UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO CHUVA EM VAZÃO: ESTUDO DO MODELO TOPMODEL

RENATO FIGUEIRO VARELLA

ORIENTADOR: NESTOR ALDO CAMPANA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

PUBLICAÇÃO: MTARH.DM - 007A/98
BRASÍLIA/DF:MARÇO/1998

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO CHUVA EM VAZÃO: ESTUDO DO MODELO TOPMODEL

RENATO FIGUEIRO VARELLA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

APROVADA POR :

_____

NESTOR ALDO CAMPANA. Dsc (UnB)
(ORIENTADOR)

_____

SÉRGIO KOIDE. PhD. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

JAIME JOAQUIM DA SILVA PEREIRA CABRAL. PhD. (UFPE)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 23 DE MARÇO DE 1998
FICHA CATALOGRÁFICA

VARELLA, RENATO FIGUEIRO
Simulação Matemática do Processo de Transformação Chuva em Vazão: Estudo do Modelo TOPMODEL [Distrito Federal] 1998. 157p, 297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 1998). Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.
1.Modelagem Matemática
2.Chuva-vazão

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VARELLA, R. F., 1998. **Simulação Matemática do Processo de Transformação Chuva em Vazão: Estudo do Modelo TOPMODEL.** Dissertação de Mestrado, publicação MTARH.DM/007A, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 157p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Renato Figueiro Varella
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Simulação Matemática do Processo de Transformação Chuva em Vazão: Estudo do Modelo TOPMODEL
GRAU/ANO: Mestre/1998

É concedida à Universidade de Brasília permissão para produzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos ou científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Renato Figueiro Varella
R. Dr Vahia de Abreu 112
Nova Xavantina, MT. CEP 78690-000. Brasil

DEDICATÓRIA

Esta dissertação é dedicada a Luiza, Ester, Juliana, Gabriela e a Maria Stela, que com paciência, sabedoria e carinho possibilitou que eu pudesse realizar este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Nestor Aldo Campana pela orientação, ajuda e atenção durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores do MTARH Cristina Célia Silveira Brandão, Marco Antônio Almeida de Souza, Nabil Joseph Eid, Oscar de Moraes Cordeiro Netto, Ricardo Silveira Bernardes e Sérgio Koide pelo que transmitiram e ensinaram.

Aos colegas da turma de 1996, Olga, Regina, Raquel, André, Carlos Tadeu, Elton e Harada, , pela amizade.

Aos amigos Boy e André do LAA.

A CAPES pela bolsa de pesquisa concedida.

À coordenação do Campus da Nova Xavantina da UNEMAT, representada pela Professora Genira Walker, e aos professores pelo apoio e em especial a Professora Beatriz pelo incentivo dado.

A Universidade do Estado de Mato Grosso, através da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação que possibilitou a realização deste trabalho, e

A minha família pela compreensão e incentivo nos momentos mais difíceis.

RESUMO

Neste trabalho foi avaliado o desempenho global do modelo TOPMODEL de simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão aplicado a bacia do rio Descoberto.

Os valores de evapotranspiração foram determinados considerando a variabilidade espacial de cobertura do solo utilizando técnicas de geoprocessamento . Foi estudada a influencia da resolução espacial do modelo numérico do terreno nos resultados produzidos pelo modelo e nos valores dos parâmetros.

Os resultados mostraram que dois parâmetros influenciaram significativamente nos resultados do modelo: *m*, coeficiente de decaimento exponencial da transmissividade do solo e T_0 a transmissividade lateral para solo saturado, cujos valores obtidos na calibração do modelo dependem diretamente da resolução espacial do modelo numérico terreno.

A determinação dos parâmetros do modelo não apresentou dificuldades e nas simulações realizadas, foram obtidos ajustes adequados em termos de volume, vazão de pico e tempo ao pico, mas a forma do hidrograma não foi reproduzida adequadamente pelo modelo.

ABSTRACT

In this work, the model for mathematical simulation of the rainfall-runoff process, TOPMODEL, has been evaluated through a simulation of the Descoberto river catchment

The evapotranspiration values were calculated considering ground covers utilizing geoprocessing techniques. The influence of the grid size of the digital elevation map in the model's results and in values of the parameters were studied.

The results showed that two parameters possess great influence in model outputs: *m*, exponential storage and T_0, the lateral transmissivity when the soil is saturated, for which, the values obtained in the calibration procedure have shown its dependence to the size of the digital elevation map grid.

No difficulties were found in the estimation of the model parameters and in the simulatons carried out, volume, time and values of peakflows were satisfactorily fitted, but the hydrograph was not well represented.

ÍNDICE

Página

1. INTRODUÇÃO 1

1.1 Considerações Gerais 1

1.2. Objetivos 5

1.3. Justificativa 5

1.4. Desenvolvimento do estudo e conteúdo 7

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8

2.1. Fundamentação teórica 8

2.2. Modelos 11

2.3. Escala Espacial Hidrológica 21

2.4. Conclusões 27

3. MODELO DE SIMULAÇÃO CHUVA-VAZÃO 29

3.1. Estrutura do trabalho 29

3.2. Descrição do TOPMODEL 32

4. TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS ESPACIAIS 44

4.1. Descrição da área de estudo 44

4.2. Precipitação 47

4.3. Evapotranspiração 53

4.4. Índice topográfico 58

4.5. Vazão 65

5. USO DO MODELO E RESULTADOS 67

5.1. Análise de Sensibilidade 67

5.2. Calibração do modelo 74

5.2.1 Estimativa preliminar do parâmetro m 78

5.2.2 Parâmetros T_0 e m 80

5.2.3 Parâmetros *CHV* e *RV* 88
5.2.4 Valores finais dos parâmetros 91
5.3 Simulação 95

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105
ANEXO 1 109

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

3.1- Estrutura de integração de atividades no modelo TOPMODEL 30

3.2- Formação de escoamento superficial - conceitualização do Topmodel 34

3.3- Esquema simplificado dos armazenamentos considerados no Topmodel 39

4.1- Localização da bacia do rio de Descoberto no Distrito Federal 45

4.2- Estação Descoberto Montante 46

4.3- Estações hidrometeorológicas existentes na área de estudo 48

4.4- Espacialização da precipitação, dados de 1988. A -.Fevereiro, B- Março 51

4.5- Espacialização da precipitação, dados de 1995. A -Março, B - Abril 52

4.6- Classificação da imagem Landsat TM da Bacia do Descoberto, 1988 55

4.7-`Classificação da imagem Landsat TM da Bacia do Descoberto, 1995 55

4.8- Distribuição de evapotranspiração potencial ao longo do dia 58

4.9- Modelo numérico do terreno - bacia do rio Descoberto 60

4.10- Distribuição dos valores de índice topográfico.Resolução espacial do MNT: A-60m, B-90m 63

4.11- Distribuição dos valores de índice topográfico.Resolução espacial do MNT: A-150m, B-210m 64

4.12- Ajuste da curva chave a partir de medições cota - vazão 65

5.1- Sensibilidade do modelo ao parâmetro m 70

5.2- Sensibilidade do modelo ao parâmetro *T0* 71

5.3- Sensibilidade do modelo ao parâmetro S*rmax* 71

5.4- Vazões calculadas pelo modelo em função do parâmetro *m* 73

5.5- Vazões calculadas pelo modelo em função do parâmetro *T0* 73

5.6- Distribuição do índice topográfico para a Bacia do rio Descoberto 75

5.7- Precipitação e vazão, bacia do rio Descoberto-Início: 11/02/1988 77

5.8- Curva de recessão da bacia do rio Descoberto 79

5.9- Calibração do Evento 1 - Grade do MNT de 30 m 82
5.10- Calibração do Evento 1 - Grade do MNT de 90 m 82
5.11- Calibração do Evento 1 - Grade do MNT de 150 m 83
5.12- Calibração do Evento 1 - Grade do MNT de 210 m 83
5.13- Calibração do Evento 2 - Grade do MNT de 90 m 84
5.14- Calibração do Evento 3 - Grade do MNT de 90 m 84
5.15- Calibração do Evento 4 - Grade do MNT de 90 m 85
5.16- Calibração do Evento 5 - Grade do MNT de 90 m 85
5.17- Estimativa do parâmetro , para 5 eventos 87
5.18- Divisão da bacia em sub-áreas 88
5.19- Hidrogramas calculado e observado para evento 1 grade do MNT de 30m 90
5.20- Simulação - Bacia rio Descoberto, 1988 93
5.21- Simulação - Bacia rio Descoberto, 1995 - Resolução espacial do MNT: 30m 97
5.22- Simulação - Bacia rio Descoberto, 1995 - Resolução espacial do MNT: 90m 98
5.23- Simulação - Bacia rio Descoberto, 1995 - Resolução espacial do MNT: 150m 99
5.24- Simulação - Bacia rio Descoberto, 1995 - Resolução espacial do MNT: 210m 100

ÍNDICE DE TABELAS

Página

2.1- Definição de escalas em hidrologia 21

2.2- Tipos de classes com regimes hidrológicos significantemente distintos 25

4.1- Médias históricas de precipitações nas estações da região da bacia do rio Descoberto 49

4.2- Fatores ponderados para cálculo da precipitação média na bacia do rio Descoberto 50

4.3- Classes de cobertura do solo e respectivas porcentagens sobre a evaporação medida em tanque classe A 54

4.4- Determinação do fator de correção da evaporação tanque classe A, segundo as classes de cobertura da área da bacia do rio Descoberto 57

4.5- Distribuição do índice topográfico em função da porcentagem de área da bacia 61

5.1- Parâmetros usados na calibração do modelo 80

5.2- Estimativa do parâmetro *m* 86

5.3- Efeito dos parâmetros de velocidade nos valores do Fator *E* e do tempo ao pico 89

5.4- Valores dos parâmetros de velocidade *CHV* e *RV* 90

5.5- Valores dos parâmetros do modelo 91

5.6- Valores de *T0* estimados 96

...

SIMBOLOGIA

a_i	Porcentagem da área da bacia ocupada pela classe de cobertura de solo i
A	Área da bacia
A_i	Fração de área correspondente à classe i de índice topográfico
c	Coeficiente de deflúvio
ch	Quantidade de trechos de canal
CHV	Velocidade de propagação no canal principal
DTH	Variação do conteúdo de H_2O na frente de molhamento
E	Coeficiente de Nash e Sutcliffe
E_a	Evapotranspiração real
E_p	Evapotranspiração potencial
$E_{TqclasseA}$	Valor medido de evaporação em tanque classe A
f	Parâmetro de decaimento da condutividade hidráulica
f_i	Porcentagem da evaporação do Tanque classe A para classe i
FG	Fator global
h	Valor de cota lido no linigrama
HF	Valor de sucção na frente de molhamento
i_m	Intensidade média da precipitação sobre toda a área drenada, de duração igual ao tempo de concentração
K_0	Condutividade hidráulica de superfície do solo
K_{0s}	Condutividade hidráulica de saturação da superfície do solo
K_i	Condutividade hidráulica no local i na profundidade z_i
K_Z	Condutividade hidráulica na profundidade Z do manto impermeável
l_j	Comprimento de um trecho de canal
m	Parâmetro do modelo TOPMODEL
q_i	Fluxo por unidade de comprimento do contorno
q_v	Fluxo vertical

Q	Vazão do rio
Q_b	Vazão de base
Q_v	Recarga total do lençol freático
R	Velocidade de recarga do lençol freático
RV	Velocidade nas sub-bacias
S_i	Déficit de armazenamento no local i
S_{r0}	Déficit inicial na zona raízes
S_{rz}	Déficit na zona das raízes
S_{rmax}	Máximo déficit possível na zona das raízes
S_{uz}	Armazenamento na zona insaturada
t_d	Tempo de permanência na zona não saturada por unidade de déficit
T_i	Transmissividade lateral no local i na profundidade z_i
T_0	Transmissividade lateral quando o solo está saturado
Vaz_max_{calc}	Vazão máxima calculada pelo modelo
Vaz_max_{obs}	Vazão máxima observada
$Volume_{calc}$	Volume total calculado pelo modelo
$Volume_{obs}$	Volume total observado
Z	Profundidade do manto impermeável medida a partir da superfície do terreno
z_i	Profundidade da superfície do lençol freático medida a partir da superfície do terreno
z_{med}	Profundidade média do lençol freático
β_i	Declividade do terreno
φ_0	Profundidade da franja capilar
ε	índice de distribuição de tamanho de poros
σ_e	Variância dos resíduos
σ_o	Variância das vazões observadas
θ	Umidade do solo
θ_{fc}	Umidade na capacidade de campo
θ_s	Umidade de saturação

$\Delta\theta_1$	Porosidade efetiva de drenagem

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Os diversos modelos chuva-vazão foram criados com objetivo básico de representar matematicamente o processo de transformação da chuva em vazão, na seção de saída da bacia de drenagem.

Conforme Todini (1988), as origens dos modelos chuva-vazão, em seu entendimento amplo, podem ser encontrados na segunda metade do século XIX, tendo surgido como resposta a três tipos de problemas de engenharia: projeto de redes de esgotos urbanos, projeto de sistemas de drenagem de solos e projeto de vertedores. Em todos esses casos, a vazão de descarga foi sempre a principal variável de interesse.

As primeiras tentativas de modelagem chuva-vazão (final do século XIX, início do século XX) resultaram em fórmulas empíricas que foram desenvolvidas para casos particulares, tendo sido aplicadas a outras situações assumindo que as novas condições de aplicação eram suficientemente similares às originais.

Nesse sentido, o método racional foi uma das primeiras abordagens desenvolvidas para prever o escoamento superficial a partir de valores de precipitação. A equação, que é a base deste método,

$$Q = c.i_m A_d \qquad (1.1)$$

onde

Q = Vazão [L^3/T];

c = Coeficiente de deflúvio, definido como a relação entre o pico de vazão por unidade de área e a intensidade média de chuva;

i_m = Intensidade média da precipitação sobre toda a área drenada, de duração igual ao tempo de concentração [L/T],

A = Área da bacia [L^2]

expressa o conceito básico de que a máxima vazão resultante de uma chuva de intensidade uniforme ocorre quando todas as partes da bacia passam a contribuir para a seção de drenagem. O tempo necessário para isto ocorrer, contado a partir do início da precipitação, é chamado de tempo de concentração da bacia. A aplicação do método racional está restrita a bacias com área total inferior a 5 km^2, de acordo com Pinto et al. (1976).

Algumas alterações foram posteriormente introduzidas nesse modelo a partir de 1920, baseadas no conceito de linhas isócronas, linhas que unem pontos nos quais as vazões escoadas apresentam os mesmos tempos de chegada até a seção de saída. A incorporação dessa variável ao método racional resultou no primeiro modelo chuva-vazão baseado em uma função de transferência cuja forma e parâmetros eram obtidos a partir de mapas topográficos e pelo uso da equação de Manning para avaliar os diferentes tempos de concentração.

Em 1932, Le Roy K. Sherman introduziu o conceito de hidrograma unitário, que considera uma precipitação unitária com uma determinada duração. O hidrograma de uma onda de cheia é formado pela superposição de dois tipos distintos de contribuição, uma proveniente do escoamento superficial (incluindo a contribuição do escoamento sub-superficial e a própria precipitação sobre o canal) e a outra do lençol subterrâneo.

Já na década de 50, abordagens de engenharia de sistemas permitiram avanços reais através do emprego de técnicas matemáticas usando transformadas de Laplace e de Fourier, para se produzir funções de resposta a partir de análise de dados de entrada e saída.

No início de década de 60, verificou-se que o hidrograma unitário podia ser expresso por parâmetros estimados a partir de características da bacia hidrográfica ou através de procedimentos estatísticos como momentos, regressões, máxima verossimilhança, etc.

A crítica que aqui se faz é que foram desenvolvidas e aplicadas técnicas que, embora satisfatórias sob o ponto de vista matemático, foram perdendo, de forma crescente, a conexão com o mundo real dos problemas hidrológicos.

Como resultado, pode até ser fácil verificar o desempenho de um dado modelo em termos dos valores reais de precipitação e de escoamento superficial, mas pode ser bastante difícil entender a qualidade e o significado físico dos valores dos diversos parâmetros presentes no modelo, embora, dependendo do objetivo do emprego desses modelos, possam ser bastante adequados.

Essa preocupação em criar uma ligação do modelo com a realidade produziu, ainda nos anos 60, novas abordagens para a confecção de modelos chuva-vazão mais direcionadas para a interpretação física do processo. Assim, poder-se-ia representar o comportamento de cada componente individual do ciclo hidrológico, nas dimensões da bacia, usando um certo número de elementos conceituais interconectados, cada um dos quais representando a resposta a um subsistema particular.

As bases para a mudança de abordagem podem ser resumidas como :

- estender o uso de modelos para longos períodos de tempo.

- aplicar o modelo a bacias complexas com grande variabilidade espacial em termos de solos, vegetação, declividades, etc.

- estender a aplicação dos modelos a outras bacias similares sem a necessidade de nova calibração.

Todini (1988) descreve e analisa, os modelos de Dawdy-O'Donnel (1965), Stanford Model IV (1966), Sacramento (1973), U.S. Corps of Engineer (1966) e Tank (1975), os quais segundo este autor foram criados de acordo com os critérios acima mencionados.

O que realmente se esperava como resultado prático é que esses modelos representassem os parâmetros físicos e as características reais da bacia. O que se observou, em muitos casos, foi que a calibração de tais modelos baseada no "melhor ajuste", conduziu à obtenção de um conjunto de parâmetros desvinculados da realidade.

O passo seguinte no desenvolvimento dos modelos chuva-vazão foi a introdução de equações diferenciais, geradas a partir da equação da continuidade, com integração dos diversos subprocessos, através da atribuição para todos eles dos mesmos valores de condições de contorno.

Um dos produtos dessa abordagem, e que envolveu instituições especializadas em hidrologia e hidráulica da Dinamarca, Inglaterra e França, foi o Système Hydrologique Européen (SHE), que emprega a equação de Richards para os cálculos de infiltração na zona não-saturada, a equação de Darcy para o fluxo de água subterrânea e as equações de Saint-Venant para escoamento superficial em canal.

Deve-se ressaltar que a grande variedade de abordagens é resultante da própria complexidade dos processos físicos envolvidos, sendo que os aprimoramentos dos modelos que se têm verificado são o resultado, também, do gradual e significativo desenvolvimento da capacidade computacional.

O que se pode depreender desse breve histórico do desenvolvimento de modelos chuva-vazão, é que, dependendo da natureza do problema, torna-se cada vez mais necessário buscar modelos que apresentem sustentação física, isto é, modelos em que os parâmetros de suas equações tenham significação física, podendo ser medidos ou determinados a partir de propriedades de solo, por exemplo.

