. Porto Alegre: UFRGS-Curso e Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 112f. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- GRAYSON, R.B., MOORE, I.D., McMAHON. 1992. Physically based hydrologic modelling 1. A terrain-based model for investigative purposes. *Water Resources Research*, Washington, v.28, n.10, p.2639-2658. Oct.
- GRAYSON, R.B., MOORE, I.D., McMAHON. 1992. Physically based hydrologic modelling 2. Is the concept realistic ? *Water Resources Research*, Washington, v.28, n.10, p.2659-2666. Oct.
- GRAYSON, R.B., BLÖSCHL, G., BARLING, R.D., MOORE, I.D. 1993. Process, scale and constraints to hydrological modelling in GIS. *HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources*. Vienna: IASH. p.83-92.
- INPE, 1989. SITIM 150: Sistema Geográfico de Informações - Manual de Referência do Usuário, versão 2.1: São José dos Campos, SP. Engespaço Indústria e Comércio Ltda.
- JENSEN, K.H., MANTOGLOU, A. 1992. Future of distributed modelling. *Hydrological Processes*, Chichester, v.6, n.3, p.255-264, Jun/Sep.
- JENSON, S., DOMINGUE, J.O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Falls Church, v.54, n.11, p.1539-1600, Nov.
- JOHNSON, L.E. 1989. MAPHYD - A digital map-based hydrologic modeling system. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Falls Church, v.55, n.6, p.911-917, Jun.
- LEPRUN, J.C. 1987. *Levantamento pedológico das minibacias do rio Forquetinha*. Porto Alegre: IPH/UFRGS, CNPq/Orstom. 6f.
- LEVANTAMENTO de Reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. 1973. Recife: Divisão de Pesquisa Pedológica do Ministério da Agricultura. 431p.
- MARK, D., DOZIER, J., FREW, 1984. Automated basin delineation from digital elevation data. *Geo-Processing*, Amsterdam, v.2, p.299-311.
- * MOORE, I.D., GRAYSON, R.B., LANDSON, A.R. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, Chichester, v.5, n.1, p.3-30, Jan/Mar.
- NOVO, E.M.L.de M. 1989. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. São Paulo: Edgard Blücher. 308p.

- PARK, S.M., MITCHELL, J.K., SCARBOROUGH, J.N. 1982. Soil erosion simulation on small watersheds: a modified ANSWERS model. *Transactions of ASAE*, Saint Joseph, v.25, n.6, p.1581-1588.
- PESSOA, M. L. 1986. *RADEN: Modelo hidrológico para previsão de enchentes através de radar meteorológico*. Dissertação Apresentada na Escola Politécnica da USP para a obtenção do título de Mestre em Engenharia (Hidrologia e Recursos Hídricos). São Paulo. 124p.
- PESSOA, M.L., BRAS, R.L., WILLIAMS, E.R. 1993. Use of weather radar for flood forecasting in the Sieve river basin: a sensitivity analysis. *Journal of Applied Meteorology*, v.32, p.462-475, Mar.
- QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P., PLANCHON, O. 1991. The hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, Chichester, v.5, n.1, p.59-79, Jan/Mar.
- RISSE, A. 1993. *Obtenção e manipulação dos parâmetros da equação universal de perda de solo através de técnicas de geoprocessamento*. Porto Alegre: UFRGS-Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 162p. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- SCHOWENGERDT, R.A. 1983. *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*. New York. Academic Press.
- SHARMA, K.D., SINGH, S. 1995. Satellite remote sensing for soil erosion modelling using the ANSWERS model. *Hydrological Sciences Journal*, v.40, n.2, p.259-272, apr.
- SILVEIRA, G.L. 1982. *Erosão de solo na região da encosta do planalto no Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: UFRGS-Curso e Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 151f. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- SWAIN, P.H., DAVIS, S.M. 1978. *Remote Sensing; the quantitative approach*. Lafayette: McGraw-Hill, 396p.
- THOMAS, D.L., BEASLEY, D.B. 1986. A physically-based forest hydrology model I: development and sensitivity of components. *Transactions of ASAE*, Saint Joseph, v.29, n.4, p.962-972.
- THOMAS, D.L., BEASLEY, D.B. 1986. A physically-based forest hydrology model II: evaluation under natural conditions. *Transactions of ASAE*, Saint Joseph, v.29, n.4, p.973-981.
- TOU, J.T., GONZALEZ, R.C. 1974. *Pattern Recognition Principles*. Massachusetts : Addison-Wesley. ch.3, p.94-97.

- TUCCI, C.E.M. 1986. *Modelos matemáticos em hidrologia e hidráulica*. Rio de Janeiro: RBE. 3v.
- VIEUX, B.E. 1991. Geographic information systems and non-point source water quality and quantity modelling. *Hydrological Processes*, Chichester, v.5, n.1, p.101-113, Jan/Mar.
- WALKER, J.F., PICKARD, S.A., SONZOGNI, W.C. 1989. Spreadsheet watershed modelling for nonpoint-source pollution management in a Wisconsin Basin. *Water Resources Bulletin*, Bethesda, v.25, n.1, p. 139-147, Feb.
- WALSH, S.J. et al. 1990. Image enhancement of Landsat Thematic Mapper data and GIS data integration for evaluation of resource characteristics. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Falls Church, v.56, n.8, p.1135-1141, Aug.
- 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)
- ZHOU, Q. 1989. A method for integrating remote sensing and geographic information systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Falls Church, v.55, n.5, p.591-596, May.

ANEXO A - PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO E SUA FORMATAÇÃO

LISTA DE TABELAS

	página
TABELA A.1 Requisitos de Simulação.	01
TABELA A.2 Informação de Precipitação.	01
TABELA A.3 Informação de Solos.	02
TABELA A.4 Uso do Solo e da Condição da Superfície.	02
TABELA A.5 Descrição dos Canais.	03
TABELA A.6 Informação do Elemento.	03

ANEXO A - ENTRADA DOS PARÂMETROS DO MODELO E SUA FORMATAÇÃO

As informações de entrada do modelo ANSWERS estão divididas em dois blocos principais: dados básicos da bacia e dados individuais dos elementos. A seguir serão descritos todos os parâmetros exigidos e a formatação de entrada.

O arquivo básico inicia com duas linhas de requisitos gerais. A primeira linha contém um cabeçalho alfa-numérico usado para descrever qual arquivo está sendo usado (80 colunas). A Tabela A.1 descreve as entradas para unidades e impressão do arquivo básico.

TABELA A.1 - Requisitos de Simulação:

Parâmetro	Definição	Colunas
UNITS	Sistema de unidade utilizado ? ENGLISH (pol.,ft.) / METRIC (mm,m)	2- 8
PR	Imprimir as informações de dados básicos ? (sim=PRINT/ não=branco)	58-62

A seção seguinte é dedicada à descrição do evento chuvoso a ser simulado. A linha 1 contém a palavra RAINFALL (coluna 2), a linha 2, o número de padrões de chuva (NRG) usados na simulação (coluna 20). ANSWERS permite entrada de 4 padrões de chuva com no máximo 35 intervalos. Na linha 3 o identificador do evento a ser modelado é inserido (coluna 47-54). Cada novo arquivo de medida de chuva contém identificador de 2 caracteres para o padrão (colunas 17-18). O método da poligonal de Thiessen é usado para determinar quais áreas são afetadas pelas medidas de chuva especificadas. Para situações hipotéticas, as várias medidas podem ser usadas para simular o movimento de um evento que cruza a bacia. A Tabela A.2 apresenta as três colunas e os conteúdos necessários.

TABELA A.2 - Informação de Precipitação:

Parâmetro	Definição	Colunas
JBEG	Último registro ?	1
TC	Tempo (em minutos)	3-10
RC	Intensidade de Precipitação (em pol/h ou mm/h)	11-20

A próxima seção descreve a resposta de vários solos para entradas de precipitação. Na linha 1 a palavra SOIL (colunas 3-6), na linha 2 o número dos grupos ou tipos de solos identificados (ISR) (coluna 19-22), sendo possível tratar até com 20 diferentes solos. Os parâmetros dos solos são apresentados na Tabela A.3.

TABELA A.3 - Informação de Solos:

Parâmetro	Definição	Tabelas	Colunas
TP	Porosidade Total do Solo (% volume)	5.4	11-13
FCAP	Capacidade de Campo (% saturação)	5.4	20-22
FC	Capacidade Mínima de Infiltração	5.5	29-33
A	Diferença entre Capacidade Mínima e Capacidade Máxima de Infiltração		39-43
P	Expoente da Equação de Infiltração	5.6	49-51
DF	Profundidade da Zona de Controle de Infiltração	-	58-62
ASM	Umidade Antecedente do Solo (% saturação)	-	70-72
SKDR	Fator de Erodibilidade do Solo USLE	5.7	78-80

Para descrever a contribuição de drenagem subsuperficial para produção total de água na bacia, tem-se:

Coefficiente de Drenagem para Manilha (DC): indica o coeficiente de projeto de dreno em áreas com manilhas (usual 0,25 a 0,50 pol/dia ou 6,4 a 12,7 mm/dia) (colunas 40-43);

Fração de Perda da Água Subterrânea (GRF): é uma medida da contribuição lateral do movimento da água subterrânea ou interflúvio no escoamento total (colunas 32-41).

A linha 1 da seção que segue, contém a palavra SURFACE (colunas 3-9), na linha 2 o número de diferentes usos do terreno (ICR) (coluna 32-34), aceito no máximo 20 tipos. Os valores de PIT, PER, RC, HU, RN e CDR são listados na Tabela A.4. A determinação dos valores destes descritores são apresentados no Anexo A e os valores adotados no Anexo B. O valor de CDR utilizado é uma combinação dos fatores C e P ajustados sazonalmente, usado na USLE (Universal Soil Loss Equation).

TABELA A.4 - Uso do Solo e da Condição da Superfície:

Parâmetro	Definição	Tabelas	Colunas
CROP	Uso do Terreno e Manejo Específico	-	12-19
PIT	Intercepção Potencial Máxima	5.8	26-28
PER	Porcentagem de Superfície Coberta por Uso do Terreno e Manejo Específico	-	35-37
RC	Coefficiente de Rugosidade Superficial	5.9	43-45
HU	Altura Máxima das Irregularidades da Superfície	5.9	51-54
RN	Rugosidade de Manning	-	59-62
CDR	Fator de Cobertura e Manejo USLE ou Erosividade Relativa	5.10	67-69

A linha 1 desta seção contém a palavra CHANNEL (colunas 3-9), a linha 2 o número das configurações de canais diferentes (M) (colunas 31-33), sendo possível considerar até 10 dimensões. Aceita-se que a seção do canal é retangular e considerada suficientemente profunda

para ser tratada como escoamento superficial. A Tabela A.5 apresenta os descritores dos canais.

TABELA A.5 - Descrição dos Canais:

Parâmetro	Definição	Colunas
WIN	Largura do Canal	19-22
CN	Coefficiente de Rugosidade de Manning	50-54

O arquivo dos elementos individuais é editado separadamente, detalhando a bacia elementar e suas características especiais. As informações são obtidas dos PIs de cada item exigido, previamente preparados com geoprocessamento e montados com auxílio do programa ELEMENTO (todos descritos no capítulo 5).

A linha contém o nome da bacia ou identificador (TITLE) (colunas 29-72), na linha 2 o tamanho do elemento (DX) (colunas 17-22), a linha 3 contém as coordenadas da linha e coluna (NIOUT, NJOUT) do elemento de saída (colunas 18-21 e 30-33). Cada linha subsequente deste arquivo contém a informação necessária para caracterizar a configuração física de cada elemento, sendo admissível até 1700 elementos. A posição e definição de todos os parâmetros usados na descrição de cada elemento são mostrados na Tabela A.6. Os PIs referidos nessa Tabela, encontram-se relacionados na Tabela 3.1, no capítulo 3 e podem ser visualizados no Anexo C.