Deve-se lembrar que as maiores dificuldades ao entendimento e à quantificação da geração do escoamento superficial surgem das variabilidades espaciais de topografia, geologia, tipo de solo, cobertura vegetal, etc., além dos processos de fluxo da água, precipitação, evapotranspiração e infiltração.

Similarmente às imagens digitais de satélite, pode-se também produzir arquivos contendo informações em formato digital produzidos pela digitalização de mapas de solos, a partir dos quais é possível determinar ou atribuir valores aos parâmetros físicos como a condutividade hidráulica de saturação, por exemplo.

Neste trabalho será aplicado um modelo chuva-vazão que considera a variabilidade espacial de relevo, geologia, tipo e cobertura de solo, entre outros. O modelo deverá levar em consideração os vários processos físicos de geração de escoamento superficial em encostas, ou seja, por excedente de saturação, excedente de infiltração e fluxo de retorno.

1.2. Objetivos

Pretende-se avaliar um modelo chuva-vazão distribuído e com base física, conforme já discutido, verificando as dificuldades (ou facilidades) para se determinar os valores dos diversos parâmetros, testar o potencial das técnicas de geoprocessamento empregadas na obtenção e quantificação de variáveis e parâmetros e analisar a influência da resolução espacial nos resultados produzidos pelo modelo.

O modelo será aplicado à bacia do rio Descoberto, compreendendo a área de drenagem localizada à montante do lago de mesmo nome no Distrito Federal.

1.3. Justificativa

Conforme discutido na introdução deste trabalho, os diversos modelos e abordagens para o equacionamento chuva-vazão foram desenvolvidos, inicialmente, para responder aos problemas de engenharia como drenagem urbana e dimensionamento de vertedores. Somam-se a esses problemas básicos de engenharia outras questões que estão surgindo da crescente conscientização da significância dos impactos ambientais gerados pelas atividades humanas. Nesse contexto, tem-se verificado a crescente necessidade não só de monitoramento e gerenciamento de situações críticas, como por exemplo inundações, secas e poluição decorrente de acidentes, como também planejamento de atividades de aproveitamento de recursos hídricos. Essas ações podem ser implementadas com o auxílio desses modelos, que podem ainda ser usados para previsões em tempo real, a partir de informações de precipitação levantadas por radar.

Hornberger et al. (1985) afirmam que um dos principais objetivos da hidrologia, no aspecto científico, é a compreensão do comportamento das bacias hidrográficas com relação aos fatores atmosféricos. A modelagem chuva-vazão é uma busca no sentido de equacionar estes fenômenos.

Observa-se também, no contexto da realidade brasileira, uma grande carência de dados de vazão, sendo que, em muitos locais, têm-se somente informações de precipitação. Os modelos chuva-vazão podem, desse modo, ser empregados na previsão das vazões resultantes dessas precipitações.

Os modelos com base física são também empregados para a avaliação de impactos ambientais causados pela degradação de solos, propagação de fertilizantes e poluentes em geral. O'Connell e Todini (1996) destacam que a modelagem da migração de poluentes através das bacias requer uma compreensão muito maior dos processos e dos caminhos preferenciais de fluxo em várias escalas espaciais, não incluídos na modelagem tradicional de chuva-vazão.

Atualmente, com a crescente disponibilidade de mapas digitalizados, bem como a disponibilidade de sensoriamento remoto por satélites, tem sido possível criar sistemas de informações geográficas incluindo grandes bancos de dados para as diversas propriedades físicas. Também, a maior disponibilidade de computadores mais potentes tem permitido a solução de equações diferenciais aplicadas a discretizações em elementos computacionais cada vez menores, aumentando o interesse no desenvolvimento dos modelos diferenciais distribuídos.

A utilização de modelos de base física fornecem também a possibilidade de se entender melhor o comportamento dos diferentes fenômenos que fazem parte do processo de transformação chuva-vazão e conforme destaca Valença (1997), esses modelos permitem a reconstrução de séries de vazões, realizar previsões e simular situações especiais.

1.4. Desenvolvimento do estudo e conteúdo

No próximo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica que inclui: discussões sobre a fundamentação teórica dos modelos chuva-vazão; uma revisão de alguns modelos existentes; aspectos sobre escalas hidrológicas e as conclusões parciais com relação ao desenvolvimento dos modelos matemáticos para simulação do processo de transformação de chuva em vazão.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta para o desenvolvimento deste trabalho de avaliação do desempenho do modelo chuva-vazão TOPMODEL. São abordados aspectos como a conceitualização, as hipóteses e simplificações assumidas na formulação das equações que são empregadas no balanço de água ao nível do solo, e no cálculo da vazão na seção de saída da bacia.

No capítulo 4 é apresentada uma descrição das área de estudo, que é formada pela bacia do rio Descoberto seção à montante do lago de mesmo nome, no Distrito Federal. A seguir, são apresentados os tratamentos dados às variáveis espaciais, tendo por objetivo adequá-las ao processamento pelo modelo.

O capítulo 5 refere-se a avaliação propriamente dita do comportamento do modelo TOPMODEL, estando incluídos os estudos de sensibilidade de parâmetros, calibração do modelo com eventos chuvosos ocorridos em 1988 e verificação do desempenho do modelo calibrado à eventos do ano de 1995.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as recomendações deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fundamentação teórica

Conforme discutido por Kirkby et al. (1987), os modelos matemáticos simulam efeitos de um conjunto de processos reais ou hipotéticos e podem prever um ou mais resultados possíveis. Em um extremo, a aplicação de modelos em simulação pode ser tão simples como a substituição de alguns valores em uma equação, enquanto em outro extremo, a simulação pode seguir, rigorosamente, os processos complexos que ocorrem em situações reais.

Beven et al. (1994), discutindo a complexidade dos modelos hidrológicos consideram que todo modelo é, na verdade, uma tentativa de representar a essência dessa natureza complexa, de modo equacionável. É importante reconhecer que esta conceitualização envolve, também, uma quantidade considerável de simplificações.

Segundo Franchini et al. (1996), dois componentes principais podem ser identificados em todos os modelos conceituais de chuva-vazão: o primeiro representa o balanço de água ao nível do solo (com considerações em relação à produção de escoamento superficial) e o segundo representa a transferência do que foi gerado como escoamento superficial até a seção de saída da bacia e que será integrado à vazão total de saída.

O balanço de água ao nível do solo pode ser considerado como a parte do modelo mais importante, tendo sua importância sintetizada por Cordova e Rodrigues-Iturbe (1983) como :

"... o problema é mais ***o que*** *transferir à saída da bacia do que* ***como*** *fazer "*.

Esse componente de transferência, por sua vez, pode ser dividido em duas fases, a primeira representando a transferência do escoamento superficial ao longo das superfícies inclinadas até a rede de drenagem e, a segunda, a transferência desde a rede de drenagem até a exutória da bacia.

Para se poder compreender e equacionar o balanço de água ao nível do solo, é necessário discutir o que ocorre com a água que atinge o mesmo, ou seja, para se poder

determinar a quantidade da precipitação que é transformada em escoamento superficial precisa-se conhecer o quanto infiltrou no solo. Logo, o mecanismo chave, nesse caso, é a infiltração, que se passa a discutir, retomando alguns conceitos apresentados por Freeze (1980), Kirkby (1988) e Sivapalan et al. (1987).

A produção de escoamento superficial pode se dar por diferentes mecanismos, intimamente relacionados à maneira como a infiltração ocorre. De acordo com Dunne (1978), a fonte primária de geração de escoamento superficial é a formação de fluxos a partir da superfície dos solos, que tem, como causa, a saturação de suas camadas superficiais.

O processo de saturação da superfície do solo pode ocorrer por dois mecanismos bastante distintos. O primeiro mecanismo, apresentado por Horton (1933), considera que a intensidade de precipitação é superior à condutividade hidráulica de saturação (ou permeabilidade) do solo. Nessa situação, o conteúdo de umidade do solo aumenta em função do tempo, até que, em determinado momento, a superfície do solo se torna saturada e uma frente saturada começa a se propagar da superfície para o interior do solo. Nesse momento, a velocidade de infiltração cai abaixo da velocidade de precipitação produzindo assim fluxo superficial. Deve-se ressaltar que, em muitos casos, somente parte da bacia contribui para a produção de escoamento superficial, sendo que, em uma mesma bacia, pode haver grande heterogeneidade em termos de tipo de solos. Do mesmo modo, a distribuição da precipitação sobre a bacia ocorre de forma bastante irregular no tempo e no espaço. Todos esses fatores conjugados condicionam, em realidade, o processo de infiltração. A literatura internacional chama esse mecanisno, descrito por Horton, de excedente de infiltração.

O segundo mecanismo de produção de escoamento superficial ocorre quando a camada superficial do solo se torna saturada a partir de baixo, devido tanto à precipitação quanto ao fluxo sub-superficial. Em outras palavras, esse mecanismo conhecido como escoamento resultante do que excedeu a saturação do solo (Dunne, 1973), produz escoamento superficial quando a capacidade de armazenamento do solo está completamente preenchida. Dessa forma, qualquer adição subsequente de água à superfície do solo, independente de sua velocidade, é obrigada a escoar superficialmente.

Pode haver, além dos processos descritos, fluxo superficial de retorno, que ocorre quando o fluxo sub-superficial é forçado a escoar para fora do solo, o que se verifica: a) em áreas que apresentam perfis côncavos, b) quando há convergência do lençol subterrâneo com o plano do solo ou c) onde a espessura do solo ou a permeabilidade decrescem com a inclinação.

Sivapalan et al. (1987) afirmam que o mecanismo do tipo Horton tende a predominar na produção de fluxo superficial em regiões semi-áridas e desérticas, nas quais a ausência de vegetação e de outras matérias orgânicas evitam o desenvolvimento de uma estrutura de solo porosa através da qual a água pode mover-se facilmente. Segundo o mesmo autor, a ocorrência da formação de escoamento superficial pelo mecanismo de excedente de saturação (Dunne) verifica-se em áreas próximas aos canais e em áreas úmidas cobertas por vegetação com lençóis d'água a pequena profundidade, mesmo quando as capacidades de infiltração são altas quando comparadas às intensidades normais de precipitação.

A questão da geração de escoamento superficial em encostas e seus mecanismos foram discutidos em vários trabalhos (Binley, 1989a, 1989b; Freeze, 1980; Kirkby, 1988 e Anderson e Burt, 1990). A análise do fluxo em encosta pode ser simplificada observando-se que a direção do fluxo pode ser vertical ou se dar aproximadamente no sentido da inclinação da superfície. A alteração na direção de fluxo vertical para fluxo lateral pode ocorrer :

- Em uma zona onde a descarga vertical saturada cai abaixo da velocidade líquida de percolação que vem de camada superior;

- Quando a água que percola atinge zonas intermediárias de saturação ou saturadas;

- Quando a condutividade hidráulica lateral excede em muito a vertical.

Na zona não saturada, os vetores de fluxo são normalmente próximos a vertical, assim os componentes na direção da declividade da encosta são relativamente de pequena importância nas condições gerais de precipitação. Nessa zona, caso haja variação brusca na permeabilidade haverá fluxo lateral significante.

Para se completar a análise dos processos que interferem na vazão de saída da bacia de drenagem, é necessário incluir o fluxo de base e a evapotranspiração.

O fluxo de base pode ser incluído como parte do fluxo dos cursos d'água que se mantém nos períodos secos e é alimentado pela descarga de água subterrânea que se acha armazenada nos solos e rochas. Geralmente, o fluxo de base é relativamente constante no tempo, sendo suas flutuações diretamente resultantes das variações do lençol freático, o que usualmente ocorre em escalas temporais relativas às estações do ano.

Parte da água precipitada é interceptada pela vegetação podendo ficar retida sobre a superfície das folhas. A água retida nas folhas, armazenada em depressões do solo e nas suas camadas superiores, assim como a água constituinte da rede de drenagem estão sujeitas à evapotranspiração. Novamente, pode-se determinar a quantidade de água evapotranspirada por várias abordagens e particularmente por fórmulas empíricas, como a de Thornthwaite.

Alguns modelos, como, por exemplo, o TOPMODEL descrito por Beven et al. (1994), consideram, no cálculo da evapotranspiração, que o valor real da mesma é função da evapotranspiração potencial.

2.2. Modelos

Todini (1988) classifica os modelos matemáticos de transformação chuva-vazão em quatro classes:

- Modelos puramente estocásticos

Os níveis de informação contidos nesses modelos são mínimos e os resultados obtidos em suas aplicações devem ser entendidos como valores médios. Em geral, esses modelos são preteridos em aplicações chuva-vazão, sendo somente aplicados em situações onde a variação temporal é grande, isto é, consideravelmente maior que a dinâmica real do sistema (por exemplo, intervalo de tempo mensal).

- Modelos integrais concentrados

Nesse tipo de modelos, a dinâmica do sistema é representada de forma integral relacionada à bacia ou às sub-bacias, considerando seu comportamento global. Há grande variedade de modelos dessa classe, incluindo modelos hidrológicos formulados em termos de funções impulso resposta (canais lineares, reservatórios lineares, cascata de reservatórios, etc.).

Os parâmetros de equações são geralmente estimados usando técnicas estatísticas. No entanto, devido à complexidade das relações internas, pode ser difícil fazer uma interpretação dos valores resultantes em termos das características físicas da bacia.

- Modelos integrais distribuídos

Esses modelos foram desenvolvidos tentando superar o problema da falta de significado físico dos parâmetros, como se verifica nos modelos integrais concentrados. Nessa classe de modelos matemáticos, está incluída a maioria dos modelos mais complexos (Stanford, Sacramento, etc.). Baseiam-se na idéia de representar todos os fenômenos na escala de sub-bacia usando fórmulas empíricas ou o impulso-resposta de um subsistema (infiltração, escoamento superficial, etc.) de forma integral e ajustando todos os componentes através da atribuição das mesmas condições de contorno, que são determinadas a priori.

Pode-se considerar que esses tipos de modelo não fornecem resultados realmente distribuídos, a menos que a bacia seja subdividida em sub-unidades de tamanho extremamente pequeno, o que é muito difícil devido ao grande número de parâmetros (16 a 23, no caso do modelo Sacramento) que devem ser estimados para cada uma das sub-unidades.

Dessa forma, estes modelos podem ser considerados como extensões dos modelos integrais concentrados, podendo-se chamá-los de modelos discretizados. Possibilitam que se faça uma melhor interpretação do comportamento global da bacia em termos da variabilidade espacial, mas não são adequados para cálculos quantitativos de fluxos internos.

- Modelos diferenciais distribuídos

Esses modelos procuram representar o comportamento das bacias hidrográficas em termos de equações diferenciais, discretizadas no tempo e no espaço. Para cada uma das sub-unidades são desenvolvidos os balanços de massa e de energia e a integração das partes é obtida obedecendo as condições de contorno.

Jensen e Mantoglou (1991) consideram que os melhores modelos diferenciais distribuídos, desenvolvidos até então, eram o Système Hydrologique Européen (SHE) e o Institute of Hydrology Distributed Model (IHDM). Ambos resolvem as equações diferenciais, que descrevem os fluxos de água superficiais e sub-superficiais numericamente (diferenças finitas e elementos finitos, respectivamente). A resolução dessas equações diferenciais é feita em sistema de grades (definidas diferentemente nos dois modelos) e os valores dos parâmetros são específicos para cada elemento da grade.

Um estudo comparativo do desempenho de modelos chuva-vazão foi apresentado por Franchini e Pacciani (1991), tendo sido escolhidos modelos que representavam um amplo espectro de abordagens. A bacia escolhida para análise e comparação dos vários modelos foi a do rio Sieve, que é um afluente do rio Arno (Itália). A bacia foi dividida em quatro sub-bacias para permitir uma melhor caracterização geomorfológica do terreno. As informações disponíveis para essa bacia incluíam a precipitação, a temperatura e as vazões horárias para um período de quatro meses (dezembro 1959 - março 1960).

Os modelos estudados nesse trabalho e as referências citadas por Franchini e Pacciani (1991) foram:

- STANFORD IV - Clarke (1973);
- SACRAMENTO - Burnash et al. (1973);
- TANK - Sugawara et al. (1983);
- APIC - Sittner et al. (1969);
- SSARR - Rockwood et al. (1972);
- XINANJIANG - Zhao (1977);

- ARNO Franchini e Todini (1987).

Das conclusões deste estudo, destacam-se as seguintes:

- O grau de complexidade estrutural do modelo tem um papel muito importante na fase de calibração. As dificuldades encontradas nessa fase eram intimamente relacionadas ao número de parâmetros presentes em cada um dos modelos e a menor ou maior facilidade de visualização do significado físico dos parâmetros em termos da capacidade de armazenamento, difusão e translação e das respectivas interações como um todo. Simplificadamente, modelos de concepção significantemente diferentes produzem resultados basicamente equivalentes, com tempos de calibração proporcionais à complexidade de sua estrutura.

- O excesso de esquematização, como ocorre no modelo Tank causa a perda tanto da conexão com a física do problema quanto da possibilidade de se tirar vantagem do conhecimento a priori da geomorfologia da bacia. Na concepção dos modelos STANFORD IV e SACRAMENTO, tentou-se abordar as diferentes interações das várias fases da transformação chuva-vazão no solo, resultando desvantagens em termos computacionais e num aumento desnecessário da quantidade de parâmetros, portanto com aumento de dificuldade no procedimento de calibração.

- Um modelo conceitual deve equilibrar duas demandas contrastantes: por um lado, deve apresentar uma grande simplicidade estrutural, e por outro lado, continuar a respeitar a física do problema, tornando possível o uso dos conhecimentos da natureza geomorfológica da bacia na calibração dos parâmetros.

- Das duas maneiras de se fazer a calibração dos parâmetros dos modelos, a calibração automática requer o emprego de técnicas estatísticas como mínimos quadrados, regressões lineares e não lineares, máxima verossimilhança, etc. Na calibração por tentativas sucessivas, os valores dos parâmetros são assumidos ou ajustados de modo que esses valores estejam dentro de faixas que tenham significação física. Dos dois procedimentos de calibração, o de tentativas sucessivas apresenta a vantagem de permitir a utilização de conhecimentos

anteriores sobre a natureza da bacia. Antes de se adotar os valores dos parâmetros obtidos por processos de calibração automáticos recomenda-se a verificação da adequabilidade dos mesmos.