TABELA A.6 - Informação do Elemento:

Parâmetro	Definição	PIs	Colunas
ITEMP[1]	Número da linha do elemento	01	1-3
ITEMP[2]	Número da coluna do elemento	01	4-6
ITEMP[3]	Designador do último elemento	01	7-8
ITEMP[4]	Declividade do elemento	04	9-11
ITEMP[5]	Direção do ângulo de maior declividade	05	12-15
ITEMP[6]	Categoria do tamanho do canal (se existir)	03	16-17
ITEMP[6]	Número do tipo de solo	06	18-19
ITEMP[7]	Número do tipo de cultura/manejo	07	20-23
ITEMPC[1]	Designador do padrão de chuva (alfa/numérico)	01	27-28
ITEMPC[2]	Designador do dreno (TI) (indica manilha)	02	30-31
ITEMP[8]	Declividade do canal (décimos de percentagem)	08	34-37
ITEMP[9]	Descritor da primeira Prática de Manejo, se houver	09	39-40
ITEMP[10]	Descritor da segunda Prática de Manejo, se houver	10	41-44
ITEMP[11]	Altitude média do elemento (opcional)	11	64-70

ANEXO B - ARQUIVOS BÁSICOS DAS SUB-BACIAS

	página
ANEXO B.1 - FORQUETINHA - SUB-BACIA A1	01
RAINFALL - Chuva de 1 registrador para os eventos: 03/08/79, 08/08/79, 11/08/79. .	01
SOIL - Dados sobre os solos	01
SURFACE - Constantes de cultivo e uso do solo	02
CHANNEL - Especificações dos canais	02
ANEXO B.2 - FORQUETINHA - SUB-BACIA B1	03
RAINFALL - Chuva de 1 registrador para os eventos: 22/05/79, 23/06/79, 03/08/79, 08/08/79.	03
ANEXO B.3 - POTIRIBU - SUB-BACIA DO TURCATO	04
RAINFALL - Chuva de 1 registrador para os eventos: 10/02/92, 10/05/91, 04/06/91. .	04
SOIL - Dados sobre os solos	04
SURFACE - Constantes de cultivo e uso do solo	05
CHANNEL - Especificações dos canais	05
ANEXO B.4 - POTIRIBU - SUB-BACIA DO DONATO	06
RAINFALL - Chuva de 1 registrador para os eventos: 10/02/92, 10/05/91, 04/06/91. .	06

ANEXO B.1 - FORQUETINHA - SUB-BACIA A1

METRIC Unidades no Sistema Métrico

RAINFALL Chuva de 1 registrador para os eventos: 03/08/79, 31/08/79, 04/10/79.

REGISTRO No. R1

03/08/79		31/08/79		04/10/79	
Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
0	0,00	0	0,00	0	0,00
15	2,00	15	0,00	15	0,00
30	4,00	30	16,18	60	2,67
45	4,00	45	5,05	180	0,00
60	6,00	60	29,32	210	1,00
135	0,00	90	0,51	240	1,00
150	27,20	105	6,07	360	0,00
165	8,80	120	14,15	375	5,60
180	9,60	135	5,05	390	2,80
195	10,00	210	0,00	420	5,80
210	19,60	225	1,01	660	0,00
225	12,80	540	0,00	675	10,00
240	4,80	555	13,65	690	0,00
255	1,60	570	0,51	720	17,00
270	3,20	1185	0,00	750	2,00
285	6,40			765	34,00
300	10,80			840	2,00
315	20,00			960	0,00
330	29,20			1005	19,33
345	20,00			1035	44,00
360	20,00			1065	18,20
390	18,80			1080	13,60
420	10,40			1140	10,00
435	10,40			1200	1,00
450	3,20			1260	0,00
2490	0,00			1395	3,02
				1410	10,00
				1440	3,40
				3015	0,00

SOIL - Dados sobre os solos

NÚMERO DE SOLOS = 3

S	TP	FCAP	FC (mm/h)	A (mm/h)	P (adm.)	DF (mm)	ASM (%)			K (adm.)
							03/08	31/08	04/10	
1- Associação	0,47	0,66	9,0	18,0	0,60	200,0	35	35	66	0,23
2 - Litólico	0,47	0,66	9,0	18,0	0,60	150,0	35	35	66	0,32
3 - Brunizem	0,47	0,66	9,0	18,0	0,60	250,0	35	35	66	0,14

COEFICIENTE DE DRENAGEM PARA MANILHAS = 0,00 mm/24hr

FRAÇÃO DE ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO = 0,005

SURFACE - Constantes de cultivo e uso do solo
NÚMERO DE DIFERENTES USOS = 6

C	CROP	PIT (mm)	PER	RC (adm.)	HU (mm)	N (adm.)	C (adm.)
1	PREPARO	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,13
2	PLANTIO	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,12
3	ESTAB,	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,14
4	CRESCIM,	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,04
5	RESIDUO	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,02
6	MATO	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,01

CHANNEL - Especificações dos canais
NÚMERO DE TIPOS DE CANAIS = 5

CANAL	LARGURA (m)	N (adm.)
1	0,30	0,030
2	0,60	0,030
3	0,90	0,030
4	1,20	0,030
5	1,50	0,030

ANEXO B.2 - FORQUETINHA - SUB-BACIA B1

OBS.: Os mesmos parâmetros utilizados na sub-bacia A1 foram utilizados nesta sendo os eventos diferenciados, bem como a Unidade Antecedente do Solo (ASM), a seguir descritas.

RAINFALL Chuva de 1 registrador para os eventos: 23/06/79, 03/08/79, 08/08/79.

REGISTRO No. R1.

23/06/79		03/08/79		08/08/79	
Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
0	0,00	0	0,00	0	0,00
15	4,95	30	3,26	15	0,00
30	3,30	45	4,88	30	0,52
45	0,55	120	0,00	225	0,00
60	1,10	135	22,14	255	4,96
75	0,55	150	7,16	270	0,00
240	0,00	165	7,81	315	1,74
255	8,24	180	8,14	330	0,00
270	0,55	195	15,95	375	2,61
285	3,85	210	10,42	390	13,04
300	6,60	225	3,91	405	26,09
315	6,05	240	1,30	420	12,00
330	3,30	255	2,60	525	0,00
345	4,95	270	5,21	540	0,52
360	1,65	285	8,79	780	0,00
375	3,85	300	16,28	795	0,52
390	2,20	315	23,76	915	0,00
450	0,00	345	16,28	930	18,26
465	1,10	360	15,30	945	6,26
480	6,05	375	15,30	960	0,00
495	10,44	420	8,46	975	0,52
510	15,94	435	2,60	1050	0,00
525	14,84	2745	0,00	1065	3,13
540	11,54			1080	0,52
555	17,04			1095	7,83
570	9,89			1140	1,74
585	3,30			1155	0,52
600	1,10			1245	0,00
615	1,10			1260	2,09
2415	0,00			1395	0,00
				1590	1,85
				7410	0,00

S	ASM (%)		
	23/06	03/08	08/08
1 - Associação	60	45	90
2 - Litólico	60	45	90
3 - Brunizem	60	45	90

ANEXO B.3 - POTIRIBU - SUB-BACIA DO TURCATO

METRIC Unidades no Sistema Métrico

RAINFALL Chuva de 1 registrador para os eventos: 10/02/92, 10/05/91, 04/06/91, 18/06/91.

REGISTRO No. R1

09/02/92		05/10/91		04/06/91	
Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
0	0,0	0	0,0	0	0,0
10	15,0	20	1,2	50	7,8
20	40,2	30	2,4	70	4,2
30	55,8	70	0,0	170	0,0
40	10,8	110	0,6	220	1,3
50	3,0	130	2,7	240	10,2
60	0,6	150	6,6	280	15,0
350	0,0	190	0,0	330	24,0
		230	0,6	380	12,0
		250	2,1	420	3,6
		260	19,8	470	3,0
		280	11,1	550	1,2
		310	4,2	570	8,4
		360	3,0	590	26,4
		410	1,2	660	5,4
		510	0,0	740	4,2
		520	4,2	790	2,2
		540	21,3	810	0,6
		560	30,0	880	0,0
		570	10,2	960	1,2
		590	0,6	980	23,4
		670	0,0	1100	6,0
		680	39,0	1180	0,6
		700	22,2	1430	0,0
		710	3,0	1480	1,2
		810	0,0	1490	54,0
		830	2,1	1560	11,4
		860	1,2	1580	5,4
		940	0,6	1930	0,0
		1550	0,0	1940	30,0
				1980	7,2
				1170	0,0

SOIL - Dados sobre os solos

NÚMERO DE SOLOS = 3

S	TP	FCAP	FC (mm/h)	A (mm/h)	P (adm.)	DF (mm)	ASM (%)			K (adm.)
							09/02	05/10	04/06	
1 Latos. Roxo	0,53	0,83	10,0	21,0	0,70	300,0	68	65	35	0,12
2 Latos. Verm.	0,53	0,83	10,0	21,0	0,70	300,0	68	65	35	0,16
3 Terra Roxa	0,53	0,83	10,0	21,0	0,70	300,0	68	65	35	0,18
4 Glei húmico	0,51	0,79	10,0	21,0	0,65	250,0	68	65	35	0,00
5 Aluvial	0,51	0,79	10,0	21,0	0,65	250,0	68	65	35	0,00

COEFICIENTE DE DRENAGEM PARA MANILHAS = 0,00 mm/24hr

FRAÇÃO DE ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO = 0,005

SURFACE - Constantes de cultivo e uso do solo
NÚMERO DE DIFERENTES USOS = 6

C	CROP	PIT (mm)	PER	RC (adm.)	HU (mm)	N (adm.)	C (adm.)
1	SOLONU	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,05
2	MATA	1,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,01
3	CULTIVO1	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,10
4	RESTEVA	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,02
5	PASTAGEM	0,4	1,0	0,43	60,0	0,060	0,01
6	CULTIVO2	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,10
7	URBANA	0,8	1,0	0,43	60,0	0,060	0,03

CHANNEL - Especificações dos canais
NÚMERO DE TIPOS DE CANAIS = 5

CANAL	LARGURA (m)	N (adm.)
1	0,30	0,030
2	0,60	0,030
3	0,90	0,030
4	1,20	0,030
5	1,50	0,030

ANEXO B.4 - POTIRIBU - SUB-BACIA DO DONATO

OBS.: Os mesmos parâmetros utilizados na sub-bacia do Turcato foram utilizados nesta sendo os eventos diferenciados, bem como a Umidade Antecedente do Solo (ASM), a seguir descritas.

RAINFALL Chuva de 1 registrador para os eventos: 09/02/92, 05/10/91, 04/06/91.

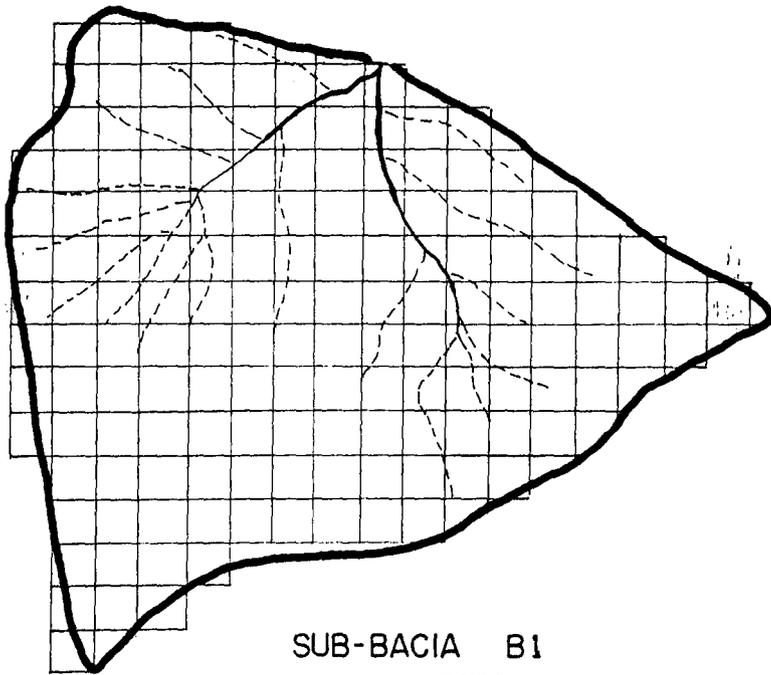
REGISTRO No. RI

09/02/92		05/10/91		04/06/91	
Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)	Tempo (min.)	Precipit. (mm/h)
0	0,0	0	0,0	0	0,0
10	15,0	20	1,2	50	7,8
20	40,2	30	2,4	70	4,2
30	55,8	70	0,0	170	0,0
40	10,8	110	0,6	220	1,3
50	3,0	130	2,7	240	10,2
60	0,6	150	6,6	280	15,0
350	0,0	190	0,0	330	24,0
		230	0,6	380	12,0
		250	2,1	420	3,6
		260	19,8	470	3,0
		280	11,1	550	1,2
		310	4,2	570	8,4
		360	3,0	590	26,4
		410	1,2	660	5,4
		510	0,0	740	4,2
		520	4,2	790	2,2
		540	21,3	810	0,6
		560	30,0	880	0,0
		570	10,2	960	1,2
		590	0,6	980	23,4
		670	0,0	1100	6,0
		680	39,0	1180	0,6
		700	22,2	1430	0,0
		710	3,0	1480	1,2
		810	0,0	1490	54,0
		830	2,1	1560	11,4
		860	1,2	1580	5,4
		940	0,6	1930	0,0
		1550	0,0	1940	30,0
				1980	7,2
				1170	0,0

Solo	ASM (%)			
	09/02/92	05/10/91	04/06/91	18/06/91
1 - Latossolo Roxo	60	60	15	80
2 - Latossolo Verm.	60	60	15	80
3 - Terra Roxa	60	60	15	80
4 - Gleí pouco húmico	60	60	15	80
5 - Aluvial	60	60	15	80

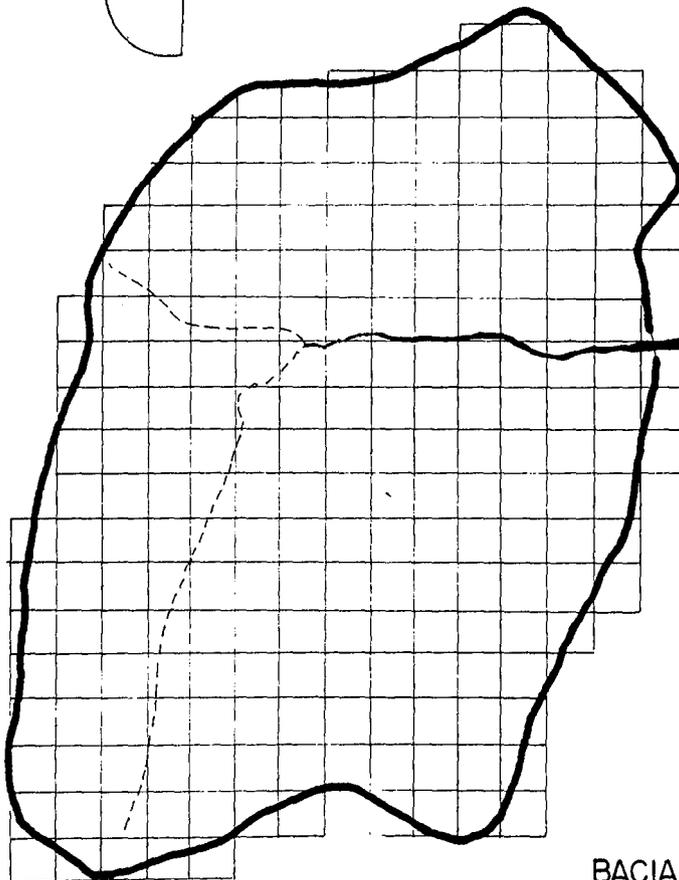
**ANEXO C - PLANOS DE INFORMAÇÃO (PIs) DAS SUB-BACIAS
SELECIONADAS**

	página
BACIA DO FORQUETINHA - Sub-bacias A1 e B1	01
PIs de Drenagem e PIs de Altitude	01
PIs de Solo	02
PIs de Cobertura do Solo	03
BACIA DO POTIRIBU - Sub-bacias do DONATO e do TURCATO	04
PIs de Drenagem e PIs de Altitude	04
PIs de Solo	05
BACIA DO FORQUETINHA - Sub-bacia A1 (Fotografias)	06
PI-Altimetria, PI-Chuva, PI-Drenagem	06
PI-Solo, PI-Cobertura do Solo	07
BACIA DO FORQUETINHA - Sub-bacia B1 (Fotografias)	08
PI-Drenagem, MNT Tridimensional de Altitude	08
PI-Solo, PI-Cobertura do Solo	09
BACIA DO POTIRIBU - Sub-bacia do DONATO (Fotografias)	10
PI-Altimetria, PI-Chuva, PI-Solo	10
PI-Cobertura do Solo - 08/02/92, 03/10/91 e 16/12/89	11
BACIA DO POTIRIBU - Sub-bacia do TURCATO (Fotografias)	12
PI-Altimetria, PI-Chuva, PI-Drenagem	12
PI-Cobertura do Solo - 08/02/92, 03/10/91 e 16/12/89	13
SUPORTE MATERIAL - SITIM (150) e SGI	14