Com o intuito de aprimorar as representações e simulações, surgiram os modelos conceituais, como por exemplo o TOPMODEL (Topography Based Hydrological Model) inicialmente desenvolvido pelo Prof. Mike Kirkby na Faculdade de Geografia da Universidade de Leeds, Inglaterra. Na conceitualização do TOPMODEL foram assumidas hipóteses básicas descritas por Beven et al. (1994) como:

- A dinâmica da zona saturada pode ser aproximada através de sucessivas representações de estados estacionários;

- O gradiente hidráulico na zona saturada pode ser aproximado pela declividade da superfície do terreno no local, tanβ (β, ângulo formado entre o plano da superfície do solo e o plano horizontal).

Essas hipóteses levam a relações simples entre o armazenamento da bacia (ou déficit de armazenamento) e o nível do lençol d'água no local (ou déficit de armazenamento devido à drenagem), no qual o principal fator é o índice topográfico, $\ln\left(\frac{a}{\tan\beta}\right)$ (a, área de drenagem por unidade de comprimento da curva de nível cortada pelo escoamento e β, a declividade do terreno no local) inicialmente proposto por Kirkby (1975). O índice de Kirkby representa a propensão de qualquer ponto da bacia de desenvolver condições de saturação.

Em sua forma original, o TOPMODEL aproveitava as vantagens das simplificações matemáticas permitidas pela adoção de uma terceira hipótese:

- A distribuição da transmissividade (na direção descendente do terreno) com a profundidade é uma função exponencial do déficit de armazenamento ou da profundidade do lençol d'água:

$$T_i = T_0 . e^{-S_i/m} \qquad (2.1)$$

onde

T_i = Transmissividade lateral no local i na profundidade z_i [L^2/T];

T_0 = Transmissividade lateral quando o solo está saturado [L^2/T];

S_i = Déficit de armazenamento local [L];

m = Parâmetro do modelo [L].

Beven (1984) apresentou dados experimentais que sugeriam que declínio exponencial na condutividade do solo (vertical) com a profundidade seria adequado para descrever as mudanças nas propriedades hidráulicas na direção vertical para uma grande variedade de solos e mostrou (Beven, 1986) que uma função exponencial equivalente para a transmissividade podia ser deduzida, assumindo-se isotropia:

$$T_i = T_0 . e^{-f \cdot z_i \cdot} \qquad (2.2)$$

onde

z_i = Profundidade do lençol d'água no local i [L];

f = Parâmetro do modelo [L^{-1}].

Na versão completa do TOPMODEL, todos mecanismos de infiltração discutidos anteriormente estão incluídos. O modelo permite elaborar cálculos considerando uma bacia ou múltiplas sub-bacias, sendo que as entradas de precipitação (valor médio) e evapotranspiração (potencial) são contabilizadas no modelo, considerando a bacia como um todo.

Em projeto apoiado por instituições norte americanas e italianas, Cabral et al. (1990) descrevem o desenvolvimento de modelo distribuído chuva-vazão com base física incorporando a topografia, como um dos principais fatores, condicionantes do processo de geração de escoamento superficial. Na conceitualização do modelo, a produção de escoamento superficial considera os mecanismos de excedente de infiltração e de excedente de saturação. A aproximação cinemática (Charbeneau, 1984) é utilizada para modelar o fluxo

sub-superficial e para predizer a infiltração e fluxo lateral da água subterrânea. Considera também a influência da declividade do terreno na vazão sub-superficial. A declividade em cada local é obtida a partir de modelo numérico do terreno para a bacia, que se apresenta na forma de valores de elevação tomados em pontos regularmente espaçados de uma grade retangular. Todo escoamento superficial gerado é conduzido pela encosta até um canal e através da rede de canais à saída da bacia, indo contribuir ao hidrograma de saída que está sendo modelado. O deslocamento do escoamento superficial considera dois parâmetros de velocidade que são espacialmente uniformes e constantes no tempo: a velocidade de deslocamento do fluxo nos terrenos inclinados e a velocidade de deslocamento na rede de canais.

Com a finalidade de contabilizar a variabilidade espacial dos parâmetros e variáveis, a bacia é dividida em elementos quadrangulares idênticos (ou *pixels*). A idéia desse modelo é que o uso de elementos quadrangulares apresenta consideráveis vantagens em relação à eficiência computacional e ao armazenamento de dados. Os elementos são tomados em correspondência aos elementos da grade quadrangular do modelo numérico do terreno, que têm tamanho comparável à resolução de mapas de solo digitalizados. A inclinação do terreno para cada elemento é obtida do modelo numérico do terreno. A rede de canais pode ser digitalizada a partir de mapas do terreno ou pode ser aproximada por uma rede estimada a partir do modelo numérico do terreno, através de algoritmos apropriados.

De modo bastante semelhante às hipóteses assumidas no TOPMODEL este modelo considera que a condutividade hidráulica varia com a profundidade e com a umidade segundo a equação:

$$K_i = K_{0s} . e^{-f.z} \left[\frac{\theta - \theta_{fc}}{\theta s - \theta_{fc}} \right]^{\varepsilon} \qquad (2.3)$$

onde

K_i = Condutividade hidráulica no local i na profundidade z_i [L/T];

K_{0s} = Condutividade hidráulica de saturação da superfície do solo [L/T];

z = Profundidade [L];

θ = Umidade [%];

θ_s = Umidade de saturação [%];

θ_{fc} = Umidade na capacidade de campo [%];

ε = Índice de distribuição de tamanho de poros.

O modelo assume que, em cada elemento computacional, que consiste de uma coluna de solo com área de seção transversal retangular, as propriedades do solo, a declividade, a taxa de precipitação e o perfil de umidade são uniformes para toda área do elemento.

Os resultados obtidos em uma aplicação desse modelo, bacia do rio Sieve, Itália, foram bastante satisfatórios, mesmo tendo ocorrido limitações com relação aos dados de precipitação (um dos medidores cobria 75 % da área da bacia).

No Brasil, foram também desenvolvidos vários modelos matemáticos para simulação de chuva-vazão.

O modelo IPH IV, descrito por Tucci et al. (1989) que, para simular o processo de transformação de precipitação em vazão, subdivide a bacia em duas partes: planos de escoamento e canais de escoamento. O componente hidrológico do modelo simula o processo de transformação de chuva em vazão e a propagação dos excedentes superficiais na superfície da bacia. A infiltração é simulada pelo método de Horton, a percolação pelo modelo de Berthelot (1970), a propagação é feita pelo método do histograma tempo-área e o escoamento de base por reservatório linear simples. O componente hidrodinâmico simula o escoamento nos canais principais tendo como contribuição lateral as vazões das sub-bacias determinadas pelo modelo hidrológico, com base na precipitação. A parcela hidrodinâmica simula o escoamento através das equações da continuidade e dinâmica, discretizadas segundo um esquema em diferenças finitas. Esse modelo permite representar escoamentos sujeitos a remansos, alterações do leito e considerar obras hidráulicas, como açudes.

Porto et al. (1993) implementaram o modelo ABC, que consiste de um conjunto de algoritmos hidrológicos clássicos, funcionando de maneira interligada. Além disso possui recursos de interface de diálogo com o usuário, gráficos e um banco de dados de relações de

intensidade-duração-freqüência de todo Brasil. O modelo é aplicado em bacias urbanas, em estudos orientados para uma visão de macro-drenagem, podendo ser utilizados em bacias pequenas e de grande porte. Nesse último caso, a bacia é subdividida em sub-bacias com a finalidade de considerar a não uniformidade na distribuição espacial da precipitação e ocupação do solo. O modelo tem sete componentes principais:

a) Bacia: nesse módulo, o usuário define as características da bacia em estudo. O modelo calcula o tempo de concentração.

b) Chuvas: módulo para a escolha da chuva de projeto. O usuário pode definir o hietograma ou o modelo calcula o mesmo a partir de uma das 114 curvas de intensidade-duração-freqüência disponíveis.

c) Infiltração: esse módulo estima a chuva excedente a partir de três processos alternativos: Horton, SCS e índice Φ.

d) Geração do Hidrograma: esse módulo gera um hidrograma de escoamento superficial direto para a bacia, por três processos alternativos de hidrograma unitário: método de Clarke, método de Sta. Bárbara e método do SCS.

e) Amortecimento de ondas de cheia em reservatórios: calcula o hidrograma efluente de um reservatório a partir de um hidrograma afluente e das características das equações das curvas cota-volume do reservatório e da curva de descarga do vertedor.

f) Amortecimento de ondas de cheia em canais: calcula o hidrograma transladado e amortecido em um trecho do canal, pelo método de Muskingum.

g) Composição de hidrogramas: permite somar hidrogramas de diferentes sub-bacias.

Machado e Righetto (1981) elaboraram um modelo do tipo distribuído para simulação do escoamento em bacias urbanas, com capacidade para representar os seguintes fenômenos: retenção superficial (assume uma função com decaimento exponencial), infiltração (algoritmo de Horton), geração e propagação de escoamento. A bacia é discretizada considerando cada

quarteirão como uma sub-bacia. A propagação do escoamento nas sub-bacias é feita pelo modelo da onda cinemática, sendo que o coeficiente de rugosidade (Manning) é obtido ponderando o coeficiente correspondente às áreas impermeáveis e o correspondente às áreas permeáveis da sub-bacia. A contribuição de cada sub-bacia é propagada pelas ruas através das sarjetas ou sarjetas e galerias. Também, para essa propagação, é utilizado o método da onda cinemática. O modelo considera a distribuição espacial da precipitação.

Os autores citam que testes realizados na bacia urbana do córrego do Gregório na cidade de São Carlos-SP, de 15,6 km^2, evidenciaram um bom desempenho do modelo, principalmente no que diz respeito à vazão pico, tempo ao pico e volume total de escoamento (os erros não ultrapassaram os 10 %). Além disso, o modelo consegue representar satisfatoriamente a forma do hidrograma. Um aspecto importante comentado nesse trabalho é a falta de dados sobre retenção superficial e infiltração, que impossibilitaram os ajustes dos respectivos algoritmos de perdas. Isso obrigou os pesquisadores a adotarem valores recomendados pela bibliografia especializada.

Maison, Pinheiro e Caussade (1997), desenvolvem modelo distribuído baseado na descrição física dos processos, incluindo a resolução de equações diferenciais e uso de sistema de informações geográficas (SIG) no gerenciamento de dados pedológicos, geográficos, agrícolas e meteorológicos. A aplicação final do modelo que está sendo desenvolvido será em estudos de qualidade da água e o SIG permitirá o uso de instrumentos, como o sensoriamento remoto, no que se refere a evolução da cobertura vegetal na bacia hidrográfica.

2.3. Escala Espacial Hidrológica

Um dos objetivos centrais da modelagem chuva-vazão é encontrar métodos para estimar seqüências de vazões, a partir de dados observados de precipitação, para bacias que não dispõem de medições de vazão. Uma abordagem para esse problema, é tentar formular um modelo a partir de considerações puramente físicas, no qual todos os parâmetros são medidos em trabalhos de campo. No entanto, isso é provavelmente um ideal inatingível, características físicas, como a condutividade hidráulica não saturada dos solos, podem variar acentuadamente em distâncias muito pequenas, mesmo onde os solos são aparentemente uniformes e, portanto, os modelos de base física devem usar elementos de área nas quais as propriedades do solo podem ser assumidas constantes.

Becker(1993) destaca que as escalas em hidrologia não são equivalentes às empregadas nas ciências atmosféricas sendo geralmente uma ordem de magnitude inferior. Na tabela 2.1 apresenta-se uma definição de escalas em hidrologia:

Tabela 2.1- Definição de escalas em hidrologia

Escala	Valores Característicos	
	Comprimento (km)	**Área (km^2)**
Macroescala	$>10^2$	$>10^4$
Faixa de Transição (meso α)	30 a 10^2	10^3 a 10^4
Mesoescala (β)	3 a 30	10 a 10^3
Faixa de Transição (meso γ)	10^{-2} a 3	10^{-4} a 10
Microescala	$<10^{-2}$	$<10^{-4}$

Fonte: Becker(1993)

Duas faixas de transição (da micro para a mesoescala e desta para a macroescala), definidas como meso α e meso γ, receberam essas designações por analogia às escalas usadas em ciências atmosféricas.

Com relação a questão das escalas hidrológicas, Becker(1993) destaca as afirmações de Dooge (1985):

> *"Modelagem em hidrologia, em grande escala geralmente significa que: ..os processos em pequena escala podem ser ignorados, ou são representados pelos seus efeitos estatísticos na descrição na escala maior... A prática mostrou que modelos baseados em equações de continuidade mecânicas são demasiadamente complexos para incluir a natureza da variabilidade espacial dos sistemas hidrológicos na modelagem para escalas grandes, tendo de ser simplificados de tal forma, que se transformam em modelos conceituais simples."*

Estas afirmações são essenciais em dois aspectos:

(1) Indicam que as equações diferenciais de continuidade hidro e termodinâmica (modelos categoria 1) são aparentemente inapropriadas para modelagem em grandes escalas para processos que ocorrem na superfície do solo, devido a significante variabilidade espacial de suas características (propriedades dos solos, vegetação, topografia, etc.) e ao fato relacionado de que as condições de homogeneidade interna e continuidade não são obedecidos (preenchidos) para esses processos em escalas grandes.

(2) Uma categoria diferente de modelos, chamada "conceptual" (categoria 2), é mencionada como sendo mais apropriada para aplicações em escalas grandes (meso e macroescala)

Existem vários modelos hidrológicos conceituais em bom estágio de desenvolvimento e aplicação classificados nessa categoria de modelos (categoria 2). Alguns deles são de base física, no sentido de que são obtidos usando simplificações das equações da continuidade mencionadas em (1) ou representam analogias a modelos físicos, por exemplo, modelos tipo

difusão, reservatórios de armazenamento, elementos de translação, cascatas destes elementos, etc.

Experiências na aplicação desses modelos indicam que são mais apropriados para áreas variando de aproximadamente 10 km^2 até 1.000 ou alguns milhares de km^2 (aproximadamente 3 X 3 até 30 X 30 km^2). Dificuldades consideráveis e perdas na qualidade da simulação ocorreram, no entanto, quando esses modelos e abordagens foram aplicados em áreas menores ou maiores que os valores apresentados.

Estas observações podem ser resumidas da seguinte maneira :

- Os modelos conceituais de base física são mais apropriados para a modelagem de processos que ocorrem na superfície de solo, na mesoescala hidrológica.

- Na macroescala, a área a ser modelada deve ser subdividida em sub-áreas de tamanhos equivalentes aos da mesoescala e portanto, modelos da categoria 2 podem ser aplicados a essas sub-áreas.

Existem dois tipos básicos de heterogeneidades que devem ser consideradas: (a) diversas classes que compõem a bacia como um todo e, (b) heterogeneidade dentro de cada uma dessas classes.

As classes são sub-áreas da bacia que apresentam tipos específicos de cobertura, usos e ocupação, como: campos agriculturados, vegetação nativa, áreas construídas, superfícies cobertas por água, etc., e com diversas características topográficas, pedológicas, geológicas entre outras. Essas classes, geralmente representam unidades hidrológicas com comportamentos “aproximadamente iguais” ou “uniformes”.

A heterogeneidade observada em uma determinada classe se refere à variabilidade das características, em pequena escala, de solo, vegetação, etc. A heterogeneidade na classe apresenta distribuição aleatória, portanto, a abordagem estatística é a mais recomendada para sua avaliação.

A primeira questão importante na avaliação da heterogeneidade da bacia, é determinar quantos tipos de classes devem ser levadas em consideração.

Sob o ponto de vista da evapotranspiração, pode-se distinguir duas classes de superfície de solo:

(a) Áreas nas quais o lençol d'água está suficientemente próximo à superfície de modo a permitir que a evaporação ocorra à velocidade potencial (áreas onde o lençol freático é pouco profundo com possibilidade de haver fluxo de água a partir do solo).

(b) Áreas onde a água subterrânea se encontra muito abaixo da superfície e a velocidade real de evapotranspiração durante os períodos de seca é somente dependente do conteúdo de umidade da zona não saturada (áreas de lençol freático profundo com capacidade de infiltração).

Uma outra classificação, que leva em consideração a evapotranspiração e a formação de escoamento superficial, e que procura ser hidrologicamente consonante na discretização das sub-áreas da bacia, é apresentada a seguir.

Evidentemente que outros tipos de classes (florestas, pastagens, diferentes tipos de culturas, etc.) podem ser levadas em consideração, se necessário. Em todo caso, a decisão de quantos tipos de classes serão considerados deve ser tomada com muito cuidado e, dependerá da natureza do problema que se deseja resolver. Na modelagem em macroescala, é, em geral, suficiente utilizar dois tipos de evapotranspiração (baseando-se na classificação apresentada na tabela 2.2), AW+AN, formando um primeiro tipo e os demais (AIMP, AF, AG e AH) compondo o segundo, embora seja mais apropriado considerar quatro tipos: AW, AIMP, (AF+AG+AH) e AN. Quando se estuda os vários processo de geração de escoamento superficial, todos os seis tipos apresentados na tabela 2.2 devem ser considerados.

Tabela 2.2- Tipos de classes com regimes hidrológicos significantemente distintos

Tipo de Classe	Símbolo	Evapotranspiração	Escoamento Superficial

			Direto
Áreas cobertas com água	AW	Potencial	Igual a precipitação (100%)
Áreas Impermeáveis (seladas, rochas)	AIMP	Somente durante precipitações (i.é, geral/ pequena)	Igual a precipitação (quase 100%)
Áreas planas com: Aqüífero profundo (Áreas de Infiltração)	AF	Depende da umidade do solo na zona das raízes	Geralmente igual a zero
Áreas planas com: Aqüífero raso (Áreas de exfiltração)	AN	Geralmente potencial	Com o aumento do armazenamento de água se iguala à precipitação em sub-áreas saturadas
Encostas com: Camadas internas profundas permeáveis (Áreas de Infiltração)	AG	Igual a AF	Igual a AF, com possível excedente de infiltração em eventos chuvosos intensos
Encostas com: Solos rasos sobre camadas menos permeáveis ou rochas	AH	Igual a AF	Igual a precipitação em sub-áreas saturadas ou o excedente de infiltração e escoamento subsuperficial

Fonte: Becker(1993)

Após se decidir quais os tipos de classe serão considerados, a divisão, também designada desagregação, da área a ser modelada em sub-áreas pode ser feita, usando mapas, fotografias aéreas, etc. Uma importante simplificação que pode ser empregada, é a união de todas as classes de um dado tipo em uma unidade arbitrária, que pode ser modelada como um componente do modelo.

Essa abordagem representa claramente um enfoque “semi-distribuído”. Negligencia também, a distribuição real das diversas classes individuais na área modelada e suas interações com as classes vizinhas de tipos diferentes (efeitos advectivos), superando, no entanto, o efeito mais crítico de se calcular médias para diferentes comportamentos

hidrológicos e diferentes tipos de classes para grandes áreas, como se faz nos modelos concentrados. A única questão que permanece é encontrar as condições nas quais essa simplificação pode ser aceita.

A heterogeneidade em uma dada classe é usualmente aleatória e ocorre em microescala. Assim, é mais apropriado avaliar esse tipo de heterogeneidade através de abordagens estatísticas, aplicando funções de distribuição para as características relevantes que se deseja estudar, como por exemplo, armazenamento de água na zona das raízes, relação de escoamento superficial, evaporação e transpiração, propriedades dos solos e das plantas, características dos solos e topográficas.

Quando se trabalha com modelos de base física, distribuídos, pode-se utilizar elementos computacionais de dimensões relativamente pequenas, quando comparados às sub-áreas definidas pelas classes. Para se determinar os valores dos parâmetros do modelo, é necessário portanto, examinar suas variabilidades espaciais no âmbito da bacia como um todo, isto é, a variabilidades entre elementos computacionais e dentro desses elementos.

Nos modelos distribuídos, a área da bacia é subdividida em elementos computacionais, geralmente quadrados. Em bacias de grandes dimensões Bathurst e O'Connell (1991) afirmam que pode ser necessário adotar, para os elementos quadrados que constituem a grade, dimensões relativamente grandes (por exemplo 1 km x 1 km ou mais) para minimizar as necessidades computacionais. Nessa situação, surge a seguinte questão: qual é o tamanho máximo do elemento da grade a partir do qual a simulação perde a sustentação física, isto é, as equações e parâmetros não representam mais as condições e processos que ocorrem nos elementos da grade ?

Beven (1989) coloca que os modelos de base física partem de um conjunto de hipóteses de como o sistema hidrológico funciona. No entanto, mesmo que as equações baseadas nessas hipóteses sejam de base física, não se garante que elas descrevam bem a realidade. A razão dessa afirmação é que, o sistema físico no qual essas equações são fundamentadas, é de pequena escala e homogêneo. Portanto, nas aplicações em grande escala, os modelos de base física, trabalham de maneira semelhante aos modelos concentrados, assumindo valores únicos para os parâmetros do modelo em cada elemento da grade e

admitindo como válida para essa escala, as equações desenvolvidas para o sistema homogêneo em pequena escala.

Uma outra variável relevante na modelagem chuva-vazão é a declividade do terreno, incorporada em alguns modelos chuva-vazão na forma do índice topográfico de Kirkby, Beven (1994), determinado a partir do modelo numérico do terreno.

No trabalho de Moore, Grayson e Ladson (1991), a topografia da bacia é considerada como fator de maior impacto nos processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos que ocorrem na mesma. A distribuição espacial dos atributos topográficos pode ser usada como uma medida indireta da variabilidade espacial desses processos. O armazenamento das informações topográficas está sendo feito em sistemas de informações geográficas, constituindo-se em fontes básicas de informação para a análise de problemas de recursos hídricos e modelagem hidrológica. Os modelos numéricos do terreno são as fontes primárias de dados usados nas análises da topografia da bacia.

Essas questões de variabilidade espacial dos parâmetros e escalas serão abordadas nos estudos de sensibilidade, conforme discutido na metodologia de trabalho.

2.4. Conclusões

A revisão bibliográfica mostrou que existe uma ampla gama de modelos chuva-vazão, desde os de concepção mais simples, do tipo concentrado e empíricos, até os mais sofisticados como por exemplo o modelo SHE. Estes últimos, são do tipo distribuído e têm como característica relevante o fato de apresentarem uma grande quantidade de parâmetros, o que faz com que a calibração dos mesmos seja bastante trabalhosa.

Na busca de melhor representar o processo de transformação chuva-vazão, os diversos modelos desenvolvidos ao longo deste século foram incorporando o conhecimento dos processos hidrológicos, em especial os mecanismos de infiltração de água no solo e com isso apresentarem base física.

Da mesma forma, os desenvolvimentos de técnicas matemáticas e computacionais e também de *hardware* permitiram o desenvolvimento de metodologias de cálculo do balanço hídrico aplicadas à áreas pequenas que assim, inauguram a possibilidade de operarem de modo distribuído.

Desta maneira, para se escolher o modelo a ser aplicado neste trabalho, foi considerado que este deveria apresentar como características principais, a incorporação da variabilidade espacial de precipitação e evapotranspiração e que seus parâmetros representem propriedades físicas da bacia.

Dentre os modelos analisados, o TOPMODEL é um dos que satisfaz estas condições, embora não seja do tipo estritamente distribuído. Todos os parâmetros deste modelo representam propriedades físicas que influenciam nos processos de infiltração, evapotranspiração e deslocamento da água nos canais.

3. MODELO DE SIMULAÇÃO CHUVA-VAZÃO

Neste capítulo é apresentada a estrutura do trabalho a ser seguida, bem como uma descrição detalhada do modelo chuva-vazão TOPMODEL, mostrando o desenvolvimento das equações que fazem parte de sua formulação e as hipóteses nas quais elas se baseiam.

3.1. Estrutura do trabalho

A esquematização das atividades abrangendo a preparação das informações que serão fornecidas ao modelo na forma de arquivos de dados e as técnicas envolvidas, é mostrada na figura 3.1.

O TOPMODEL utiliza basicamente 3 arquivos de dados: $params.dat, que contém os valores de todos os parâmetros; $subcat.dat, contendo a distribuição de índice topográfico e informações de áreas de drenagem acumuladas em função das distâncias até a seção de saída da bacia e $inputs.dat, que informa ao modelo a quantidade total de intervalos de tempo a serem processados, o valor do passo de tempo e valores de precipitação, evapotranspiração e vazão.

Os valores de precipitação foram provenientes da estação pluviográfica do Descoberto (DNAAE - 01548008) para o ano de 1988 e Brazlândia (DNAAE - 01548007) para 1995, que eram as únicas estações que dispunham de dados horários.

Na aplicação do TOPMODEL a eventos chuvosos ocorridos nesses dois anos, as informações de precipitação de partida foram valores pontuais que foram espacializados, utilizando médias mensais históricas verificadas nestas duas e em mais 3 estações localizadas no entorno da bacia estudada.

O modelo requer também valores de evapotranspiração potencial para fazer o balanço de água a cada intervalo de tempo. Como não se dispunha de dados de evaporação, usados no cálculo da evapotranspiração, para a área da bacia, foram utilizadas informações obtidas na estação da UnB localizada às margens do Lago Paranoá.

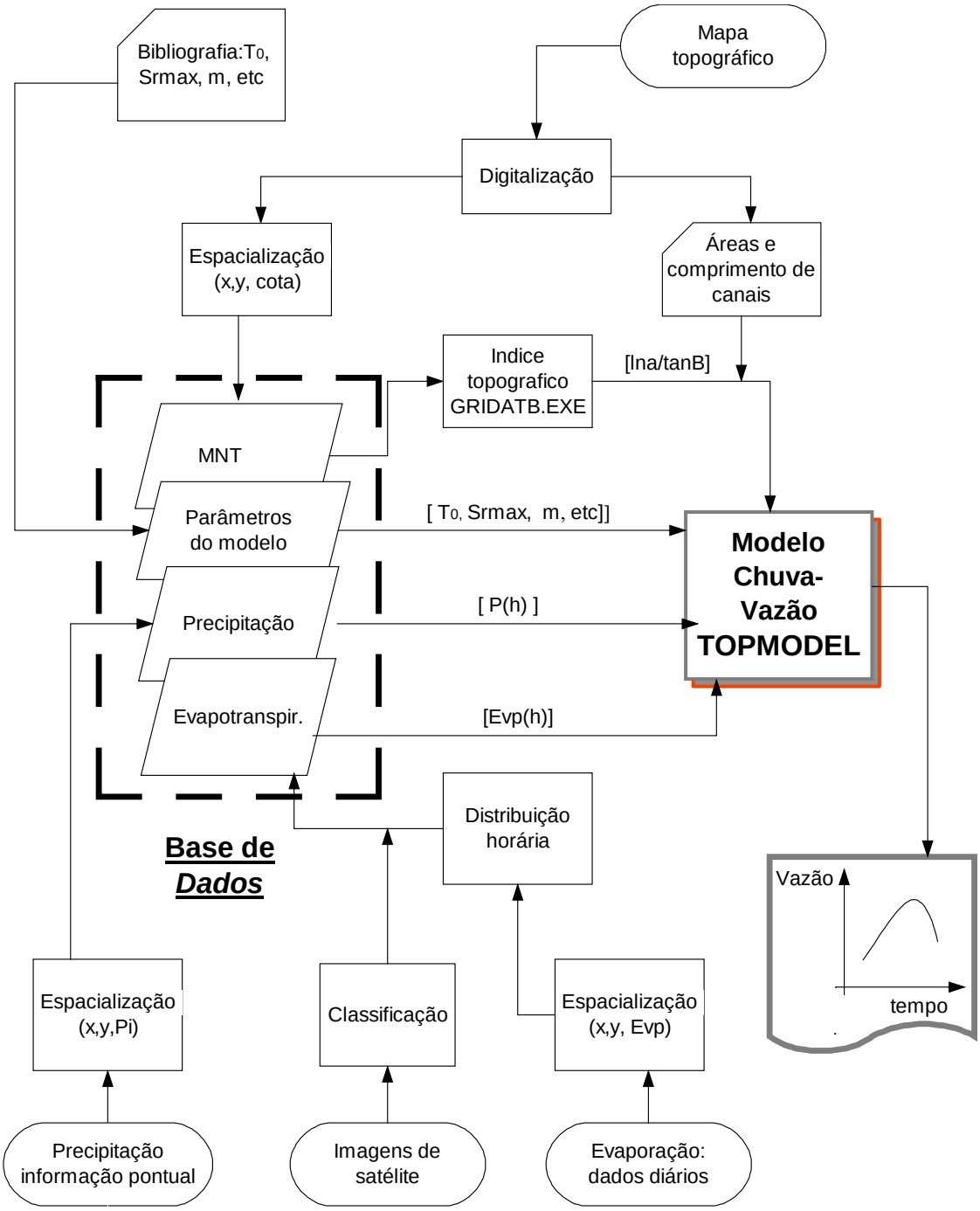


Figura 3.1 Estrutura de integração de atividades no modelo TOPMODEL

Esses dados de evaporação diária foram então convertidos à evapotranspiração potencial, considerando neste cálculo a influência dos diversos tipos de cobertura do solo da bacia, obtidos a partir da classificação de imagens do satélite Landsat TM. A seguir estes valores de evapotranspiração potencial diária foram transformados em valores horários.

Na formulação do modelo, a topografia do terreno é bastante importante, sendo fornecida ao modelo na forma de um índice topográfico, que é uma relação entre área drenada e a declividade do terreno. O cálculo da distribuição dos valores desse índice na bacia, a partir do modelo numérico do terreno, MNT, é feito por um programa, GRIDATB.EXE fornecido juntamente com o programa TOPMODEL. Foram utilizados mapas topográficos em formato digital, que espacializados por *Kriging*, produziram o MNT.

Para os valores dos parâmetros foram utilizadas informações bibliográficas sobre aplicações do TOPMODEL a outras bacias.

Todas as informações foram finalmente organizadas, formando os arquivos de dados anteriormente mencionados e que permitiram a execução do modelo TOPMODEL para o cálculo da vazão na saída da bacia a partir dos dados de precipitação e de evapotranspiração.

Na aplicação, propriamente dita do modelo, a primeira atividade foi o estudo de sensibilidade, no qual os dados necessários para a execução do programa foram os que acompanhavam a versão 94.01 que foi utilizada neste estudo.

Os resultados obtidos neste primeiro estudo, orientaram a calibração do modelo que foi aplicado a bacia do rio Descoberto localizada no Distrito Federal, empregando-se nesta etapa dados referentes a diversos eventos registrados no ano de 1988.

Finalmente o modelo já calibrado foi aplicado à mesma bacia para eventos chuvosos ocorridos entre os meses de março e abril de 1995, para os quais se dispunha das informações necessários a simulação.

3.2. Descrição do TOPMODEL

Franchini (1996) descreve o TOPMODEL como um modelo conceitual que considera área de contribuição à formação de escoamento superficial variável no qual os fatores que determinam sua formação são representados pela topografia da bacia e por uma lei exponencial que relaciona a transmissividade com a profundidade do solo que é medida a partir de sua superfície, segundo a seguinte equação:

$$T_i = T_0 . e^{-S_i/m} \qquad (3.1)$$

onde:

T_i = Transmissividade lateral [L^2/T];

T_0 = Transmissividade lateral quando o solo está saturado [L^2/T];

S_i = Déficit de armazenamento no local i [L];

m = Parâmetro do modelo [L].

O parâmetro de decaimento *m*, valor único para toda a bacia, é interpretado fisicamente como aquele que expressa a profundidade real do perfil de umidade do solo da bacia, interativamente com T_0. Um valor grande de *m* determina, efetivamente, uma maior profundidade do perfil de umidade do solo. Por outro lado, valores pequenos deste parâmetro especialmente combinados com valores altos de T_0 resultam em perfis de umidade rasos com decaimento bastante pronunciado da transmissividade.

Dois componentes podem ser identificados nos modelos chuva-vazão conceituais: o primeiro representa o balanço de água ao nível do solo (produção de escoamento superficial) e o segundo, o transporte do escoamento gerado até a saída da bacia.

No TOPMODEL tanto o fluxo superficial quanto o fluxo no solo são incorporados à rede de drenagem em cada intervalo de tempo. As velocidades de viagem na superfície da bacia e nos canais, na versão do TOPMODEL utilizada neste trabalho, são tomadas como valores constantes.

De acordo com Beven (1994), duas hipóteses básicas suportam conceitualmente o TOPMODEL:

- a dinâmica da zona saturada pode ser aproximada por representações de estados estacionários sucessivos.

- o gradiente hidráulico na zona saturada pode ser aproximado pela declividade da superfície do terreno no local.

Estas hipóteses resultam em equações simples relacionando, nos diversos pontos da bacia, o armazenamento de água e o nível do lençol freático, nas quais o principal fator é o índice topográfico de Kirkby e Beven, ln(a/tanβ), onde *a* representa a área de drenagem por unidade de comprimento da curva de nível cruzada pelo escoamento e β, o ângulo formado entre o plano da superfície do solo e o plano horizontal.

A análise apresentada a seguir se concentra principalmente na descrição dos fenômenos que representam o balanço de água ao nível do solo e que realmente caracterizam o modelo: capacidade de interceptação pela vegetação, escoamento superficial devido à saturação do solo, escoamento superficial devido à excedência de infiltração e fluxo na zona saturada.

A capacidade de interceptação é representada por um reservatório de capacidade máxima potencial S_{rmax}, resultando em precipitação líquida igual à diferença entre a precipitação e a evapotranspiração. O valor que excede a capacidade de armazenamento S_{rmax} vai atingir o solo e é aquele que é fornecido aos módulos de cálculo subsequentes.

A figura 3.2 mostra o esquema de formação de escoamento superficial, que é a base para o desenvolvimento das equações utilizadas no modelo.

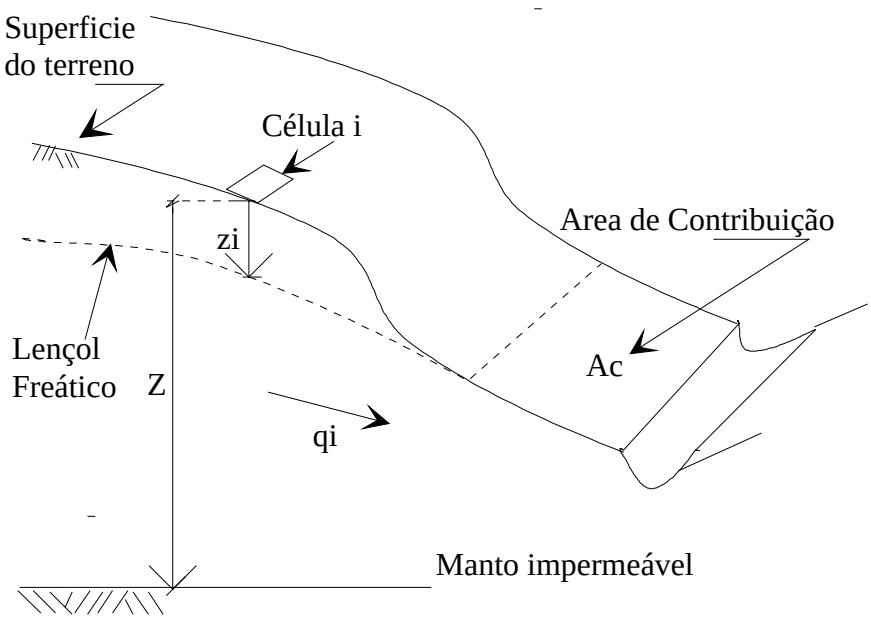


Figura 3.2- Formação de escoamento superficial - conceitualização do TOPMODEL

Fonte: Adaptado de Franchini et al (1996)

Partindo-se das hipóteses de que o gradiente hidráulico efetivo e o fluxo na zona saturada são paralelos a declividade do terreno, caracterizada por tanβ, pode-se escrever, para qualquer ponto *i* da encosta, o fluxo que ocorre na zona saturada, q_i:

$$q_i = T_i \,.\, \tan \beta_i \qquad (3.2)$$

onde

q_i = Fluxo por unidade de comprimento do contorno [L^2/T];

T_i .= Transmissividade no ponto i na profundidade z_i [L^2/T];

β_i = Declividade do terreno.

A transmissividade pode ser calculada pela equação:

$$T_i = \int_{z_i}^{Z} K_i . dz \qquad (3.3)$$

onde:

K_i = Condutividade hidráulica no local i na profundidade z_i [L/T];

Z = Profundidade do manto impermeável medida a partir da superfície do terreno[L];

z_i = Profundidade da superfície do lençol freático medida a partir da superfície do terreno[L].

O TOPMODEL assume que a condutividade hidráulica do solo segue uma lei exponencial negativa com relação a profundidade medida a partir da superfície do solo:

$$K_i = K_0 . e^{-f \cdot z_i} \tag{3.4}$$

onde

K_i = Condutividade hidráulica no local i, na profundidade z_i [L/T];

K_0. = Condutividade hidráulica de saturação da superfície do solo [L/T];

f = Parâmetro do modelo [L^{-1}].