SUB-BACIA B1

Esc.: 1:8500
RESOLUÇÃO : 50m



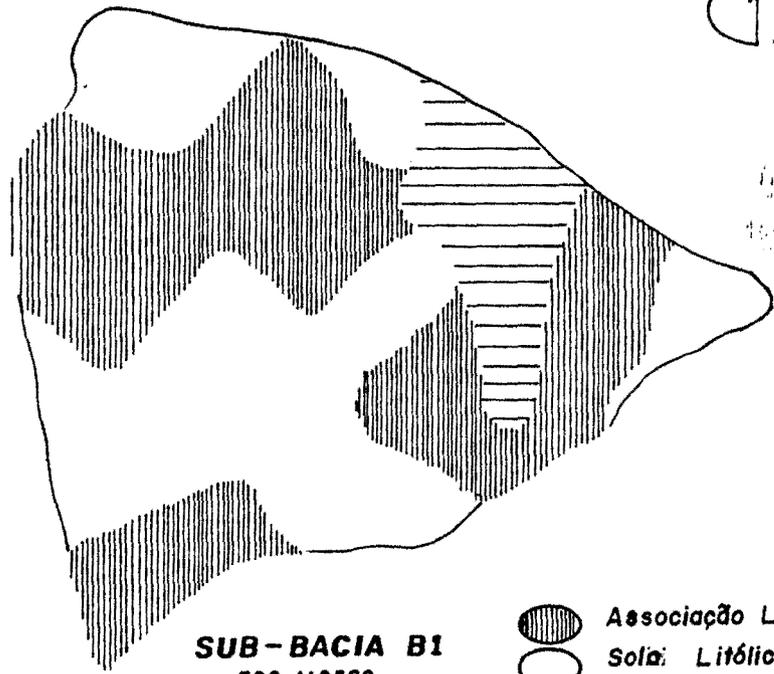
SUB-BACIA A1

Esc.: 1:8500
RESOLUÇÃO : 50m

BACIA DO FORQUETINHA

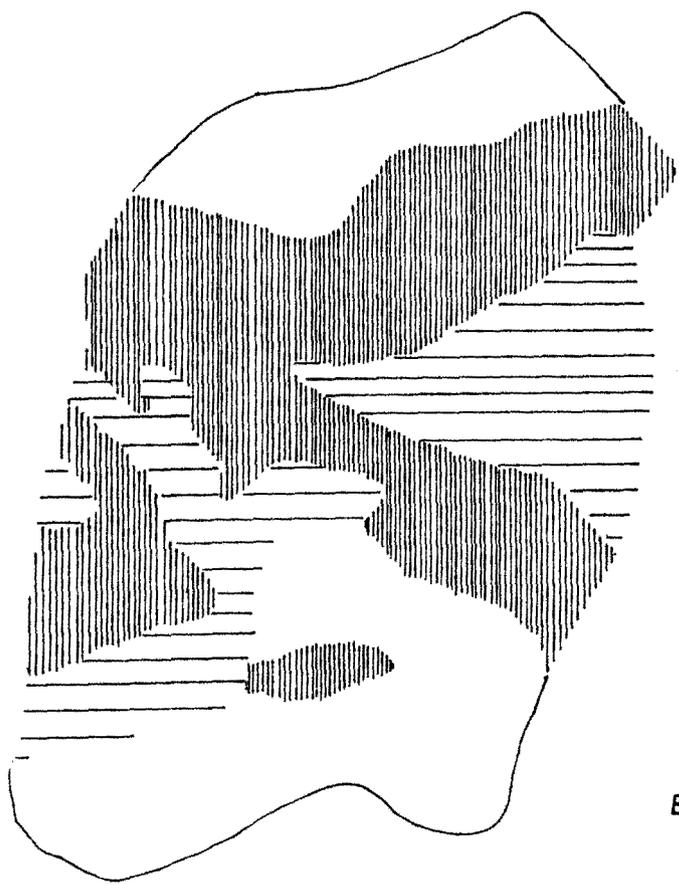
Pis DE DRENAGEM

Pis DE ALTITUDE



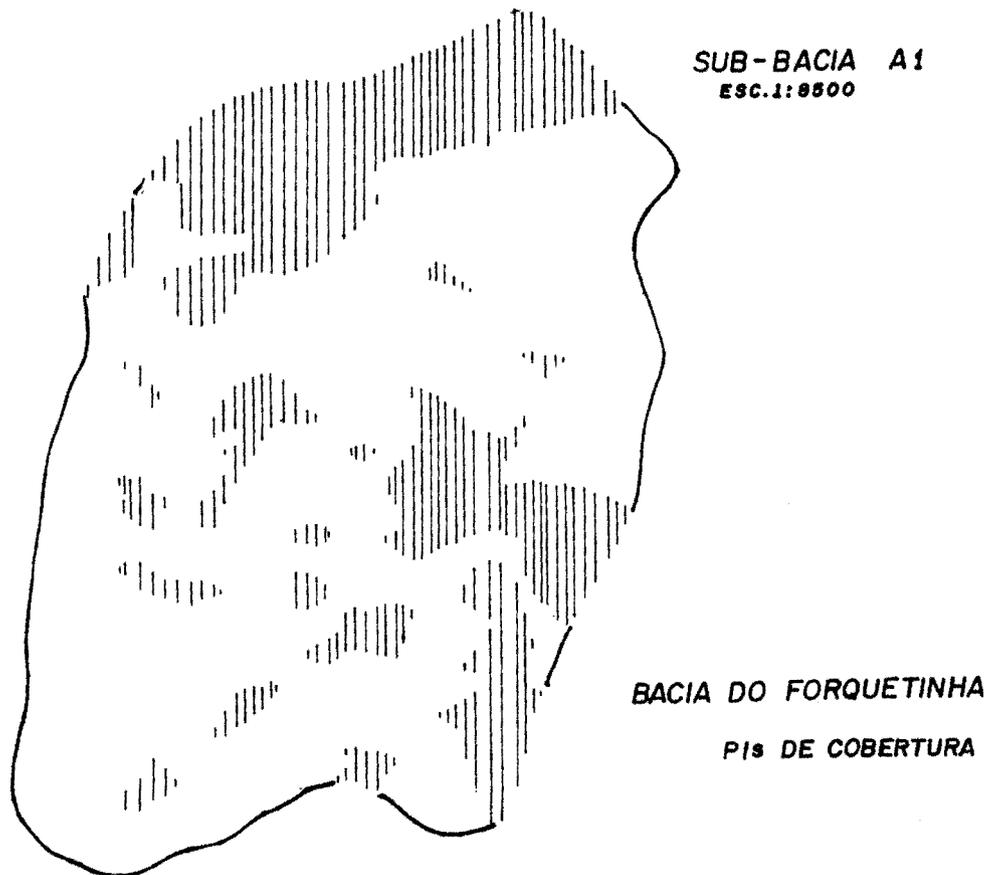
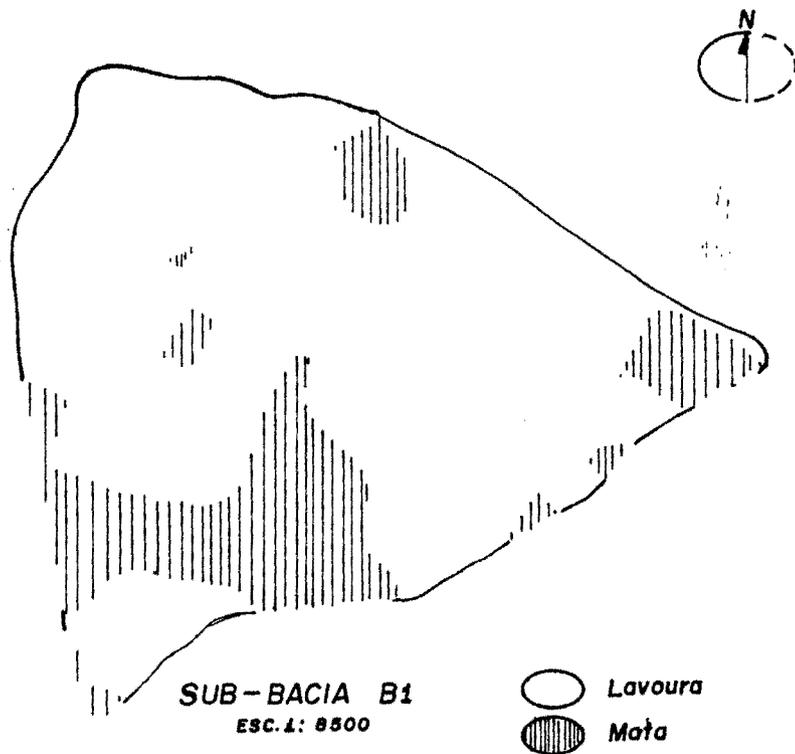
SUB-BACIA B1
ESC. 1:8.500

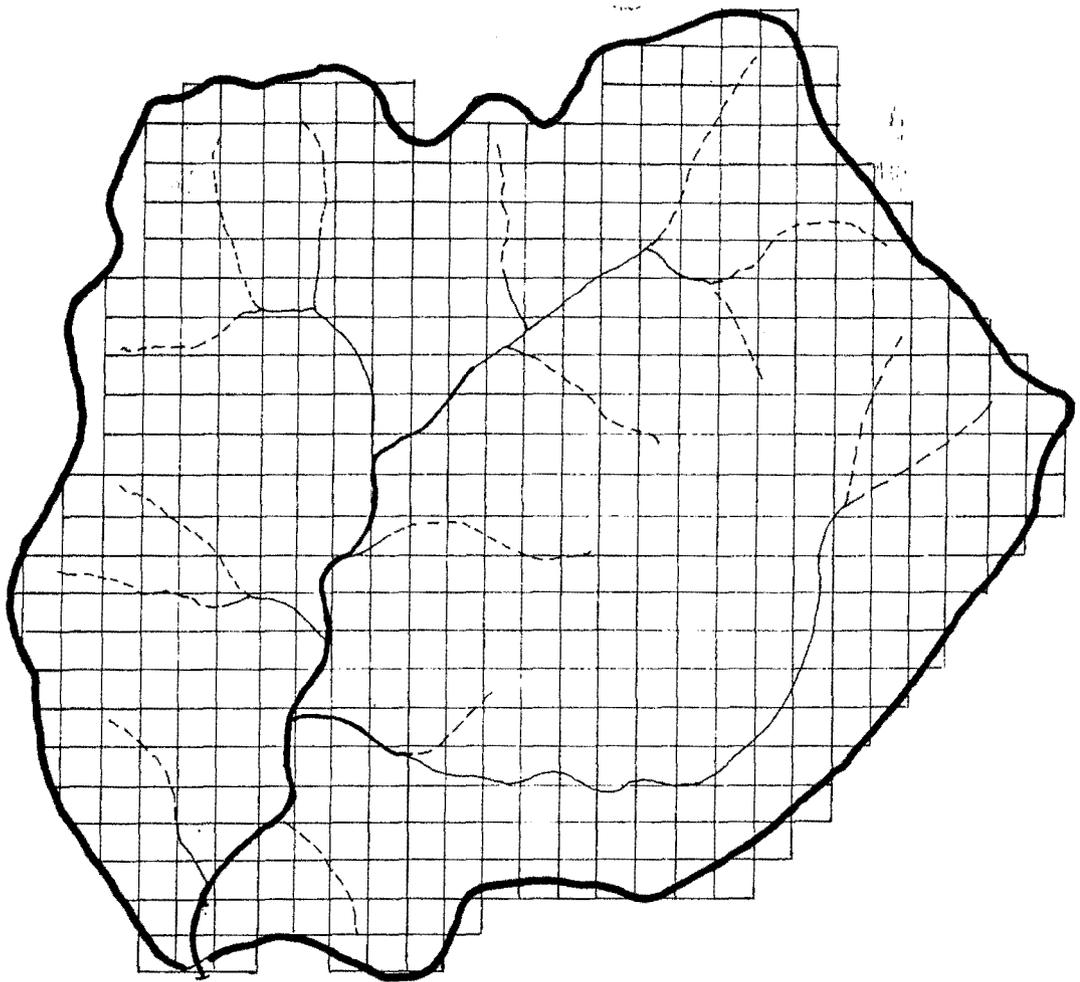
-  Associação Litólco-Brunizen
-  Solo Litólco
-  Solo Brunizen



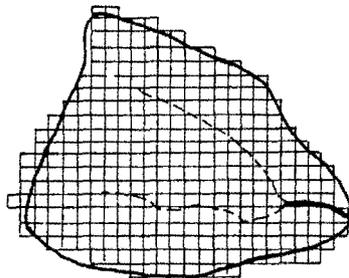
SUB-BACIA A1
ESC. 1:8.500

BACIA DO FORQUETINHA
PIs DE SOLO



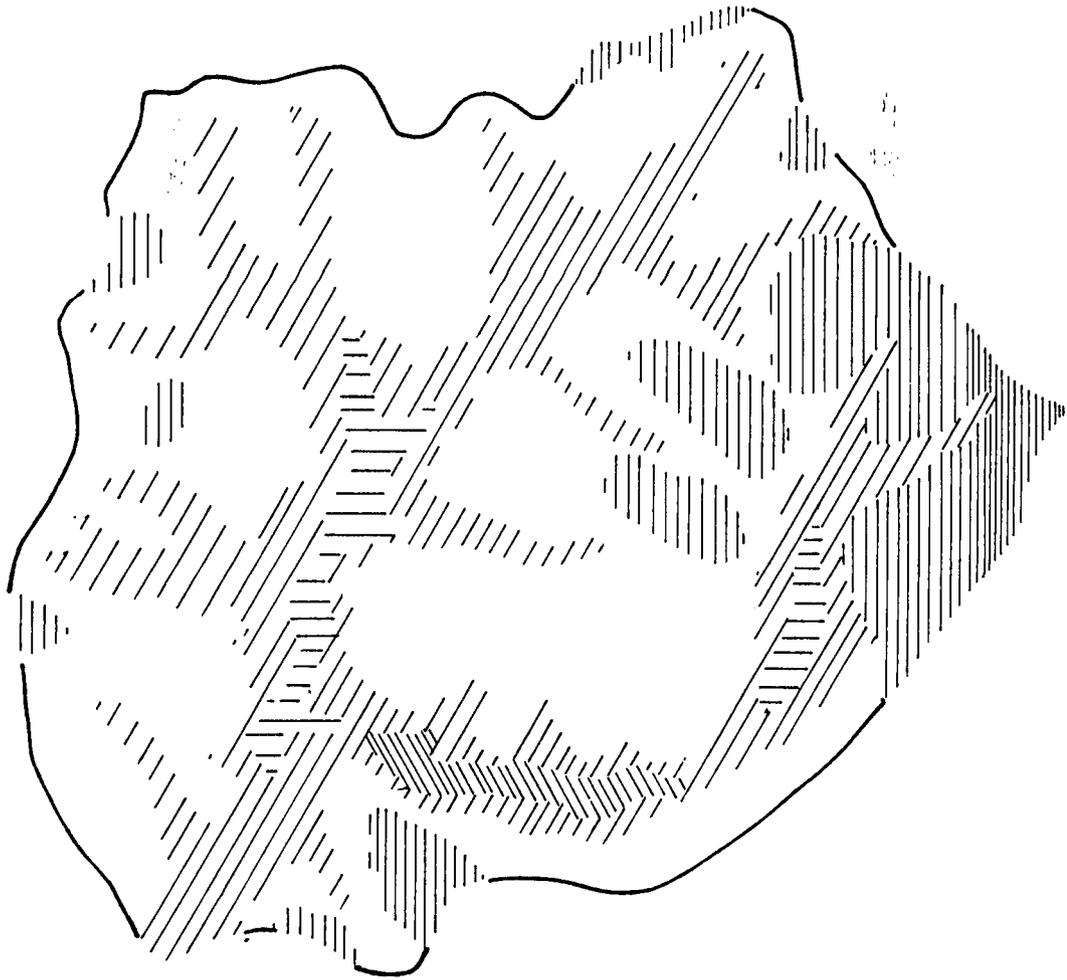
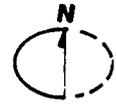