Substituindo a expressão de K_i, equação (3.4), em (3.3) e integrando a equação resultante obtêm-se:

$$T_i = \frac{K_0}{f} . \left[e^{-f \cdot z_i} - e^{-f \cdot z} \right] = \frac{1}{f} . \left(K_i - K_Z \right) \tag{3.5}$$

onde

K_Z = Condutividade hidráulica na profundidade Z do manto impermeável [L/T].

A profundidade Z representa, para um determinado local, o fundo da zona saturada. O modelo considera que o valor da condutividade hidráulica na profundidade Z pode ser desprezado quando comparado ao valor observado na profundidade z_i, podendo-se portanto eliminar o termo referente a profundidade Z:

$$T_i = \frac{K_0}{f} . \left[e^{-f . z_i} \right] \quad (3.6)$$

Substituindo a equação 3.6 na equação do fluxo na zona saturada (equação de Darcy):

$$q_i = \frac{K_0}{f} . \tan \beta_i . e^{-f . z_i} \quad (3.7)$$

O valor $\frac{K_0}{f}$ é definido como a transmissividade do solo saturado, T_0 ($T_0 = T_{i(z=0)}$) que é constante em toda a área da bacia.

Para condições de estado estacionário a seguinte expressão também é válida:

$$q_i = a_i . R \quad (3.8)$$

onde

a_i = Área de drenagem na célula *i* por unidade de comprimento [L];

R = Velocidade de recarga do lençol freático [L/T].

Igualando as equações (3.7) e (3.8) obtém-se:

$$a_i . R = \frac{K_0}{f} . \tan \beta_i . e^{-f . z_i} = T_0 . \tan \beta_i e^{-f . z_i} . \quad (3.9)$$

Aplicando logaritmo neperiano nos dois lados da equação e rearranjando os termos obtém-se a expressão que permite calcular a profundidade do lençol freático em qualquer ponto da bacia:

$$z_i = -\frac{1}{f} . \ln \left(\frac{a_i}{T_0 . \ln \beta_i} . R \right) \quad (3.10)$$

Na equação acima, para se calcular a profundidade z_i, é necessário conhecer entre outros valores, o da recarga do lençol freático, *R*, que pode ser isolado na equação 3.10:

$$-\ln R = z_i \,.\, f + \ln\left(\frac{a_i}{T_0 \,.\, \tan\beta_i}\right) \tag{3.11}$$

O TOPMODEL utiliza nos cálculos o valor de profundidade média calculada da seguinte forma:

$$z_{med} = \frac{1}{A}\int_A z_i . dA \tag{3.12}$$

onde

A = Área da bacia [L^2];

z_{med} = Profundidade média [L].

Substituindo em (3.12) o valor de z_i da equação (3.10):

$$z_{med} = \frac{1}{f \,.\, A} \,.\, \int_A \left(-\ln\left(\frac{a_i}{T_0 . \tan\beta_i}\right) - \ln R\right) . \, dA \tag{3.13}$$

ou

$$z_{med} = \frac{1}{f \,.\, A} \,.\, \int_A -\ln\left(\frac{a_i}{T_0 \,.\, \tan\beta_i}\right) dA - \left(\frac{\ln R}{f}\right) \tag{3.14}$$

Substituindo em (3.14) o valor de $-\ln R$ da equação (3.11):

$$z_{med} \,.\, f = -\frac{1}{A} \,.\, \int_A -\ln\left(\frac{a_i}{T_0 \,.\, \tan\beta_i}\right) dA - f\ z_i + \ln\left(\frac{a_i}{\tan\beta_i}\right) - \ln\left(T_0\right) \tag{3.15}$$

Definindo uma variável auxiliar λ como:

$$\lambda = \frac{1}{A}\int_A -\ln\left(\frac{a_i}{T_0 . \tan\beta_i}\right)dA - \ln(T_0) \tag{3.16}$$

e

$$\lambda^* = \frac{1}{A}\int_A -\ln\left(\frac{a_i}{T_0 . \tan\beta_i}\right)dA \tag{3.17}$$

Introduzindo a variável auxiliar λ, definida em 3.16 na equação 3.15 e rearranjando os termos obtém-se:

$$z_i = z_{med} - \frac{1}{f}.\left[\ln\left(\frac{a_i}{\tan\beta_i}\right) - \lambda^*\right] \tag{3.18}$$

A equação (3.18) permite calcular a profundidade do lençol freático usando o parâmetro f, o índice topográfico $\ln\left(\frac{a_i}{\tan\beta_i}\right)$ e a profundidade média. Assim, se a profundidade z_i num ponto *i* da bacia for menor ou igual a zero, o lençol freático está no mínimo nivelado com a superfície do solo e portanto neste ponto a condição de saturação foi atingida. Todos os pontos que satisfazem a condição $z_i \leq 0$ produzem uma fração da bacia que se encontra saturada e, portanto, qualquer valor de precipitação sobre esta área gera diretamente escoamento superficial. O modelo atualiza, para cada intervalo de tempo, o valor da profundidade média que é valor de partida no calculo do próximo intervalo de tempo.

Para que o cálculo de produção de escoamento superficial pelo mecanismo de excedência de infiltração seja feito, é necessário que o valor da condutividade hidráulica de saturação ao nível do solo apresente valores bastante pequenos quando comparados aos da precipitação.

A conceitulização do fluxo de água no solo é estruturada na forma de armazenamentos, estando incluídos os conceitos de ponto de murcha e de capacidade de campo segundo o esquema, mostrado na figura 3.3.

A introdução dos pontos de murcha e capacidade de campo na estruturação do TOPMODEL surgiu da observação de que nas primeiras versões desse modelo a água infiltrada era imediatamente transferida à zona saturada gerando estimativas exageradas da vazão, atribuindo-se a causa a uma subestimativa do valor das perdas resultantes da evapotranspiração. Na verdade o modelo carecia de um retardo no fluxo vertical na zona não saturada até a zona saturada. Foi introduzido o conceito de capacidade de campo significando o valor de umidade que deve ser atingido antes que ocorra fluxo para a zona saturada. Desta maneira há uma maior retenção de água infiltrada, antes que ela possa entrar na zona saturada, permanecendo disponível ao processo de evapotranspiração, reduzindo os valores estimados de vazão, em especial quando ocorrem precipitações intensas logo após períodos de seca.

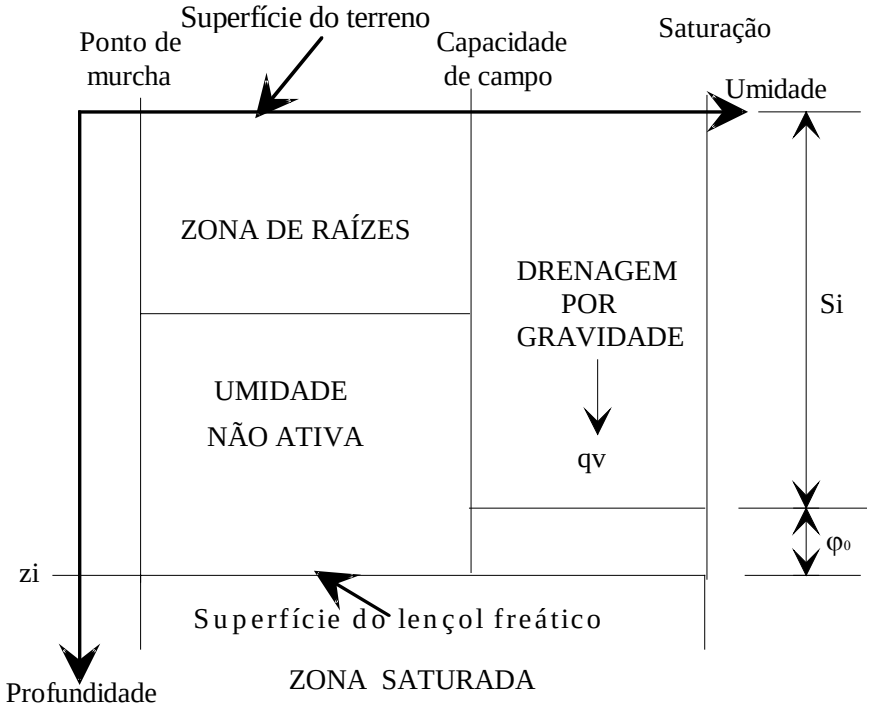


Figura 3.3 - Esquema simplificado dos armazenamentos considerados no TOPMODEL

Fonte: Adaptado de Beven et al (1994)

Nesta figura 3.3 a zona das raízes tem a função de armazenamento de interceptação e evaporação. O conceito de zona de umidade não ativa está intimamente ligado ao de capacidade de campo. O fluxo vertical da zona das raízes até o lençol freático deve ocorrer na zona de drenagem por gravidade uma vez satisfeita a condição de capacidade de campo.

Pode-se fazer uma relação bastante simples entre o déficit de armazenamento, S_i, causado pelo fluxo e a profundidade da zona saturada, z_i, assumindo que o processo de drenagem rápida afeta somente os poros maiores e que a diferença entre a umidade de saturação do solo e a capacidade de campo não muda com a profundidade. Estas considerações implicam na seguinte relação:

$$S_i = \left(\theta_s - .\theta_{fc}\right).\left(z_i - \varphi_0\right) = \Delta\theta_1\left(z_i - \varphi_0\right) \tag{3.19}$$

onde

S_i = Déficit de armazenamento no local i [L];

θ_s = Umidade de saturação, porcentagem;

θ_{fc} = Umidade na capacidade de campo, porcentagem;

φ_0 = Profundidade da franja capilar [L];

$\Delta\theta_1$ = Porosidade efetiva de drenagem, porcentagem.

O modelo assume que o fluxo da zona não saturada se dá, essencialmente na direção vertical, resultando numa equação que depende do armazenamento da zona de drenagem por gravidade e o déficit local de armazenamento

$$q_v = \left(\frac{S_{uz}}{S_i\, t_d}\right) \tag{3.20}$$

onde

q_v = Fluxo vertical [L/T];

S_{uz} = Armazenamento na zona não saturada [L]

t_d = Tempo de permanência na zona não saturada por unidade de déficit [T/L]

A evapotranspiração real é calculada no modelo como uma função da evapotranspiração potencial e da quantidade de água armazenada na zona das raízes. O modelo considera que a evaporação se dá com valor igual à evaporação potencial para áreas

onde está ocorrendo drenagem gravitacional e nos locais onde o a superfície do solo atingiu a saturação. Quando cessa a drenagem gravitacional, a evapotranspiração continua sendo calculada por:

$$E_a = E_p . \left(1 - \frac{S_{rz}}{S_{rmax}} \right) \tag{3.21}$$

onde

E_a = Evapotranspiração real [L/T];

E_p = Evapotranspiração potencial [L/T];

S_{rz} = Déficit na zona das raízes [L];

S_{rmax} = Máximo déficit possível [L].

Para se fazer o balanço de água para toda a bacia é necessário calcular a recarga total do lençol freático, Q_v, calculada pela seguinte equação:

$$Q_v = \sum_{i=1}^{n} q_v A_i \tag{3.22}$$

onde

Q_v = Recarga total do lençol freático [L/T];

q_v = Fluxo vertical [L/T];

A_i = Fração de área correspondente à classe i de índice topográfico;

n = Número de classes de índice topográfico.

O fluxo de saída da zona saturada é representado no modelo pelo fluxo de base, Q_b, que pode ser calculado como a somatória dos fluxos que ocorrem ao longo dos m trechos de canal com comprimento l expressa utilizando a equação (3.2):

$$Q_b = \sum_{j=1}^{ch} l_j . \left(T_0 . \tan \beta \right) . e^{-f . z_i} \tag{3.23}$$

onde

Q_b = Vazão de base [L/T];

l_j = Comprimento de um trecho de canal [L];

ch = Quantidade de trechos de canal, adimensional.

Substituindo o valor de z_i pela expressão de z_{med} e rearranjando chega-se a:

$$Q_b = AT_0 . e^{-\lambda^*} . e^{-f \cdot z_{med}} = Q_0 . e^{-f \cdot z_{med}} \quad (3.24)$$

sendo

$$Q_0 = AT_0 . e^{-\lambda^*} \quad (3.25)$$

As equações apresentadas até aqui, formam a estrutura conceitual do modelo TOPMODEL. No capítulo seguinte será apresentada a metodologia utilizada na quantificação de variáveis e parâmetros que são utilizados na preparação dos arquivos de dados de entrada do modelo.

A versão do modelo TOPMODEL utilizada neste estudo foi a 94.01, incluindo no pacote de demonstração do programa, o conjunto de arquivos de dados necessários à sua operação, os códigos fonte dos programas principais MOD9401.FOR e GRIDATB.FOR e os programas executáveis já compilados em Fortran77.

O código fonte do programa MOD9401.FOR, que contém o modelo foi traduzido para linguagem C, sendo adicionados alguns módulos para facilitar a execução do programa, especialmente durante a calibração do modelo. Como no código fonte do modelo foi omitida a parte contendo o desenvolvimento de gráficos, foi escrito um programa à parte para visualização dos resultados dos testes. Estes programas, comentados, acham-se no anexo I.

4. TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS ESPACIAIS

Previamente ao tratamento, propriamente dito, das variáveis e parâmetros espaciais, é apresentada uma breve descrição da área estudada. Em seguida, são apresentados os tratamentos dados a cada uma das variáveis, especificando as fontes de informações disponíveis, as técnicas empregadas, entre outros aspectos.

4.1. Descrição da área de estudo

A área de estudo, onde se aplicou TOPMODEL, compreende a região da bacia do Rio Descoberto, à montante do Lago do mesmo nome, tendo a maioria de sua superfície no Distrito Federal e uma pequena parte no Estado de Goiás. Localiza-se, conforme se mostra na figura 4.1, entre os paralelos de 15^o 36’ 15” e 15^o 44’ 30” de latitude Sul e entre os meridianos de 48^o 07’ 30” e 48^o 16’ 30” de longitude Oeste.

A área total de drenagem da bacia do Rio Descoberto é de aproximadamente 114 km^2 Dispõe em sua seção de saída de uma estação fluviográfica chamada de Descoberto Montante, cadastrada no DNAAE com o código 60435000 que é constituída por um linígrafo e régua linimétrica, figura 4.2, da qual os dados de vazão empregados neste estudo foram obtidos.

Na área da bacia existe uma estação pluviográfica chamada de Brazlândia (código DNAAE 01548007) que forneceu dados de precipitação para o ano de 1995. Localizadas fora da área de drenagem, mas próximas à mesma, existem mais 4 estações, das quais a estação Descoberto Jusante (código DNAAE 01548008) também dispõe de registrador e forneceu os dados de precipitação referentes ao ano de 1988. Para as demais estações, Taguatinga, Fazenda Santa Elisa e Jatobazinho, códigos DNAAE 01548006, 01548013 e 01548009 respectivamente, dispunha-se de totais diários de precipitação para esses dois anos.

Nenhuma informação a respeito de evaporação para esta bacia estava disponível.

Figura 4.2- Estação Descoberto Montante

4.2. Precipitação

O Distrito Federal é monitorado por diversas estações pluviométricas e climatológicas. A figura 4.3 mostra as estações de monitoramento existentes na área da bacia estudada e entorno. Dessas estações, apenas duas dispõem de registros gráficos horários e, para as demais, os valores disponíveis eram valores totais diários. Os dados horários de precipitação foram obtidos a partir dos registros dessas duas estações pluviográficas e que fazem parte da Rede Hidrometeorológica do Distrito Federal da Companhia de Águas e Esgoto do Distrito Federal, CAESB, cadastradas no DNAAE como:

Descoberto - 01548008 - Dados referentes a fevereiro e março de 1988;
Braslândia - 01548007 - Dados referentes a março e abril de 1995.

Em síntese, dispunha-se de dados de precipitação horários para uma única estação, para cada um dos anos estudados e, totais diários para as demais estações localizadas no entorno da área de interesse.

Embora o modelo TOPMODEL seja do tipo distribuído, utiliza um único valor de precipitação, sendo que os dados disponíveis mostraram uma distribuição espacial não uniforme para esta variável. Portanto, para se determinar esta distribuição da precipitação na bacia, foi feita a espacialização de valores médios mensais utilizando dados de cinco estações localizadas na área e no entorno da mesma. Neste procedimento, considerou-se também, que o hietograma da estação para a qual se dispunha de registro seja representativo da distribuição temporal em toda a bacia.

Os valores empregados neste procedimento foram os históricos mensais obtidos no banco de dados do Microsistema de Dados Hidrometeorológicos - MSDHD do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAAE.

Os valores históricos de precipitação, apresentados na tabela 4.1., para as estações de Taguatinga, Braslândia, Descoberto e Jatobazinho foram calculados fazendo a média aritmética dos totais de cada mês, de 1980 até 1997 e, para o posto da Fazenda Sta. Elisa a média histórica foi calculada a partir de 1989.

Figura 4.3- Estações hidrometeorológicas existentes na área de estudo

Tabela 4.1- Médias históricas de precipitações nas estações da região da bacia do rio Descoberto

	Precipitação Média Mensal (mm)				
	ESTAÇÃO				
Mês	**Taguatinga [01548006]**	**Braslândia [01548007]**	**Descoberto [01548008]**	**Jatobazinho [01548009]**	**Faz.Sta.Elisa [01548013]**
Janeiro	239,6	241,7	207,6	251,2	258,2
Fevereiro	219,7	199,1	193,0	187,1	167,7
Março	212,3	244,0	209,2	234,0	220,1
Abril	128,2	131,9	131,2	151,0	108,3
Maio	32,8	36,4	24,9	31,9	34,1
Junho	10,4	8,4	13,1	8,7	6,6
Julho	9,8	8,0	10,7	8,4	10,6
Agosto	17,7	23,2	16,7	11,8	14,4
Setembro	47,4	51,2	50,1	45,2	56,6
Outubro	142,2	147,8	125,7	165,8	89,6
Novembro	247,2	225,6	215,1	201,4	215,4
Dezembro	272,8	311,4	256,2	280,9	309,4

Fonte: DNAAE-MSDHD

A precipitação é uma variável continua espacialmente e portanto apresenta uma determinada estrutura de correlação espacial e por este motivo escolheu-se o método de *Kriging* para espacializar os dados.

Após a espacialização, foi gerado um mapa contendo as isoietas adimensionais, os quais foram obtidos dividindo o valor da precipitação em cada ponto pela precipitação do posto com registro horário. Este processo permite estimar o valor da precipitação para qualquer local da bacia, conhecendo-se a intensidade de precipitação horária numa dessas duas estações, fazendo a leitura do valor da isolinha que passa nesse local no gráfico relativo ao mês e ao ano da medida, multiplicando-o pelo valor na estação com registro.

As figuras 4.4 e 4.5, a seguir mostram os resultados deste processo para os meses de fevereiro e março de 1988 e março e abril de 1995, respectivamente. Nestas figuras, as coordenadas UTM do retângulo que circunscreve a área da bacia, X entre 790343 m e 808500 m e Y de 8257390 m a 8273250 m são as mesmas em todos os cálculos e procedimentos onde

estas informações são requeridas. Esta padronização, facilita o intercâmbio de dados e arquivos entre os aplicativos utilizados no processamento das informações.

Até este ponto, conseguiu-se, partindo das médias históricas de precipitação verificadas em 5 estações situadas na bacia e no entorno da área em estudo, espacializar valores adimensionais das intensidades de precipitação horárias obtidas nas estações registradoras.

Observa-se também, nos gráficos mostrados nessas figuras anteriores, que é possível identificar áreas que apresentam precipitação homogênea, sendo portanto possível compor um fator ponderado, que resulta do produto de uma porcentagem da área total pelo seu respectivo valor de espacialização, representado pelas isolinhas das figuras. Portanto, é necessário calcular a distribuição de áreas em função das classes de intensidades de precipitação, o que foi feito com auxílio do IDRISI, para onde foram exportados os dados obtidos na espacialização.

Para determinar as frações de área com precipitação homogênea, é feito um histograma numérico da distribuição do atributo chuva, usando esse *software*. Este procedimento foi repetido para todos os meses, para os quais se tinha dados, obtendo-se desta forma todos os fatores desejados. A tabela 4.2 a seguir, mostra os valores dos fatores ponderados para toda a bacia.

Tabela 4.2- Fatores ponderados para cálculo da precipitação média na bacia do rio Descoberto

Mês	Ano	Estação de Referência	Fator de correção global
Fevereiro	1988	Descoberto	0,9869
Março	1988	Descoberto	1,1280
Março	1995	Braslândia	0,9728
Abril	1995	Braslândia	0,9810

Finalmente, estes fatores foram usados na correção dos valores horários de precipitação das estações de Descoberto e Braslândia.

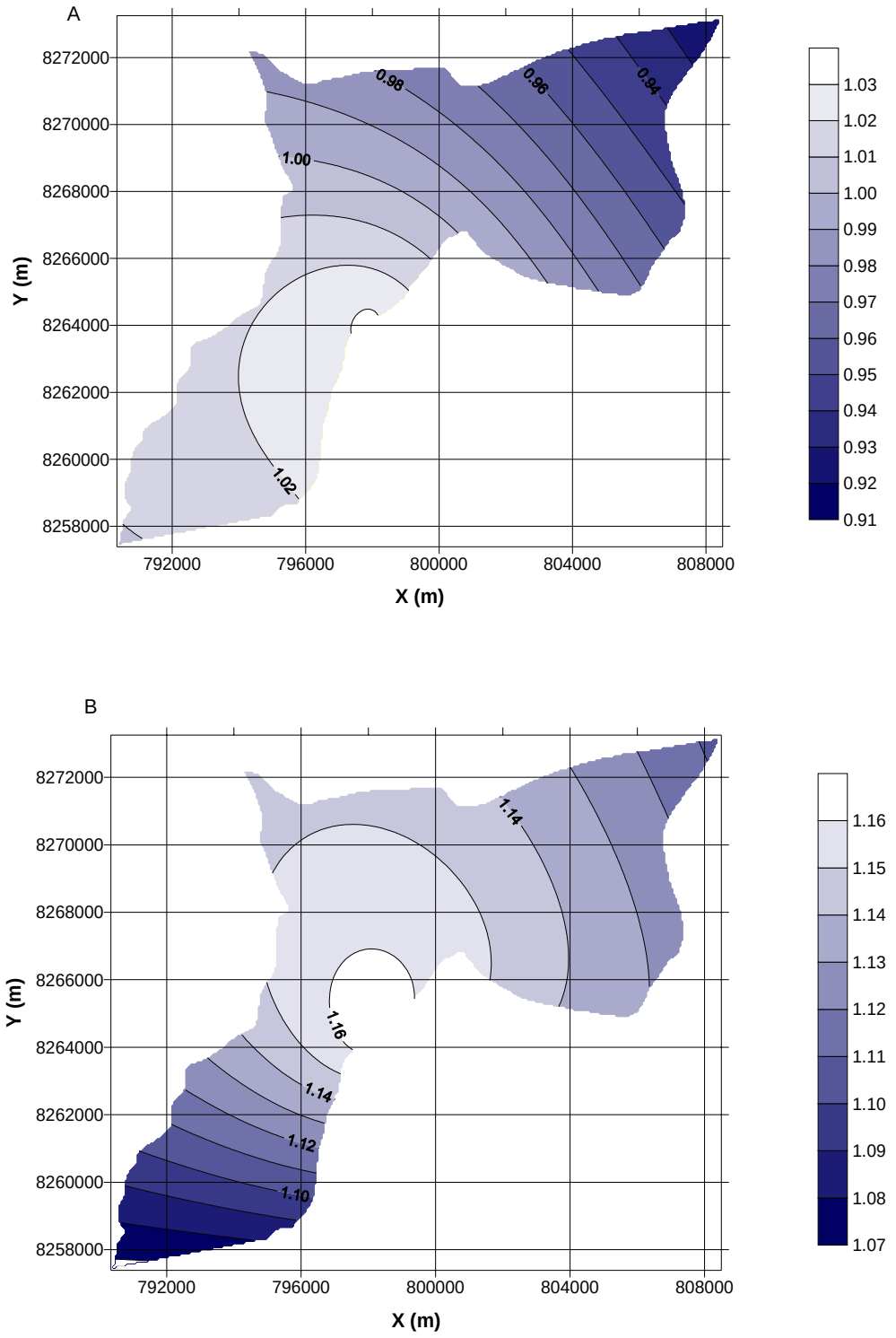


Figura 4.4- Espacialização da precipitação, dados de 1988: A - Fevereiro, B- Março. (Valores adimensionais)

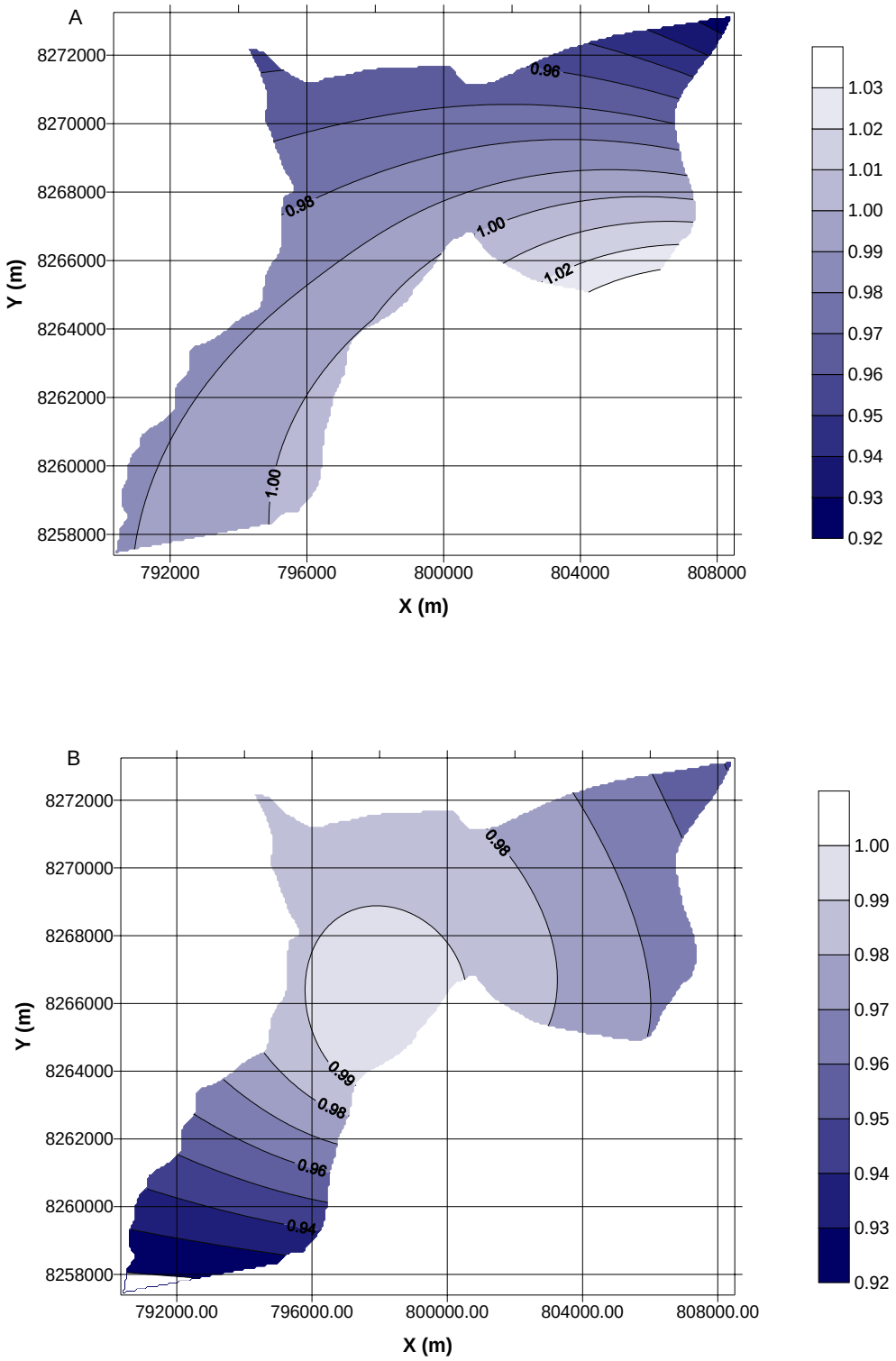


Figura 4.5- Espacialização da precipitação, dados de 1995. A -Março: B - Abril. (Valores adimensionais)

Assim, com relação à precipitação, o TOPMODEL processa em cada intervalo de tempo um único valor, logo para esta variável, o modelo não está seguindo a estrutura distribuída, sendo portanto uma grande simplificação, ou seja, embora se tenha procurado incorporar a variabilidade espacial através dos valores históricos médios dests variável para o mês que se está estudando, persiste a consideração de uniformidade espacial para a precipitação.

4.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração real, que é o valor utilizado pelo modelo no balanço de água, é calculada em cada intervalo de tempo, através da equação 3.21, sendo função do máximo déficit possível na zona das raízes, S_{rmax}, do déficit na zona das raízes no instante de tempo que está sendo calculado, S_{rz} e da evapotranspiração potencial, E_p. O valor do déficit na zona das raízes é um valor atualizado pelo modelo a cada intervalo de tempo; o valor do máximo déficit possível é um valor constante para toda a bacia sendo passado ao modelo na forma de parâmetro e, similarmente à precipitação, o modelo requer um único valor de evapotranspiração potencial à cada intervalo de tempo.

Embora na região de abrangência da bacia do Rio Descoberto exista uma estação climatológica, não se dispunha de dados de evapotranspiração para as épocas estudadas e por esta razão foram usados dados de evaporação medidos na estação da UnB.

Assim os valores de evapotranspiração potencial, foram obtidos multiplicando o valor da evaporação por um fator que depende do tipo de cobertura do solo, representando este fator, uma porcentagem da evaporação que ocorre numa superfície livre de água medida em tanque classe A, conforme procedimento adotado pelo Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo (1984), Espanha.

A determinação do tipo de cobertura foi feita, a partir da classificação de imagens referentes às bandas 3, 4 e 5 do satélite Landsat TM, para 1988 e 1995, anos para os quais se dispunha de dados de chuva e vazão para a bacia em estudo. Antes de fazer a classificação, as

imagens foram interpretadas visualmente para se identificar as classes de cobertura de interesse a este trabalho, presentes nas cenas. Foram consideradas cinco classes: campo limpo, ocupação urbana, solo exposto, vegetação e corpos de água.

Os valores dos fatores de correção da evaporação medida em tanque classe A para cada um dos tipos de cobertura, foram obtidos na literatura especializada, sendo mostrados na tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3- Classes de cobertura do solo e respectivas porcentagens sobre a evaporação medida em tanque classe A

Identificação da Classe	Tipo de Cobertura do Solo	Porcentagem da Evaporação de Tanque Classe A
1	Campo limpo	0,80
2	Ocupação urbana	0,50
3	Solo exposto	0,75
4	Vegetação	0,80
5	Corpos de água	1,00

Neste trabalho, o processamento das imagens utilizou o *software* IDRISI e o método de classificação usado foi o da máxima verossimilhança, aplicada às bandas 3, 4 e 5 do satélite Landsat TM.

As figura 4.6 e 4.7 mostram o resultado do procedimento de classificação supervisionada, usando o módulo MAXLIKE do IDRISI, considerando as 5 classes de cobertura apresentadas na tabela 4.3.

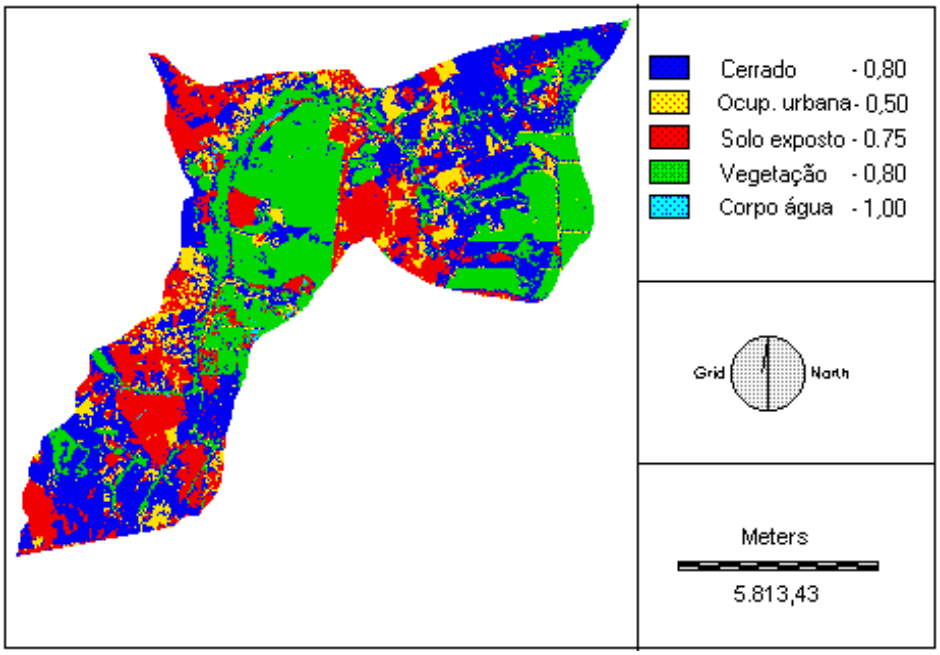


Figura 4.6- Classificação da imagem Landsat TM da Bacia do Descoberto, 1988

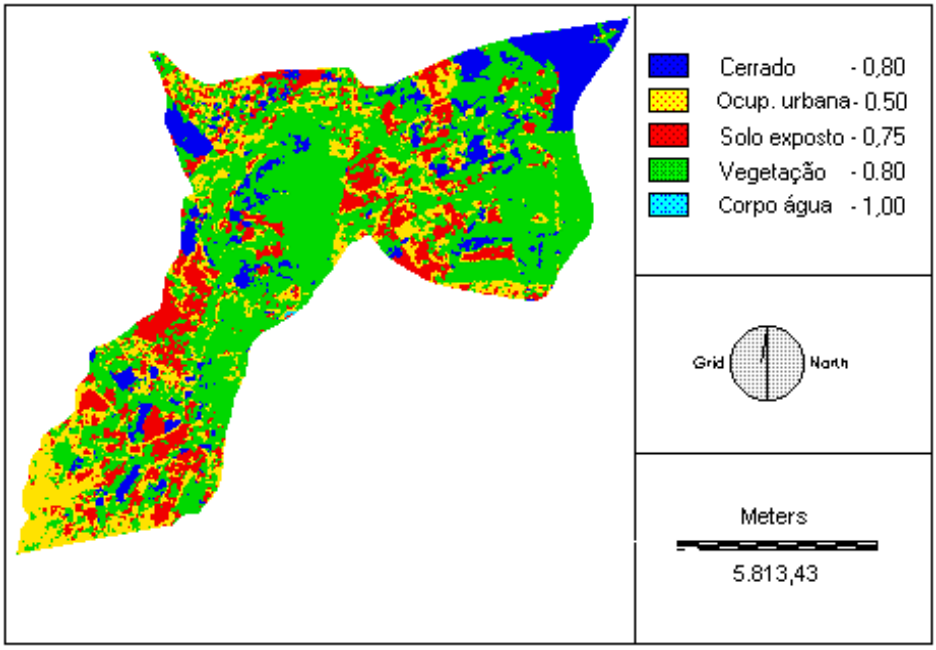


Figura 4.7- Classificação da imagem Landsat TM da Bacia do Descoberto, 1995

As áreas totais de cada um dos tipos de cobertura foram calculadas, fazendo os histogramas das imagens classificadas, disponível no próprio IDRISI. Dispondo-se da área de cada uma das classes e do valor percentual da evaporação assumido para cada uma delas, foi feito o seguinte cálculo:

Classe	% área bacia	Fator Ponderado de Evapotranspiração
1	a_1	f_1
2	a_2	f_2
3	a_3	f_3
4	a_4	f_4
..	..	..
n	a_n	f_n

$$E_p = E_{TqclasseA} . \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i . f_i}{100} \qquad (4.1)$$

Onde

E_P = Evapotranspiração potencial [L/T];

$E_{TqclasseA}$ = Valor medido de evaporação em tanque classe A [L/T];

a_i = Porcentagem da área da bacia ocupada pela classe de cobertura de solo i ;

f_i = Porcentagem da evaporação do Tanque classe A para classe i ;

n = Número de classes de cobertura de solo.

Nas tabela 4.4 são mostrados os resultados obtidos na determinação deste fator de ponderação para 1988 e 1995.