SUB-BACIA DO TURCATO
ESC. 1:80.000



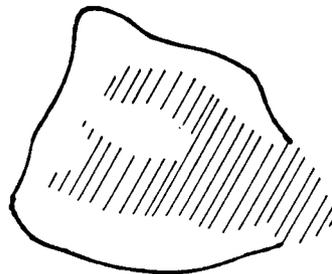
SUB-BACIA DO DONATO
ESC. 1:70.000

PIs DE DRENAGEM E DE CANAL
BACIA DO POTIRIBU



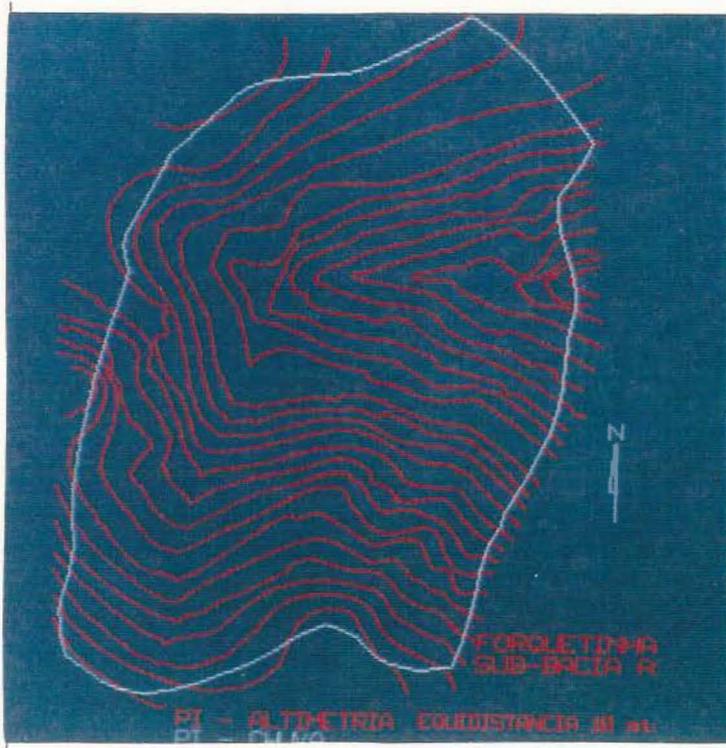
SUB-BACIA DO TURCATO
ESC. 1: 80.000

-  Latossolo Roxo
-  Latossolo Vermelho
-  Terra Roxa
-  Solos Aluviais
-  Gleis

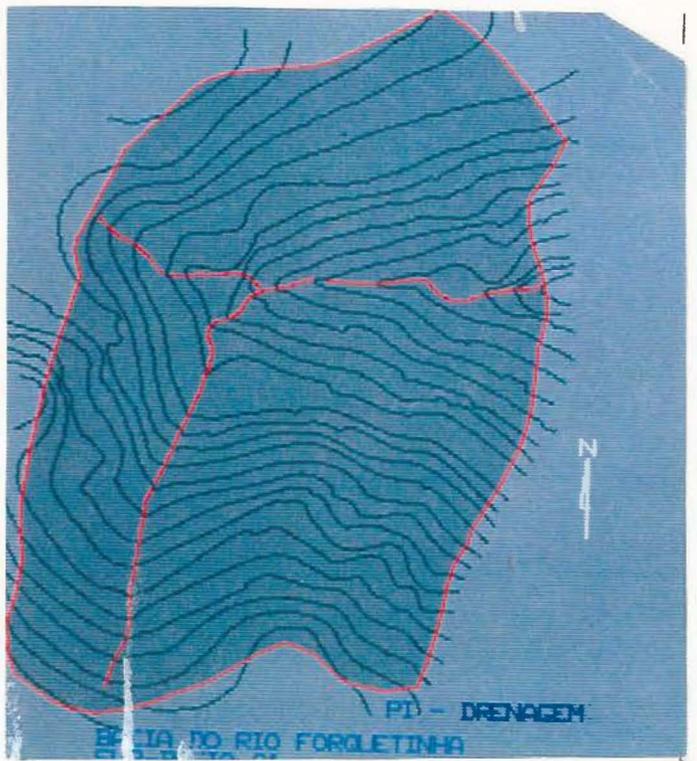


SUB-BACIA DO DONATO
ESC. 1: 70.000

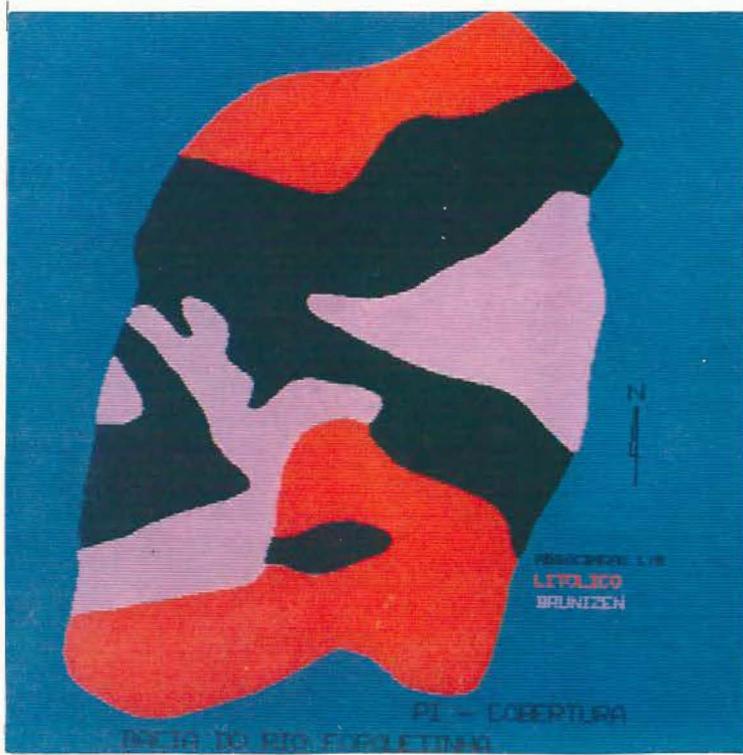
PIs DE SOLO — BACIA DO POTIRIBU



PI-Altimetria (PI_ALTI.GRD)
 PI-Chuva (PI_CHUV.I)
 FORQUETINHA
 SUB-BACIA A1 (FOA) esc. 1:7.000



(FOA_DREN.I) PI-Drenagem
 FORQUETINHA
 SUB-BACIA A1
 esc. 1:7.000



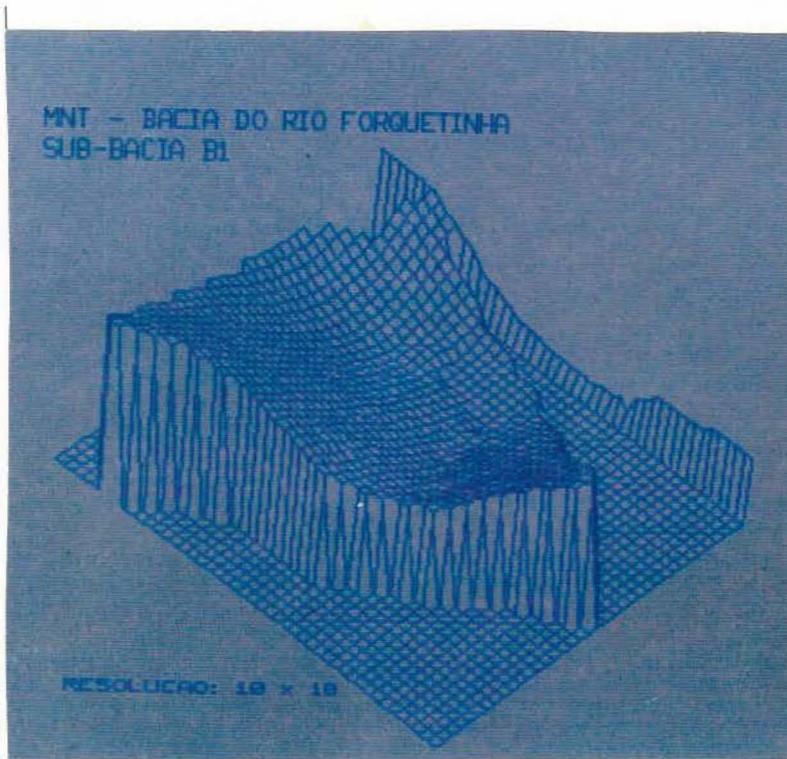
PI-Solo (FOA_SOLO.I)
 FORQUETINHA
 SUB-BACIA A1 esc. 1:7.000



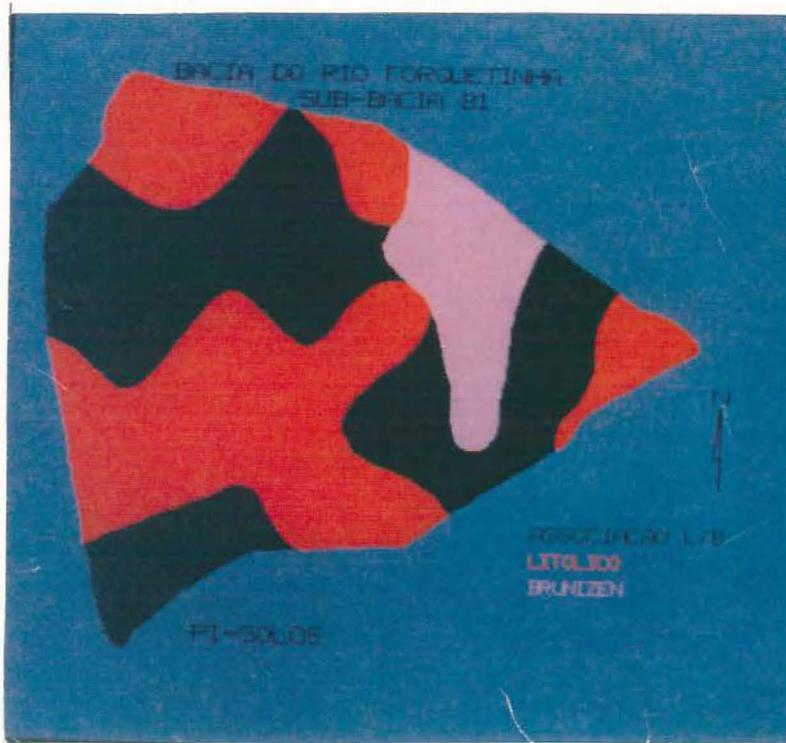
(FOA_COBE.I) PI-Cobertura do Solo
 FORQUETINHA
 SUB-BACIA A1
 esc. 1:7.000



(FOB_DREN.I) PI-Drenagem
FORQUETHINHA
esc. 1:7.000 SUB-BACIA B1



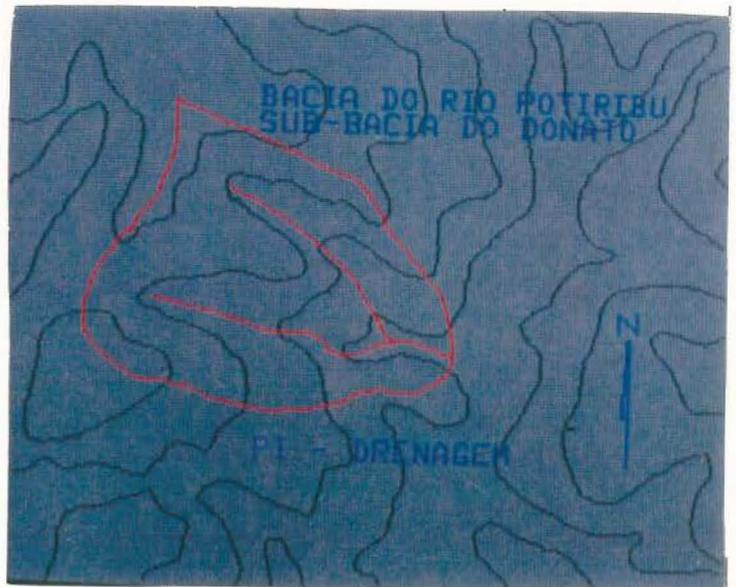
MNT de Altitude Tridimensional
FORQUETHINHA
SUB-BACIA B1
esc. 1:7.000



PI-Solo (FOB_SOLO.I)
 FORQUETHINHA
 SUB-BACIA B1 esc. 1:7.000



(FOB_COBE.I) PI-Cobertura do Solo
 FORQUETHINHA
 SUB-BACIA B1
 esc. 1:7.000

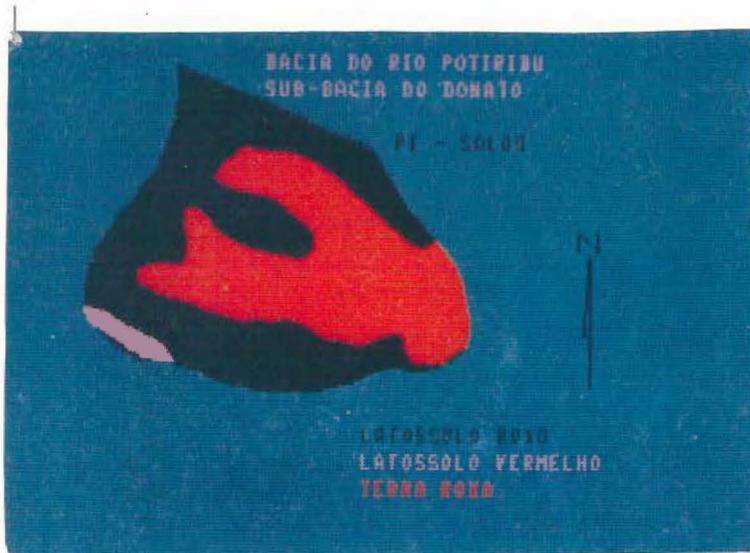


(DON_ALTI.GRD)