Tabela 4.4- Determinação do fator de correção da evaporação tanque classe A, segundo as classes de cobertura da área da bacia do rio Descoberto

Cobertura do solo	Fator fi	ai(%) 1988	ai(%) 1995	Variação de ai	(ai*fi)/100 1988	(ai*fi)/100 1995
1-Cerrado	0,80	28,95	11,99	-16,97	0,2316	0,0959
2-Ocupação urbana	0,50	9,40	18,46	9,06	0,0470	0,0923
3-Solo exposto	0,75	25,01	17,19	-7,82	0,1876	0,1289
4-Vegetação	0,80	36,47	52,32	15,85	0,2918	0,4186
5-Corpos de água	1,00	0,16	0,03	-0,13	0,0016	0,0003
			FATOR		**0,7596**	**0,7361**

Deste procedimento resultaram dois fatores (para 1998 e 1995), calculados por $\frac{\sum_{i=1}^{n} a_i . f_i}{100}$, que permitem a transformação dos valores de evaporação em evapotranspiração potencial. Como os valores resultantes são totais diários e como o TOPMODEL requer valores horários, foi necessário distribuir estes valores ao longo do dia. Foi considerado que a evaporação diária ocorre durante 11 horas, iniciando às 8:00 h da manhã e terminando as 19:00 h, isto é, fora deste período, o valor de evapotranspiração fornecido ao modelo é zero. A forma da distribuição horária, mostrada na figura 4.8, foi a mesma empregada no trabalho de Beven (1994).

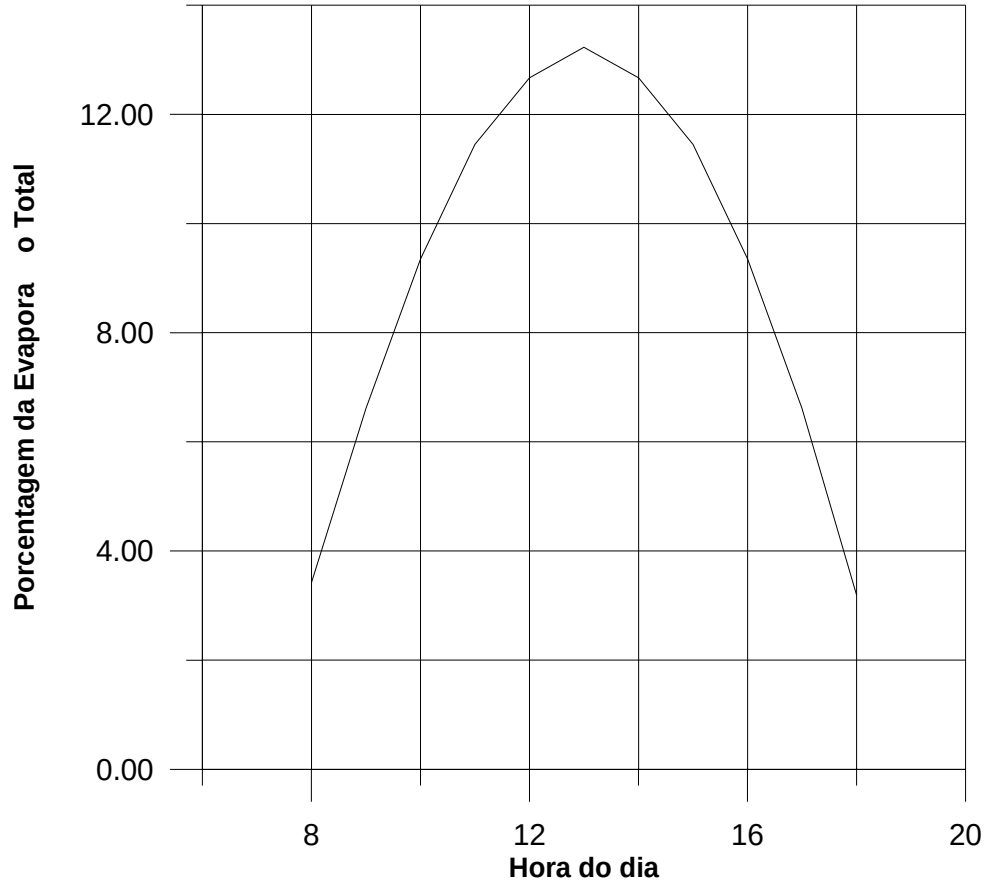


Figura 4.8- Distribuição de evapotranspiração potencial ao longo do dia

Finalmente, os valores diários de evapotranspiração, já corrigidos pelos fatores que consideraram o tipo de cobertura do solo, foram multiplicados valor pelos porcentuais horários mostrados na figura 4.8, obtendo-se assim o valores da evapotranspiração potencial que foram utilizadas pelo TOPMODEL.

4.4. Índice topográfico

Na metodologia de cálculo do TOPMODEL, o balanço de água em todas as zonas é feito num *loop* computacional externo, que tem como passo de avanço o intervalo de tempo, uma hora. Para cada intervalo de tempo o modelo lê nos arquivos de dados os valores de precipitação e de evapotranspiração e num segundo *loop* interno ao primeiro, referente às classes de áreas com declividades iguais, calcula o balanço de água verificando se ocorreu a saturação da superfície e, portanto, se houve a geração de escoamento superficial. Neste

momento, além das informações sobre precipitação e evapotranspiração no intervalo de tempo, o modelo requer as informações sobre a distribuição das frações da área total da bacia e seus respectivos valores de declividade expressos como índice topográfico de Kirkby e Beven.

O índice topográfico é a principal característica do TOPMODEL, que sendo um índice dinâmico de escoamento, possibilita se fazer uma previsão da formação de superfícies saturadas a partir das quais correrá o escoamento superficial. É calculado como a relação entre a área drenada num determinado local i da bacia e a declividade do terreno.

Os valores do índice topográfico em função das respectivas porcentagens da área total da bacia são calculados, a partir de dados de elevação de grade regular no formato *raster*, por um programa chamado GRIDATB, incluído na versão 94.01 do TOPMODEL. As informações geradas neste programa são usadas na elaboração de um dos arquivos de dados de entrada do TOPMODEL, denominado $subcat.dat.

Este programa, utiliza os dados do modelo numérico do terreno, MNT, determinando para todas as células o ângulo de inclinação da superfície do terreno com o plano horizontal, β, que reflete, conforme discutido por Quinn et al. (1991), a tendência da água se acumular em um ponto qualquer da bacia, e a tendência que as forças gravitacionais possuem de mover a água ao longo das encostas. A seguir, este programa calcula o índice topográfico definido como, $\ln\left(\frac{a}{\tan\beta}\right)$ onde a representa o lado da célula da grade do MNT.

As informações básicas para se fazer o MNT foram retiradas das cartas topográficas do sistema cartográfico do DF, no formato digital, que abrangem área da bacia do Rio Descoberto estudada, na escala de 1:10.000.

O modelo numérico do terreno, MNT, é estruturado através de grade regular formada por células quadradas, que são definidas por colunas e linhas, coordenadas X e Y respectivamente e um atributo, Z, a elevação correspondente. Na figura 4.9 é mostrado o modelo numérico do terreno para a bacia do Rio Descoberto.

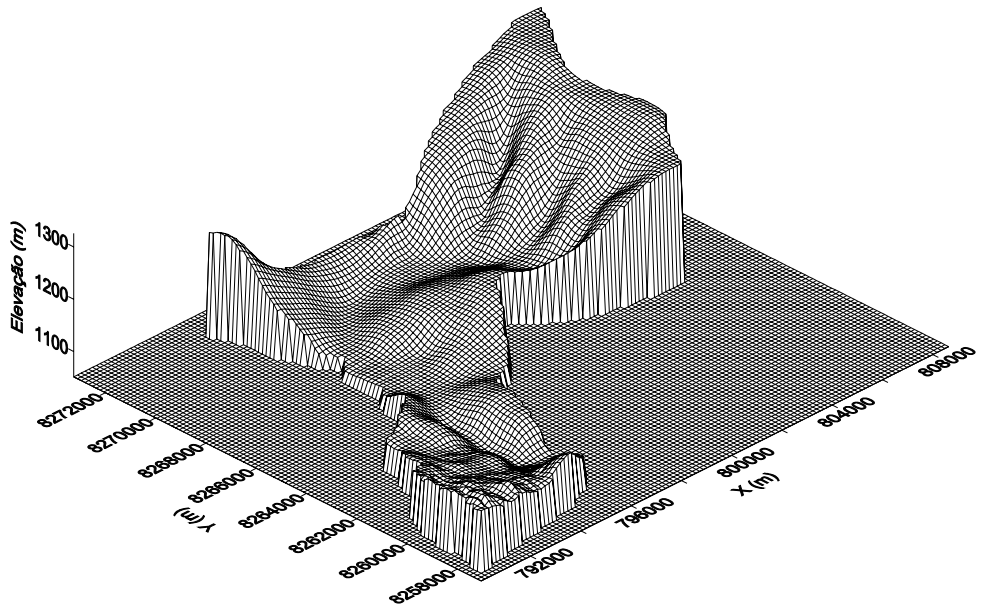


Figura 4.9- Modelo numérico do terreno - bacia do Rio Descoberto

Foram gerados sete modelos numéricos do terreno com grades formadas por células quadrados de 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210m de lado. Os resultados da distribuição do índice topográfico com a respectiva porcentagem de área são apresentados na tabela 4.5 a seguir.

Fisicamente, o índice topográfico traduz, para um determinado local da bacia, o maior ou menor potencial de se atingir a saturação do solo impedindo, portanto, a infiltração de água. No método de cálculo do TOPMODEL, o valor numérico deste índice é o logaritimo neperiano da relação entre uma área de drenagem, que é a área da célula do modelo numérico do terreno, e a declividade do terreno.

Os maiores valores do índice topográfico observados na tabela 4.5 correspondem aos locais da bacia onde o fluxo de água que infiltra é maior que o máximo escoamento superficial possível de ocorrer por ação do gradiente gravitacional, tanβ. Estes são os locais que potencialmente podem atingir a saturação. Inversamente, os menores valores deste índice representam os locais onde o escoamento por ação gravitacional é maior que a infiltração.

Tabela 4.5- Distribuição do índice topográfico em função da porcentagem de área da bacia

MNT:Grade de 30 m		MNT:Grade de 60 m		MNT:Grade de 90 m		MNT:Grade de 120 m		MNT:Grade de 150 m		MNT:Grade de 180 m		MNT:Grade de 210 m	
% Área da Bacia	Ln(a/tanβ)	% Área da Bacia	Ln(a/tanβ)	% Área da Bacia	Ln(a/tanβ)	% Área da Bacia	Ln(a/tanβ)	% Área da Bacia	Ln(a/tanβ)	% Área da Bacia	Ln(a/tanβ)	% Área da Bacia	Ln(a/tanβ)
0	17,787	0	18,9188	0	19,0858	0	19,4259	0	19,8285	0	18,3255	0	18,7125
0,00002	17,3074	0,00006	18,4467	0,00022	18,6336	0,00025	18,9912	0,0002	19,3868	0,00057	17,9379	0,00077	18,3284
0,00008	16,8278	0,00019	17,9747	0,00014	18,1813	0,00038	18,5565	0	18,9451	0,00085	17,5503	0,00039	17,9443
0,00014	16,3481	0,00026	17,5026	0,00029	17,7291	0,00038	18,1218	0,0002	18,5035	0,00113	17,1627	0,00077	17,5602
0,00026	15,8685	0,00026	17,0306	0,00036	17,2769	0,00025	17,6872	0,0002	18,0618	0,00057	16,7751	0,00154	17,1761
0,00052	15,3889	0,00036	16,5585	0,00029	16,8247	0,00076	17,2525	0,00059	17,6202	0,00198	16,3875	0,0027	16,792
0,00062	14,9093	0,00071	16,0865	0,0013	16,3725	0,00139	16,8178	0,00158	17,1785	0,00425	15,9999	0,00154	16,4079
0,00117	14,4297	0,00104	15,6144	0,00108	15,9203	0,00228	16,3831	0,00197	16,7368	0,0034	15,6123	0,00193	16,0239
0,00172	13,9501	0,00175	15,1424	0,00202	15,4681	0,00354	15,9484	0,00158	16,2952	0,00595	15,2247	0,00656	15,6398
0,00307	13,4705	0,00324	14,6703	0,00439	15,0159	0,00417	15,5137	0,00256	15,8535	0,0085	14,8371	0,00424	15,2557
0,00513	12,9909	0,00558	14,1983	0,00821	14,5637	0,00544	15,079	0,0063	15,4119	0,01105	14,4495	0,00887	14,8716
0,00846	12,5113	0,01019	13,7262	0,00893	14,1114	0,00873	14,6443	0,0063	14,9702	0,01446	14,0619	0,00694	14,4875
0,01431	12,0317	0,01113	13,2542	0,01369	13,6592	0,01138	14,2096	0,01044	14,5286	0,01587	13,6744	0,01196	14,1034
0,02233	11,552	0,01651	12,7821	0,01434	13,207	0,01252	13,7749	0,01478	14,0869	0,02353	13,2868	0,01774	13,7193
0,03456	11,0724	0,02294	12,3101	0,01974	12,7548	0,01682	13,3403	0,01694	13,6452	0,02551	12,8992	0,02314	13,3353
0,06188	10,5928	0,03102	11,838	0,02795	12,3026	0,02302	12,9056	0,01753	13,2036	0,0309	12,5116	0,03201	12,9512
0,09899	10,1132	0,03822	11,366	0,03263	11,8504	0,02934	12,4709	0,02463	12,7619	0,03912	12,124	0,03471	12,5671
0,12466	9,6336	0,05266	10,8939	0,04373	11,3982	0,03187	12,0362	0,03388	12,3203	0,03997	11,7364	0,03355	12,183
0,14566	9,154	0,09191	10,4219	0,05626	10,946	0,04439	11,6015	0,04255	11,8786	0,05669	11,3488	0,05129	11,7989
0,13738	8,6744	0,12403	9,9498	0,09192	10,4938	0,05388	11,1668	0,05871	11,4369	0,07596	10,9612	0,05669	11,4148
0,10501	8,1948	0,1483	9,4778	0,13024	10,0416	0,07727	10,7321	0,0727	10,9953	0,10459	10,5736	0,07675	11,0307
0,06655	7,7152	0,14103	9,0057	0,15106	9,5893	0,11888	10,2974	0,10717	10,5536	0,13946	10,186	0,10528	10,6466
0,04475	7,2356	0,10369	8,5337	0,1422	9,1371	0,14569	9,8627	0,15465	10,112	0,15051	9,7984	0,15118	10,2626
0,03636	6,7559	0,06794	8,0616	0,09667	8,6849	0,14468	9,428	0,16017	9,6703	0,10884	9,4108	0,15195	9,8785
0,03098	6,2763	0,04685	7,5896	0,07463	8,2327	0,11661	8,9933	0,12608	9,2287	0,07398	9,0233	0,11184	9,4944
0,0255	5,7967	0,03235	7,1175	0,04092	7,7805	0,08385	8,5587	0,08097	8,787	0,04195	8,6357	0,06248	9,1103
0,01622	5,3171	0,02209	6,6455	0,0183	7,3283	0,04047	8,124	0,04019	8,3453	0,01559	8,2481	0,0297	8,7262
0,01016	4,8375	0,01622	6,1734	0,01225	6,8761	0,01429	7,6893	0,01241	7,9037	0,00227	7,8605	0,0108	8,3421
0,00322	4,3579	0,00766	5,7014	0,00497	6,4239	0,00493	7,2546	0,00335	7,462	0,00198	7,4729	0,00154	7,958
0,0003	3,8783	0,00182	5,2293	0,0013	5,9717	0,00253	6,8199	0,00138	7,0204	0,00057	7,0853	0,00116	7,5739
Média	10,83263	Média	12,07405	Média	12,52871	Média	13,12291	Média	13,42441	Média	12,70538	Média	13,14321

Nas figuras 4.10 e 4.11 são mostradas as isolinhas de índices topográficos que foram calculados pelo programa GRIDATB.EXE. Na figura 4.10 as distribuições deste índice pela bacia forma obtidas com grades do MNT de 60 m e 90 m e na figura 4.11 para 150 m e 210 m. Estas figuras mostram que a medida que se aumenta o lado do elemento unitário da grade do MNT e portanto, da área de drenagem usada no cálculo do índice topográfico, vai se perdendo o detalhamento da distribuição espacial deste índice.

Outra consequência do uso de áreas de maior tamanho no cálculo é o deslocamento da distribuição no sentido dos maiores valores de índice topográfico, o que é observado, também, com os valores médios da distribuição mostrados na tabela 4.5.

Nas margens dos canais de drenagem observa-se uma grande variação do índice topográfico, o que é indicado pela grande concentração de isolinhas, e que apresentam simetria em relação aos canais. Nestes, o índice topográfico calculado assume os maiores valores da escala, pois as declividades devem ser as menores.

Figura 4.10- Distribuição dos valores de índice topográfico. Resolução espacial do MNT: A-60m, B-90m

Figura 4.11- Distribuição dos valores de índice topográfico. Resolução espacial do MNT: A-150m, B-210m

4.5. Vazão

Os dados de vazão foram obtidos de linigramas da única estação com registrador disponível na área de estudo, localizada na seção de saída da bacia, pertencente à Rede Hidrometeorológica do Distrito Federal da Companhia de Águas e Esgoto do Distrito Federal, CAESB, cadastrada no DNAEE como Descoberto Montante - 60435000.

Os dados lidos nos linigramas abrangem dois períodos: de 03 de fevereiro de 1988 a 19 de março de 1988, e de 17 de março de 1995 a 24 de abril de 1995. Foram utilizados apenas estes dados devido à inconsistências e/ou mal funcionamento do posto, e também pela disponibilidade de imagens do Satélite Landsat-TM para estes períodos.

A curva chave para a conversão das cotas em vazão, válida para o período em estudo, foi obtida a partir de dados compilados pelo DNAEE, disponíveis no Microssistema de Dados Hidrometeorológicos-MSDHD.

A figura 4.12 mostra as vazões medidas em função dos níveis da água do Rio Descoberto medidos na estação mencionada e a curva ajustada para estes valores.