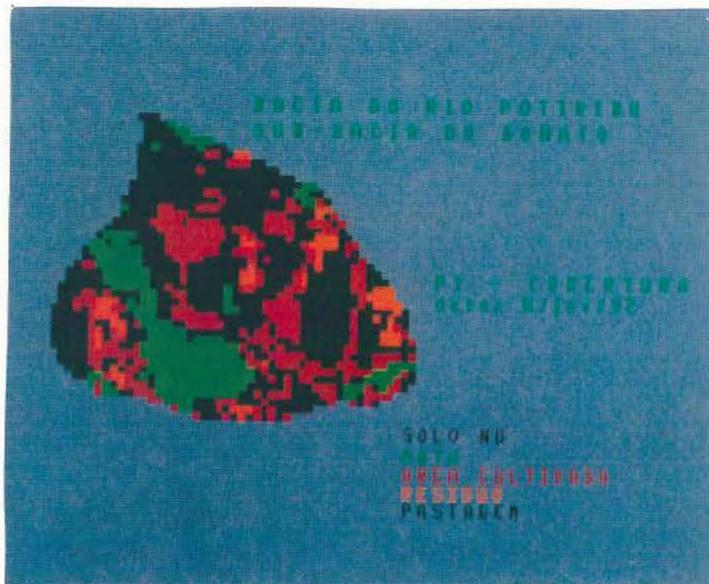
PI-Altimetria
POTIRIBU

esc. 1:80.000

SUB-BACIA DONATO



PI-SOLO (DON_SOLO.I)
POTIRIBU
SUB-BACIA DONATO
esc. 1:80.000



PI-Cobertura (DON_COB1.I)

DATA: 08/fev/1992

POTIRIBU

SUB-BACIA DO DONATO

esc. 1:80.000

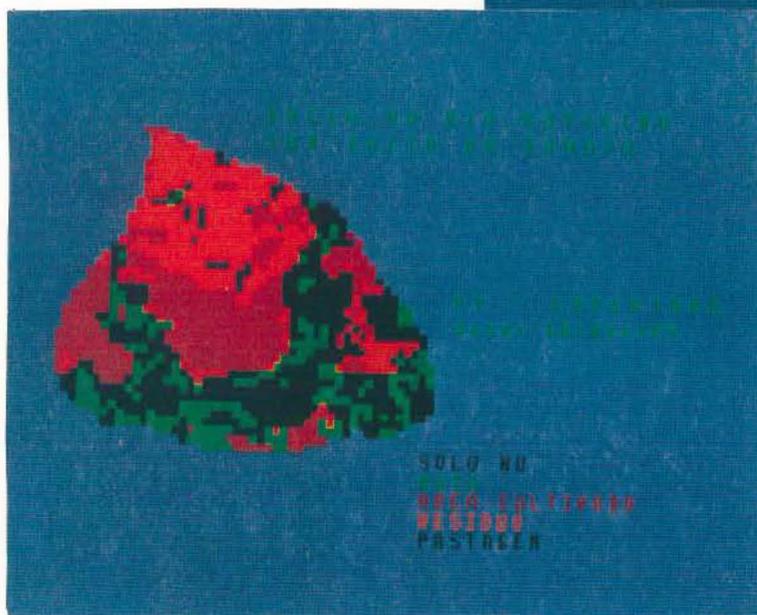
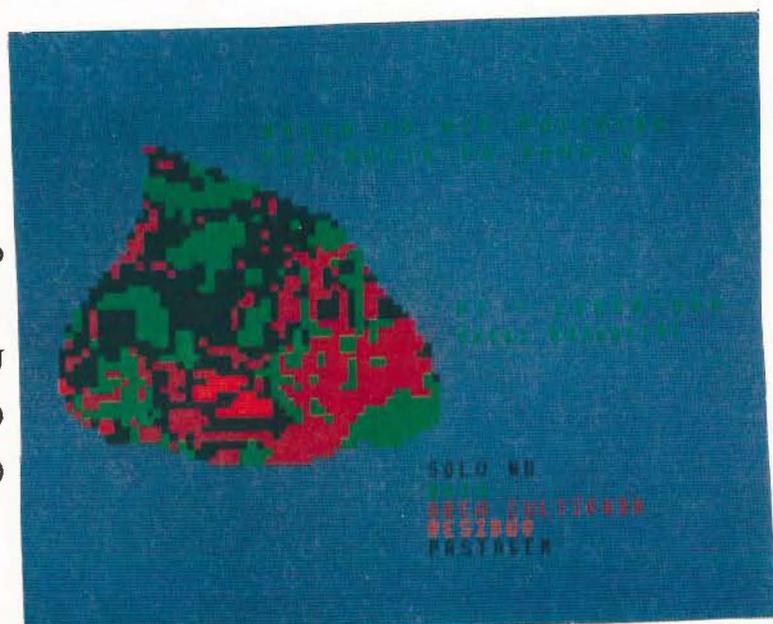
(DON_COB2.I)PI-Cobertura do Solo

DATA: 03/out/1991

POTIRIBU

SUB-BACIA DO DONATO

esc. 1:80.000



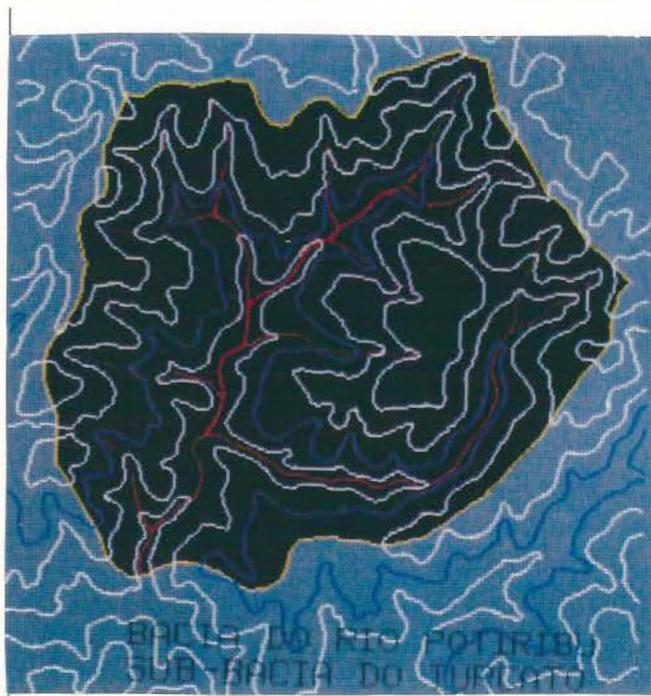
PI-Cobertura (DON_COB3.I)

DATA: 16/dez/1992

POTIRIBU

SUB-BACIA DO DONATO

esc. 1:80.000



(TUR_ALTI.GRD) PI-Altimetria

(TUR_CHUV.I) PI-Chuva

(TUR_CHUV.I) PI-Drenagem

POTIRIBU

SUB-BACIA DO TURCATO

esc. 1:45.000



PI-Cobertura (TUR_COB1.I)

DATA: 08/fev/1992

POTIRIBU

SUB-BACIA DO TURCATO

esc. 1:45.000

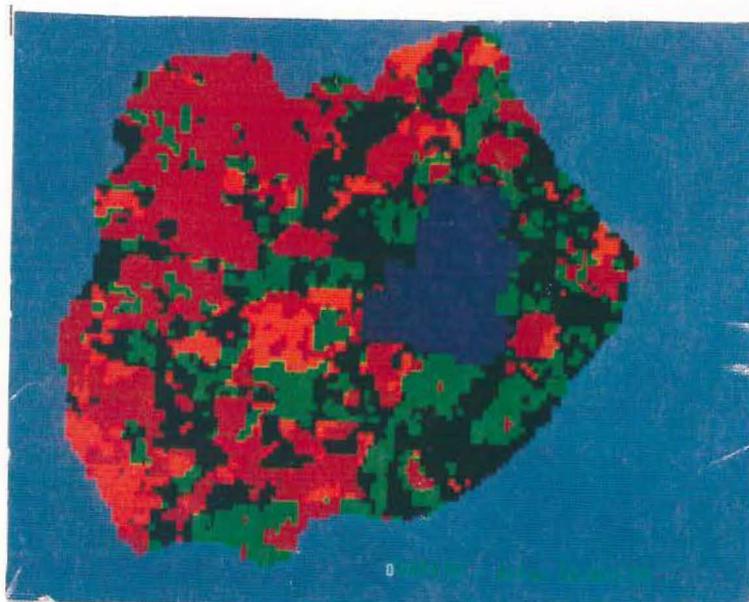
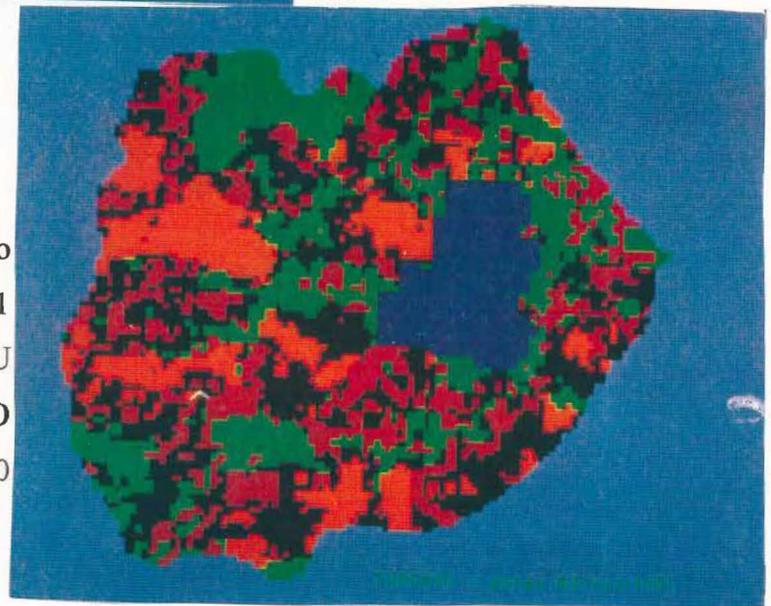
(TUR_COB2.I) PI-Cobertura do Solo

DATA: 03/out/1991

POTIRIBU

SUB-BACIA DO TURCATO

esc. 1:45.000



PI-Cobertura (TUR_COB3.I)

DATA: 16/dez/1992

POTIRIBU

SUB-BACIA DO TURCATO

esc. 1:45.000

SUPORTE MATERIAL

Seguem as características de hardware disponíveis no CEPSRM (Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia), o qual deu todos os subsídios de equipamentos para a realização do presente trabalho, no que diz respeito a **SITIM-150** (*Sistema de Tratamento de Imagem*):

- * microcomputador AT-386, com microprocessador Intel 80386 (16Mbytes de memória), coprocessador de ponto flutuante Intel 80487 e memória RAM de 4 Mbytes;
- * monitor de vídeo colorido semi-gráfico de 80 colunas e 25 linhas e teclado;
- * unidade de disco rígido com 40 Mbytes, unidades de disco flexível de 5 1/4" de 1,2 Mbytes e de 3 1/2" de 1,4 Mbytes;
- * uma porta serial padrão RS-232 C e uma porta paralela padrão Centronics;
- * unidade de fita magnética de 1600 bpi, 45 ips;
- * o software SITIM-150 Versão 2.3 desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais);
- * unidade visualizadora de imagens UVI-150, com 4 Mbytes de memória, com 4 planos de 1024x1024 pixels por plano, com 128 níveis (8 bits por pixel) e monitor colorido com resolução de 512x512 pontos.

A configuração de equipamentos para o **SGI** (*Sistema Geográfico de Informações*), possui as seguintes características:

- * microcomputador AT-486, com coprocessador 80487 e memória RAM de 6 Mbytes;
- * unidade de disco rígido com 40 Mbytes, unidades de disco flexível de 5 1/4" de 1,2 Mbytes, 3 1/2" de 1,4 Mbytes e o terminal de vídeo alfanumérico;
- * unidade visualizadora de imagens UVI-150, com 4 planos de 1024x1024 pixels por plano, com 256 níveis (8 bits por pixel) e monitor colorido com resolução de 512x512 pontos;
- * o software SGI (Sistema Geográfico de Informações Versão 2.3, desenvolvido pelo INPE);
- * mesa digitalizadora.

ANEXO D - LISTAGENS DOS PROGRAMAS EM TURBO PASCAL v. 6.0

	página
ANEXO D.1 - BASICO.EXE	01
ARQUIVO_BASICO :	
Programa que cria ou altera o arquivo com os dados básicos exigidos pelo Modelo Hidrossedimentológico Distribuído ANSWERS.	
374 linhas - 13841 bytes	
AUTORA : Josete de Fátima de Sá	DATA : novembro/1992
ANEXO D.2 - TEXTO.EXE	03
TRANSFORMA_EM_TEXTO :	
Pograma que transforma arquivos do tipo grade MNT ou imagem do SGI em texto (ASCII), anotando suas referências nas dez primeiras linhas.	
445 linhas - 17280 bytes	
AUTORA : Josete de Fátima de Sá	DATA : outubro/1992
ANEXO D.3 - SUPERPOE.EXE	04
SUPERPOE_PIS :	
Programa que verifica a superposição de todos os PIs tomando como guia o PI_11 (altitude), sendo que os Pis_imagem devem ser preenchidos no caso de alguma discordância.	
611 linhas - 16800 bytes	
AUTORA : Josete de Fátima de Sá	DATA : maio/1993
ANEXO D.4 - CANAL.EXE	06
DECLIVIDADE_CANAL :	
Programa que cria o PI de altitude do canal em resolução detalhada, compatiliza os PIs, calcula as declividades, transfere para o PI em resolução de estudo e define o exutório da bacia.	
986 linhas - 305280 bytes	
AUTORA : Josete de Fátima de Sá	DATA : outubro/1993
ANEXO D.5 - ELEMENTO.EXE	09
MONTA_ARQUIVO_ELEMENTAR :	
Este programa cria ou altera o arquivo com os dados individuais de cada elemento, obtidos dos vários PIs (grade e/ou imagem).	
566 linhas - 18656 bytes	
AUTORA : Josete de Fátima de Sá	DATA : dezembro/1993

ANEXO D.1 - BASICO.EXE

ARQUIVO_BASIC0 :

Programa que cria ou altera o arquivo com os dados básicos exigidos pelo Modelo Hidrossedimentológico Distribuído ANSWERS.

374 linhas - 13841 bytes

AUTORA : Josete de Fátima de Sá

DATA : novembro/1992

CONSTANTES :

nchuv = 4 ; { número máximo de tipos de precipitação }
nmedi = 35 ; { número máximo de medidas de precipitação }
nsolo = 20 ; { número máximo de tipos de solos }
ncobe = 20 ; { número máximo de tipos de cobertura do solo }
ncana = 10 ; { número máximo de larguras de canais }

VARIÁVEIS :

NRG, ISR, ICR, M : integer ; { número de chuvas, de solos, coberturas e canais }
DC, GRF : real ; { coeficiente de drenagem e perda por infiltração }
UN, PRI, TITLE : string[80] ; { variáveis de dados gerais }
IRR : array [1..nchuv] of integer ; { intervalo medições da chuva }
TC, RC : array [1..nchuv,1..nmedi] of real ; { tempo e intensidade precipit. }
TP, FCAP, FC, A, P, DF, USM, SKDR : array [1..nsolo] of real ; { variáveis dos tipos de solo }
PIT, PER, HU, ROUGH, RN, CDR : array [1..ncobe] of real ; { variáv. dos tipos de cobertura }
WID, CN : array [1..ncana] of real ; { variáv. dos diferentes canais }
CROP : array [1..ncobe] of string[8] ; { nome de culturas e coberturas }

PROCEDIMENTOS AUXILIARES :

procedure **CONSISTE**; { consistência das variáveis de entrada do tipo string }
procedure **INTEIRO**; { consistência das variáveis de entrada do tipo inteiro }
procedure **RREAL**; { consistência das variáveis de entrada do tipo real }
procedure **VERIFICA_ARQUIVO**; { verificação da existência e criação de arquivo }
procedure **CORRIGIR**; { correção de entrada de dados }

PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS :

procedure **GENERALIDADES**; { entrada de dados gerais para o Modelo ANSWERS }
TÍTULO DO ARQUIVO : TITLE
UNIDADE DE MEDIDA : UN
IMPRIMIR : PRI

procedure **PRECIPITACAO**; { informação de chuva }
NUMERO DE PADROES DE CHUVA : NRG
I variando de 1 até NRG
NUMERO DE INTERVALOS DE TEMPO : IRR[I]

```

procedure SOLO;                { informação de solo }
    NUMERO DE TIPOS DE SOLO          : ISR
    I variando de 1 até ISR
    POROSIDADE (%)                   : TP[I]
    CAPACIDADE DE CAMPO (%)          : FCAP[I]
    CONST. DE INFILTRACAO
        -> CAPACIDADE MINIMA (mm/h)   : FC[I]
        -> CAPACIDADE MAXIMA (mm/h)   : A[I]
        -> EXPOENTE (adm.)            : P[I]
    ZONA DE CONTROLE (mm)            : DF[I]
    UMIDADE ANTECEDENTE (%)          : USM[I]
    CONSTANTE DE EROSAO (adm)        : SKDR[I]
    COEFICIENTE DE DRENAGEM PARA MANILHA : DC
    PERDA POR INFILTRACAO           : GRF

procedure COBERTURA;          { informação de superfície e de uso do solo }
    NUMERO DE CULTURAS E SUPERFICIES : ICR
    I variando de 1 até ICR
    NOME DA CULTURA                 : CROP[I]
    INTERCEPCAO POTENCIAL MAXIMA (mm) : PIT[I]
    PORCENTAGEM DE COBERTURA (%)     : PER[I]
    COEFICIENTE DE RUGOSIDADE (adm.)  : ROUGH[I]
    ALTURA DA RUGOSIDADE (mm)        : HU[I]
    RUGOSIDADE DE MANNING (adm.)      : RN[I]
    CONSTANTE DE EROSAO (adm.)        : CDR[I]

procedure CANAL;               { descrição do canal }
    NUMERO DE TIPOS DE CANAIS         : M
    LARGURA DO CANAL (m)             : WID[I] ;
    RUGOSIDADE DE MANNING (adm.)      : CN[I] ;

procedure CRIA_ARQUIVO;        { abertura de arquivo para criação }

procedure ALTERA_ARQUIVO;      { abertura de arquivo para alteração }

```

PROGRAMA PRINCIPAL

```

MENU : Criar ou Alterar arquivo (C/A) ? → se 'C' : CRIA_ARQUIVO ;
      ↪ se 'A' : ALTERA_ARQUIVO ;

```

```

GENERALIDADES ;
PRECIPITACAO ;
SOLO ;
COBERTURA ;
CANAL .

```

ANEXO D.2 - TEXTO.EXE

TRANSFORMA_EM_TEXTO :

Programa que transforma arquivos do tipo grade MNT ou imagem do SGI em texto (ASCII), anotando suas referências nas dez primeiras linhas.

445 linhas - 17280 bytes

AUTORA : Josete de Fátima de Sá

DATA : outubro/1992

CONSTANTES :

nmax = 1700 ; { número máximo de elementos }

VARIÁVEIS :

aux1, aux2	: word ;	{ variáveis auxiliares do tipo inteiro para entrada de elementos numéricos }
valor	: real ;	{ variável auxiliar do tipo real para entrada de elementos numéricos }
r, tipo, ele	: char ;	{ variável auxiliar do tipo caracter para entrada de elementos temáticos }
numero, nome	: st50 ;	{ variáveis auxiliares do tipo string para montagem das strings }

PROCEDIMENTOS AUXILIARES :

procedure CABECALHO;	{ inicialização da tela do programa sendo executado }
procedure CONSISTE ;	{ consistência das variáveis de entrada do tipo string }
procedure VERIFICA_ARQUIVO;	{ verificação da existência e criação de arquivo }

PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS :

procedure **GRADE**; { organização dos arquivos de grades MNT geradas pelo SGI }

- QUAL O PI_GRADE A TRANSFORMAR ? ↗ (A) altitude
 - ↳ (O) orientacao
 - ↳ (E) exutorio (acumulado)
 - ↳ (D) declividade
- Ler nome do Projeto, Plano de Informacao, numero de colunas e linhas do arquivo;
- Escrever as informacoes de identificacao no novo arquivo PI;
- Se PI_GRADE (A)ltitude : → então diferenciar elementos fora da bacia;
- Se PI_GRADE (O)rientacao : → então transformar o codigo no valor da direcao ;
- Observar que a leitura é feita do arquivo ASCII de valor numérico do tipo real, com o novo arquivo sendo construído em ASCII de valor numérico do tipo real.

procedure **IMAGEM**; { organização de arquivos do tipo imagem (byte) criado pelo SGI }

- VERIFICAR SE PI_DRENAGEM (S/N) ? (S) → então elementos sem canal devem ser '0';
- Ler nome do Projeto, Plano de Informacao, numero de colunas e linhas do arquivo;
- Escrever as informacoes de identificacao no novo arquivo PI;
- Observar que a leitura é feita do arquivo tipo BYTE, com o novo arquivo sendo construído em ASCII de valor numérico do tipo inteiro.

PROGRAMA PRINCIPAL :

CABECALHO ;

TRANSFORMAR PIs GRADES_MNT OU IMAGENS (G/I) ? ↗ se 'G' : GRADE;
↳ se 'I' : IMAGEM;

ANEXO D.3 - SUPERPOE.EXE

SUPERPOE_PIS :

Programa que verifica a superposição de todos os PIs tomando como guia o PI_11 (altitude), sendo que os Pis_imagem devem ser preenchidos no caso de alguma discordância.

611 linhas - 16800 bytes

AUTORA : Josete de Fátima de Sá

DATA : maio/1993

CONSTANTES :

colmax = 900 ; { número máximo de colunas }

VARIÁVEIS :

PI,		{ número do PI sendo analisado	}
aux1, aux2,		{ variáveis auxiliares tipo inteiro para linha e coluna	}
Hposi, Hposf,		{ início e final das linhas da matriz	}
Vposi, Vposf,		{ início e final das colunas da matriz	}
coluna, linha,		{ número de colunas e linhas da matriz analisada	}
guiaC, guiaL	: word;	{ número de colunas e linhas da matriz guia	}
ele, r, test	: char;	{ variáveis de leitura de caracter	}
pi1, proj,		{ variável de leitura do elemento e nome do projeto	}
numero, nome	: string[50];	{ variáveis do tipo string com 50 caracteres	}
escr	: string[80];	{ variáveis do tipo string com 80 caracteres	}
ITEMP	: array [1..3, 1..colmax] of string[4];	{ matriz auxiliar para a análise de cada linha da matriz	}
plano	: array [1..11] of string[40];	{ nome do planos de informação	}

PROCEDIMENTOS AUXILIARES :

procedure CABECALHO;	{ inicialização da tela do programa sendo executado }
procedure CONSISTE;	{ consistência das variáveis de entrada do tipo string }
procedure INTEIRO;	{ consistência das variáveis de entrada do tipo inteiro }
procedure VERIFICA_ARQUIVO;	{ verificação da existência e criação de arquivo }

PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS :

procedure GRADE;	{ leitura da matriz com formato de valor numérico real ou inteiro }	→ Somente organização das matrizes grade de acordo com o PI definido;
procedure IMAGEM;	{ leitura da matriz com formato de numero inteiro (código do tema) }	→ Somente organização das matrizes imagem de acordo com o PI em questão;
procedure ABRE_PI_11;	{ abre o arquivo que contém a matriz com a grade de altitude }	→ Somente abertura o arquivo da matriz guia e retorna para o procedimento principal;
procedure PREENCHER;	{ preenchimento do elemento ausente na matriz imagem }	→ Análise dos 8 vizinhos mais próximos: de acordo com o número de repetições será preenchido o elemento sendo analisado; → Retorno ao procedimento COMPLETA;
procedure COMPLETA;	{ verificação os elementos da matriz imagem a serem ajustados à matriz guia de altitude }	→ Conforme a matriz guia (altitude) cada elemento será verificado sua existência ou não; → Se o elemento está ausente e é necessário então → PREENCHER; → Observar a utilização de uma matriz móvel (ITEMP) que assume a linha anterior e posterior para cada linha da matriz sendo analisada (considerando todas as colunas) !

```

procedure CONSTRUIR;           { construção da nova matriz ajustada conforme a matriz guia }
    → Abertura do arquivo a ser construído;
    → Se PI <> 11 então → ABRE_PI_11;
    → Caso PI seja:
    1,2,3,6,7,9,10 : → IMAGEM;
                    → COMPLETA;
    4,5,8,11      : → GRADE;

procedure NOVA_MATRIZ;        { preparação para a construção e definição qual o PI a ser ajustado }
    → O PI_11 (PI_ALTITUDE) JA FOI CRIADO (S/N) ?
    → Se (test = 'N') então → NOME DO ARQUIVO A SER RELACIONADO AO PI_11 : nome1
                                → PI := 11 ;
                                → CONSTRUIR;
    → INDICAR O NUMERO DO PLANO_INFORMACAO (PI) : PI
    → I := variando de 1 até 11
        Caso I seja
            1. PI_CHUVA          (imagem)
            2. PI_MANILHA       (imagem)
            3. PI_DRENAGEM      (imagem)
            4. PI_DECLIVIDADE   (grade)
            5. PI_ORIENTACAO    (grade)
            6. PI_SOLO          (imagem)
            7. PI_COBERTURA    (imagem)
            8. PI_CANAL         (grade)
            9. PI_PRATICA_1     (imagem)
            10. PI_PRATICA_2    (imagem)
            11. PI_ALTITUDE     (grade)
        → INDICAR O NOME DO ARQUIVO A TRANSFORMAR: nome1
    → CONSTRUIR;
    → OUTRO PLANO DE INFORMACAO A SER CRIADO (S/N) ? r
    → Se (r = 'S') então → NOVA_MATRIZ;

```

PROGRAMA PRINCIPAL :

```

CABECALHO ;
INDICAR O DRIVE DAS LEITURAS DOS ARQUIVOS :
INDICAR O DRIVE DAS CRIACOES DOS ARQUIVOS :
INDICAR O NOME DO PROJETO (3 caracteres) : proj
INDICAR A RESOLUCAO EM ESTUDO (em metros) : estud
NOVA_MATRIZ ;

```

ANEXO D.4 - CANAL.EXE

DECLIVIDADE_CANAL:

986 linhas - 305280 bytes

Programa que cria o PI de altitude do canal em resolução detalhada, compatiliza os PIs, calcula as declividades, transfere para o PI em resolução de estudo e define o exutório da bacia.

AUTORA : Josete de Fátima de Sá

DATA : outubro/1993

CONSTANTES :

colmax = 900 ; { número máximo de colunas }

VARIÁVEIS :

menor, estud,	{ resoluções do PI em estudo e do PI detalhado	}	
Hposi, Hposf,	{ início e final das linhas da matriz	}	
Vposi, Vposf,	{ início e final das colunas da matriz	}	
coluna, linha,	{ número de colunas e linhas da matriz detalhada	}	
aux1, aux2,	{ variáveis auxiliares tipo inteiro para linha e coluna	}	
luna, inha,	{ número de colunas e linhas da matriz em estudo	}	
EXUT,	{ número do elemento de saída (exutório)	}	
DX	: word ;	{ largura do elemento	}
aux3, aux4,	{ variáveis auxiliares tipo real	}	
fracao	: real ;	{ razão entre as resoluções	}
ele, r	: char ;	{ variáveis de leitura de caracter	}
numero, nome,	{ variáveis do tipo string com 50 caracteres	}	
nome1, nome2,	{ variáveis do tipo string com 50 caracteres	}	
nome3, nome4,	{ variáveis do tipo string com 50 caracteres	}	
nome5, nome6,	{ variáveis do tipo string com 50 caracteres	}	
nome7, nome8,	{ variáveis do tipo string com 50 caracteres	}	
proj	: string[50] ;	{ nome do projeto	}
escr	: string[80];	{ variáveis do tipo string com 80 caracteres	}
NIOUT, NJOUT	: array [1..10] of word;	{ número da linha e da coluna do elemento de saída	}
CONT	: array [1..colmax] of word;	{ identificador do elemento de saída	}
ITEMP	: array [1..3,1..colmax] of string[7];	{ matriz auxiliar para a análise de cada linha da matriz }	}

PROCEDIMENTOS AUXILIARES :

procedure CABECALHO;	{ inicialização da tela do programa sendo executado }
procedure CONSISTE;	{ consistência das variáveis de entrada do tipo string }
procedure INTEIRO;	{ consistência das variáveis de entrada do tipo inteiro }
procedure VERIFICA_ARQUIVO;	{ verificação da existência e criação de arquivo }

PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS :

procedure MENU; { menu esclareedor sobre quais as resoluções e quais Pis envolvidos }

→ A resolucao com maior detalhamento devera ser MULTIPLA ou resultar em numero INTEIRO + METADE, por exemplo : (em estudo) 50m / (detalhada) 10m = 5 MULTIPLA
(em estudo) 25m / (detalhada) 10m = 2,5 INTEIRO + METADE

Serao LIDOS os arquivos do projeto PRJ :

- > PRJ_11.010 PI_ALTITUDE com prefixo da resolucao detalhada
- > PRJ_03.010 PI_DRENAGEM com prefixo da resolucao detalhada
- > PRJ_11.050 PI_ALTITUDE com prefixo da resolucao em estudo
- > PRJ_03.050 PI_DRENAGEM com prefixo da resolucao em estudo

Serao CRIADOS os arquivos do projeto PRJ :

- > PRJ_08.010 PI_CANAL com prefixo da resolucao detalhada
- > PRJ_08.050 PI_CANAL com prefixo da resolucao em estudo

NOME DO PROJETO EM ESTUDO (3 caracteres) : proj

```

RESOLUCAO MAIS DETALHADA (em metros) : menor
RESOLUCAO EM ESTUDO (em metros) : estud
→ Razão da resolução em estudo e da mais detalhada : → fracao := estud / menor ;
→ O PI_ALTITUDE DETALHADO EH ',proj,' _11. ',menor,' (S/N) ?
O PI_DRENAGEM DETALHADO EH ',proj,' _03. ', menor,' (S/N) ?
O PI_ALTITUDE EM ESTUDO EH ',proj,' _11. ',estud,' (S/N) ?
O PI_DRENAGEM EM ESTUDO EH ',proj,' _03. ', estud ,' (S/N) ?
O PI_CANAL DETALHADO SERA ',proj,' _08. ', menor,' (S/N) ?
O PI_CANAL EM ESTUDO SERA ',proj,' _08. ', estud,' (S/N) ?

procedure CRIA_AUXILIAR; { construção do PI_ALTITUDE DO CANAL, }
→ Se (DX = menor) → então 'D' : DETALHADA;
↳ então 'I' : EM ESTUDO;
→ CONSTRUINDO O PI_ALTITUDE DO CANAL, COM RESOLUCAO ',nome', ARQUIVO,
name3', !
→ Verificação se o número de linhas e colunas é o mesmo para PI_DRENAGEM (nome1) e para
PI_ALTITUDE (nome2);
OS PLANOS: ',nome1,' E ',nome2,' DEVEM TER O MESMO NUMERO DE LINHAS E
COLUNAS !
→ Se não forem coincidentes as matrizes em questão o programa retorna ao início :
OS PIs DEVEM SER SUPERPOSTOS, VERIFIQUE !

procedure COMPATIBILIZAR; { verificação dos tamanhos proporcionais dos PIs a analisados }
→ → COMPATIBILIZANDO O PI_ALTITUDE DO CANAL DE RESOLUCAO DETALHADA,
COM OS PIs DE RESOLUCAO EM ESTUDO !
→ Verificação da resolução do PI em estudo;
PI EM ESTUDO → COLUNAS : ',luna,' LINHAS : ',inha,' !
→ Verificação da resolução do PI detalhado;
PI DETALHADO → COLUNAS : ',valorC,' LINHAS : ',valorL,' !
→ Esclarecimento de como deve estar;
No.DE COLUNAS DEVE SER DE ',coluna,' E DE LINHAS ',linha,' !
→ Notificação de quantas colunas devem ser eliminadas:
ELIMINAR ',(valorC-coluna),' COLUNAS !
→ Entrada das colunas que devem formar a matriz: → COLUNA INICIAL : Vposi;
→ COLUNA FINAL : Vposf;
→ Verificação se os valores de entrada das colunas são compatíveis:
→ Se ((Vposf-Vposi+1) = round (fracao * luna)) então → Poderá prosseguir !
→ Notificação de quantas colunas devem ser eliminadas:
ELIMINAR ',(valorL-linha),' LINHAS !
→ Entrada das colunas que devem formar a matriz: → LINHA INICIAL : Hposi;
→ LINHA FINAL : Hposf;
→ Verificação se os valores de entrada das linhas são compatíveis:
→ Se ((Hposf-Hposi+1) = round (fracao * inha)) então → Poderá prosseguir !

procedure PROCURA; { investigação dos 8 vizinhos mais próximos para cálculo da
declividade do canal }
→ Identificação do elemento vizinho que faz parte do canal apresentando declividade;
→ Determinação do vizinho pertencente ao canal com maior ingridimidade;

procedure CALCULA_DECLIVE; { cálculo da declividade do canal para PI com as altitudes do canal }
→ Se (DX = menor) → então 'DETALHADA'
↳ então 'EM ESTUDO'
→ CONSTRUINDO O PI_DECLIVE DO CANAL, COM RESOLUCAO ',nome,' ARQUIVO'
,name,' !
→ Análise de elemento por elemento da bacia para detectar os elementos de canal ;
→ Verificação da declividade : → PROCURA ;
O ELEMENTO EXUTORIO DE RESOLUCAO DETALHADA EH : ', CONT[K],' !

```

```

procedure GENERALIDADES;      { Leitura dos dados gerais do projeto }
    NOME DO PROJETO      (3 caracteres)      : proj
    TITULO DO PROJETO    (max 44 caract.)    : TITLE
    LARGURA DO ELEMENTO (em metros)        : DX
    ELEMENTO DE SAIDA DA BACIA -> LINHA      : NIOUT
                                          COLUNA : NJOUT

```

```

procedure COPIAR;              { Função auxiliar para repetir formatos }

```

```

procedure PLANO_01;           { Formatação da informação PI_01 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure PLANO_02;           { Formatação da informação PI_02 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure PLANO_03;           { Formatação da informação PI_03 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure PLANO_04;           { Formatação da informação PI_04 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure PLANO_05;           { Formatação da informação PI_05 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure PLANO_06;           { Formatação da informação PI_06 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure PLANO_07;           { Formatação da informação PI_07 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure PLANO_08;           { Formatação da informação PI_08 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure PLANO_09;           { Formatação da informação PI_09 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure PLANO_10;          { Formatação da informação PI_10 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure PLANO_11;          { Formatação da informação PI_11 para arquivo do Elemento }

```

```

procedure MONTA_ARQUIVO;      { Através dos outros procedimentos repete os demais procedimentos
                                para os n elementos da bacía }

```

```

PROGRAMA PRINCIPAL:
ENTRADA;
GENERALIDADES;
MONTA_ARQUIVO.

```