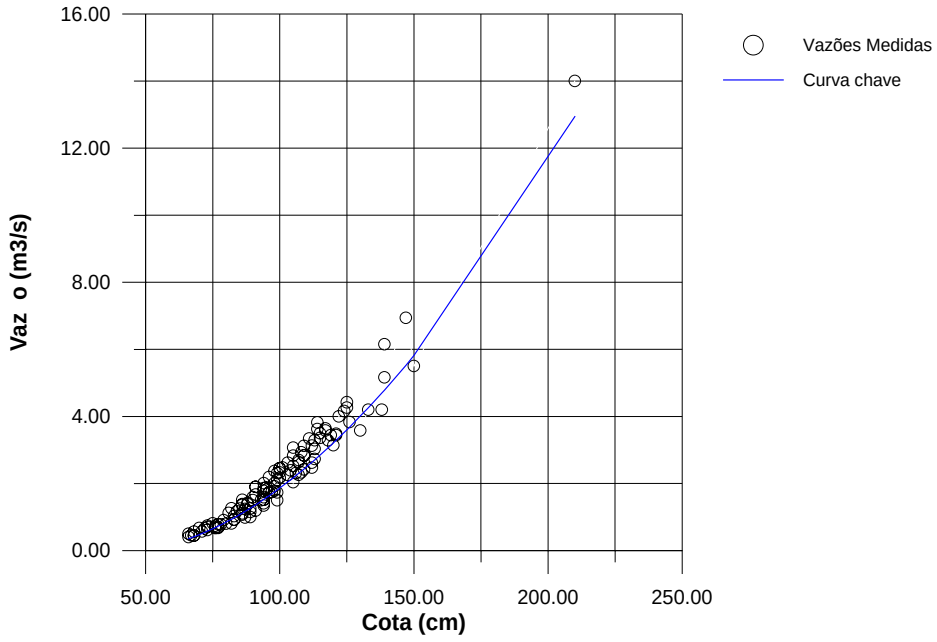


Figura 4.12-Ajuste da curva chave a partir de medições cota - vazão

A equação ajustada para os dados medidos é a seguinte:

$$Q = 5{,}243.(h - 0{,}44)^{1{,}782} \qquad (4.2)$$

onde

h = Valor de cota lido no linigrama [m];

Q = Vazão do rio [m^3/s].

O período de validade desta equação é de 17 de janeiro de 1987 e 30 de setembro de 1997, podendo-se calcular vazões para cotas entre o mínimo de 0,5m até o máximo de 4,0m

A equação 4.2 foi empregada para converter os valores de cota obtidos nos linigramas em vazões. Finalmente estes valores de vazão são convertidos à valores específicos horários, expressos então em volume de água escoado por unidade de área da bacia por unidade de tempo, $\left[\frac{m^3}{m^2.h}\right]$, ou simplesmente $\left[\frac{m}{h}\right]$.

5. USO DO MODELO E RESULTADOS

Neste capítulo é descrita a aplicação do TOPMODEL à bacia do rio Descoberto localizada no Destrito Federal, incluindo uma discussão sobre a sensibilidade do modelo aos diversos parâmetros, sua calibração utilizando cinco eventos chuvosos de curta duração ocorridos em 1988, e a verificação de sua calibração através de sua aplicação à eventos do ano de 1995.

No desenvolvimento de modelos matemáticos, é procedimento freqüente primeiramente se fazer a calibração do modelo estimando os valores dos parâmetros e logo a seguir se fazer o estudo de sensibilidade. Neste trabalho, visando uma melhor condução da calibração do modelo, optou-se por inverter esta sequência usualmente seguida. Portanto, inicialmente foi feita a análise de sensibilidade, tomando como referência os valores dos parâmetros obtidos pelo autor do modelo ajustado à bacia do rio Slapton Wood com área de drenagem menor que 1 km^2.

5.1. Análise de Sensibilidade

Beven et al. (1994) relatam que nas várias experiências com a aplicação do TOPMODEL, cada formulação do modelo resultou num determinado conjunto de parâmetros a ser estimado. A versão utilizada neste trabalho, 94.01, utiliza 10 parâmetros, que são fornecidos ao modelo por um arquivo chamado $params.dat, que inclui também, o valor da vazão inicial para tempo igual a zero, e um valor (1 ou 0) armazenado na variável chamada INFEX, que solicita ao programa o acionamento do módulo de cálculo de escoamento superficial por excesso de infiltração. Os parâmetros são os seguintes:

m = Parâmetro do modelo;

T_0 = Transmissividade lateral quando o solo está saturado;

t_d = Tempo de permanência na zona insaturada por unidade de déficit;

CHV = Velocidade de propagação no canal principal;

RV = Velocidade nas sub-bacias;

S_{rmax} = Máximo déficit possível na zona das raízes;

S_{r0} = Déficit inicial na zona raízes;

K_0 = Condutividade hidráulica de saturação da superfície do solo;

HF = Valor de sucção na frente de molhamento;

DTH = Variação do conteúdo de água na frente de molhamento.

Os parâmetros $K_{0,}$ condutividade hidráulica de saturação da superfície do solo, *HF*, valor de sucção na frente de molhamento e *DTH*, variação do conteúdo de água na frente de molhamento são utilizados no bloco do programa onde é feito o cálculo de escoamento superficial quando há excedência de infiltração. Quando se têm valores muito altos de condutividade hidráulica de saturação da superfície do solo, provavelmente não se verificará a formação de escoamento superficial por este mecanismo, uma vez que os valores de intensidade de precipitação são muito menores que estes valores atribuídos a K_0. Assim, nestas condições, estes parâmetros não são utilizados nos cálculos feitos pelo modelo, não apresentando, praticamente, nenhuma influência nos resultados obtidos. Os valores utilizados para K_0, 1,0 m/h, para *HF*, 0,002 m e para *DTH*, 0,1 foram os mesmos utilizados por Beven et al. (1994).

O parâmetro S_{r0}, definido como déficit inicial na zona raízes especifica o estado inicial de umidade do solo, e é assumido no modelo como um único valor, válido para toda a bacia. O valor de S_{r0} é usado apenas uma vez, logo no início dos cálculos, sendo atribuído à variável que representa o déficit de armazenamento na zona de raízes. Sua influência nos resultados do modelo é muito pequena. Foi empregado o mesmo valor utilizado por Beven et al. (1994), ou seja 0,002 m.

O tempo de permanência na zona não saturada por unidade de déficit, t_d, traduz a capacidade de retenção de água, sendo empregado na equação de cálculo do fluxo vertical da zona não saturada. O valor empregado neste estudo foi o mesmo utilizado por Beven et al. (1994) e por Mine e Clarke (1996), 50 h/m.

Em todas as aplicações, quatro parâmetros críticos invariavelmente são os responsáveis pela resposta do modelo. São eles: *m*, parâmetro de decréscimo exponencial da transmissividade; T_0, transmissividade do solo saturado à superfície; S_{rmax} o

armazenamento máximo de água na zona das raízes e, para bacias grandes, *CHV* a velocidade de propagação no canal principal.

O valor parâmetro do modelo *m*, ou de decréscimo exponencial da transmissividade é controlado pela forma do ramo de recessão do hidrograma observado na seção de saída da bacia. Expressa também a profundidade real do perfil de umidade do solo da bacia, atuando interativamente com T_0. Estes dois parâmetros se relacionam conforme se mostra na equação 3.1.

$$T_i = T_0 . e^{-s_i/m}$$

Para se verificar a sensibilidade do TOPMODEL a estes fatores, foram utilizados os arquivos de dados que acompanham a versão de demonstração utilizada, conforme discutido no ínicio deste capítulo.

O TOPMODEL oferece uma maneira de se avaliar os resultados produzidos e portanto, das alterações feitas nos valores destes parâmetros, analisando os valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe, E, normalmente calculado, para cada conjunto de dados processados, através da seguinte equação, discutida por Beven et al. (1994):

$$E = 1 - \frac{\sigma_e}{\sigma_o} \qquad (5.1)$$

onde:

E = Coeficiente de Nash e Sutcliffe;

σ_e = Variância dos resíduos;

σ_o = Variância das vazões observadas.

O valor de E indica a qualidade do ajuste do modelo aos dados observados, sendo que os melhores ajustes são aqueles próximos de 1. Mine e Clarke (1996) adotaram como critério para avaliar os resultados da aplicação do TOPMODEL à bacia do rio Belém, localizada na cidade de Curitiba, no estado do Paraná que, valores de E maiores que 0,7

representam ajustes de alta eficiência. Para se poder efetuar comparações de desempenho do modelo, este valor será usado como referência.

Para se estudar a influência dos principais parâmetros, T_0, m e S_{rmax} foram utilizados os arquivos de dados fornecidos junto com o TOPMODEL, abrangendo um período de 950 horas de dados sequenciais de precipitação, evapotranspiração e vazão.

Para um determinado parâmetro estudado foram mantidos constantes todos os outros e, para cada valor atribuído ao parâmetro o modelo foi rodado. Foram calculados os valores do coeficiente E de Nash e Sutcliffe, e as relações entre valores calculados e observados (valores relativos) para o volume total do escoamento superficial, vazão máxima e tempo ao pico.

Nas figuras 5.1 a 5.3 são mostrados os resultados obtidos.

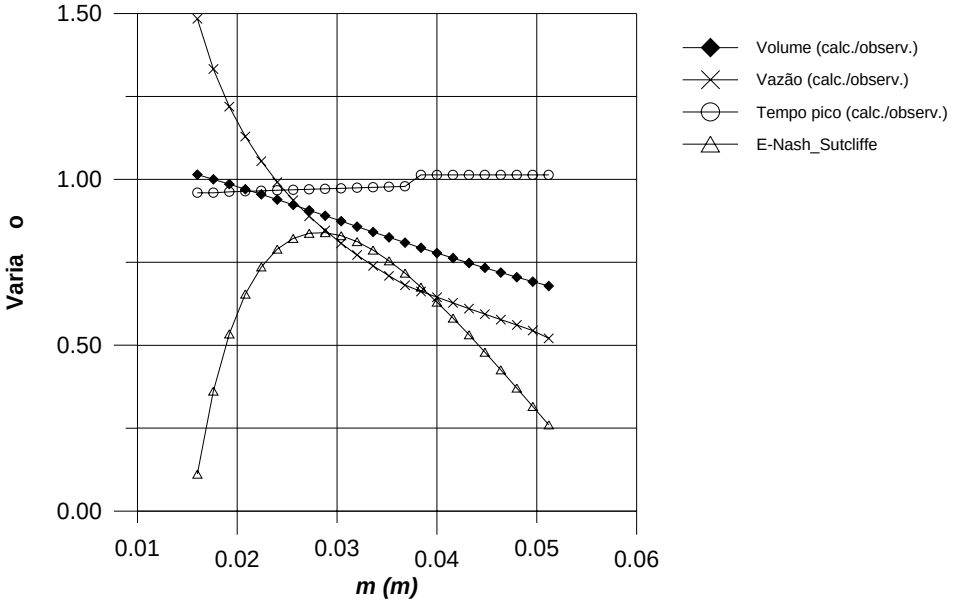


Figura 5.1- Sensibilidade do modelo ao parâmetro *m*

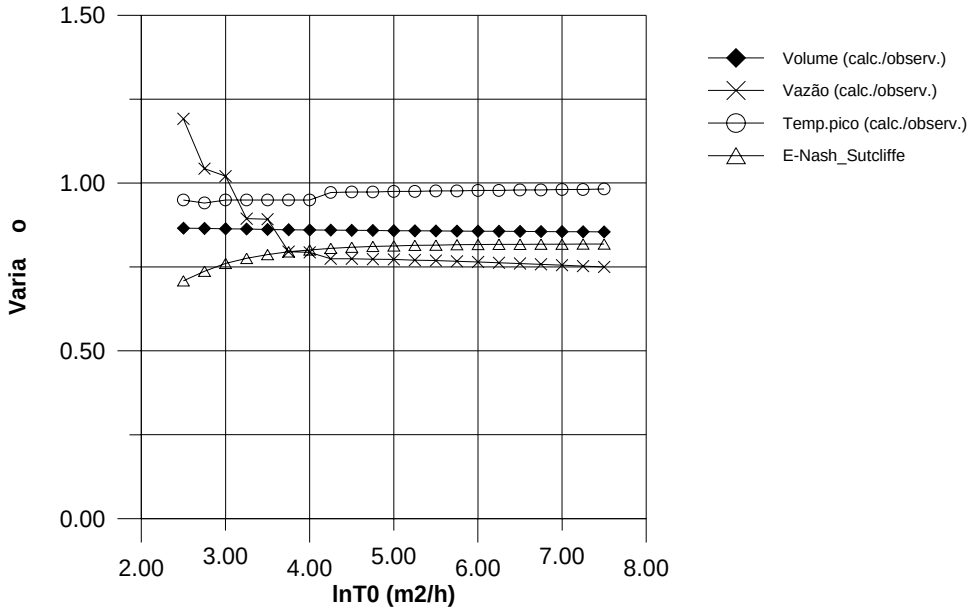


Figura 5.2- Sensibilidade do modelo ao parâmetro T_0

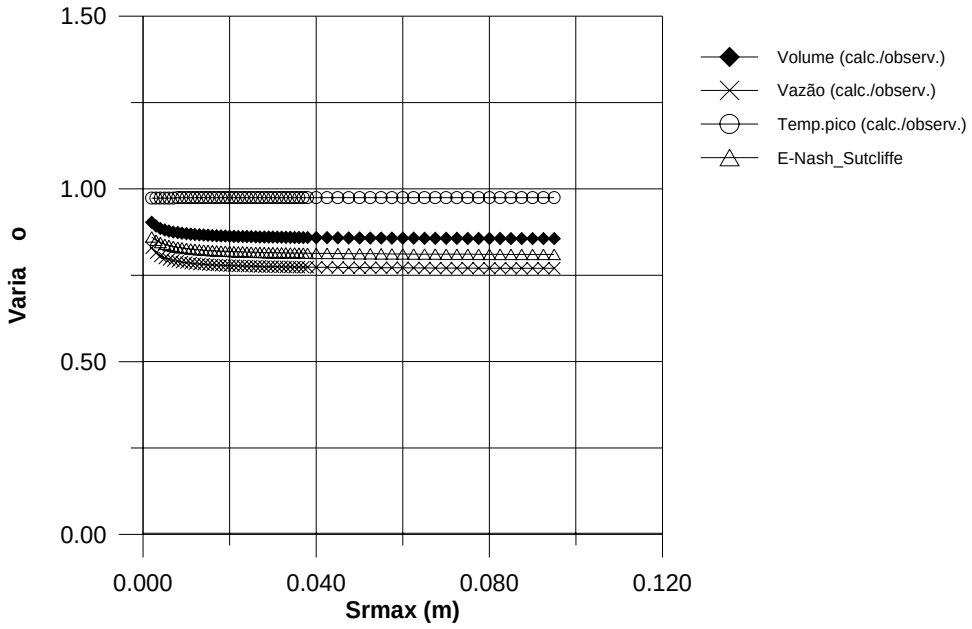


Figura 5.3- Sensibilidade do modelo ao parâmetro S_{rmax}

O processamento dos dados originais do TOPMODEL resultou, para o conjunto de valores dos parâmetros, num valor de E de 0,8124, que de acordo com os critérios adotados, representa um ajuste de alta eficiência.

No TOPMODEL a velocidade de deslocamento em canal produz um deslocamento do tempo ao pico. Valores maiores que 1 km/h, valor original deste parâmetro no TOPMODEL, resultam numa antecipação do tempo ao pico.

Os resultados dos estudos de sensibilidade apresentados nas figuras 5.1 a 5.3 para os parâmetros m, T_0 e S_{rmax}, confirmam as informações levantadas na bibliografia, mostrando a grande influência do primeiro nos resultados, o que pode ser constatado pela observação da variação dos valores do coeficiente E de Nash e Sutcliffe e das vazões e volumes relativos, calculados em relação aos observados.

A escolha individual do melhor valor de cada parâmetro como sendo aquele que apresenta o maior valor do índice E, não garante um ajuste do modelo de boa qualidade, porque a análise de sensibilidade é feita considerando o efeito isolado de cada parâmetro, mas na prática existe um efeito combinado de todos eles.

O valor original de S_{rmax} presente no arquivo de parâmetros do modelo era de 0,05 m. Para uma faixa relativamente ampla de variação nos valores deste parâmetro, praticamente não são observadas alterações nos resultados obtidos. Para valores próximos ao do déficit inicial na zona das raízes, que no caso foi de 0,002 m, o modelo apresentou alterações nos valores relativos de vazões máximas, volumes e no valor de E. Portanto, a influência de S_{rmax} deve ser considerada em condições para as quais a diferença entre o valor deste parâmetro e a referência do estado inicial de umidade do solo, S_{r0} é pequena.

Nas figuras 5.4 e 5.5, são mostrados os vários hidrogramas obtidos com o TOPMODEL, para as primeiras 200 h de dados precipitação/vazão, retirados do arquivo que acompanha a versão do modelo empregada, Beven et al. (1994). Nestes estudos, os resultados apresentados nas figuras mostram valores das vazões específicas calculadas em função do tempo, representando cada uma das curvas um valor de m ou de T_0.

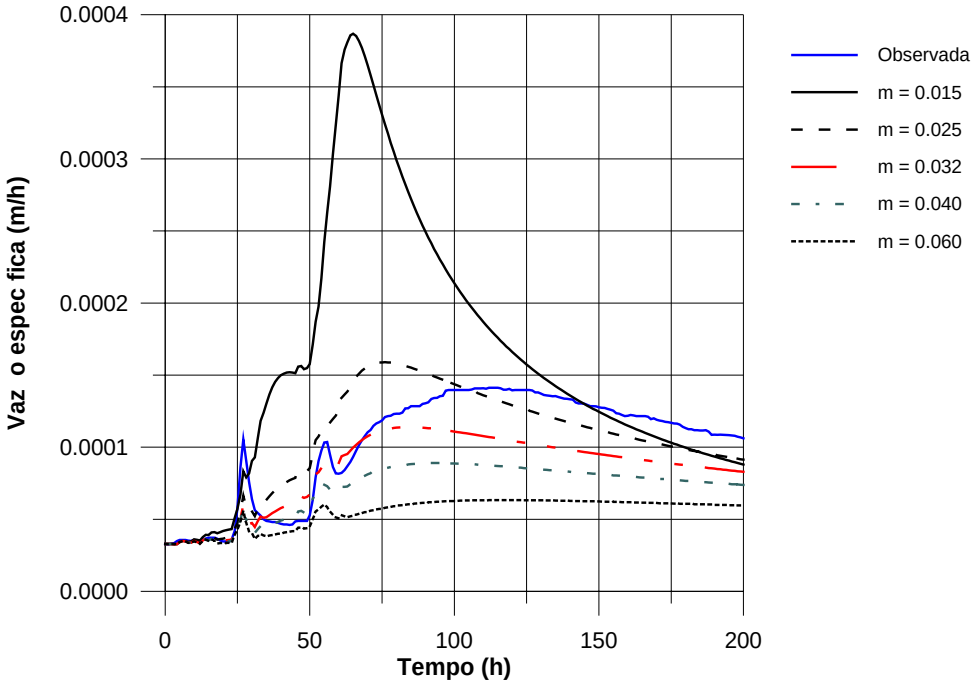


Figura 5.4- Vazões calculadas pelo modelo em função do parâmetro m

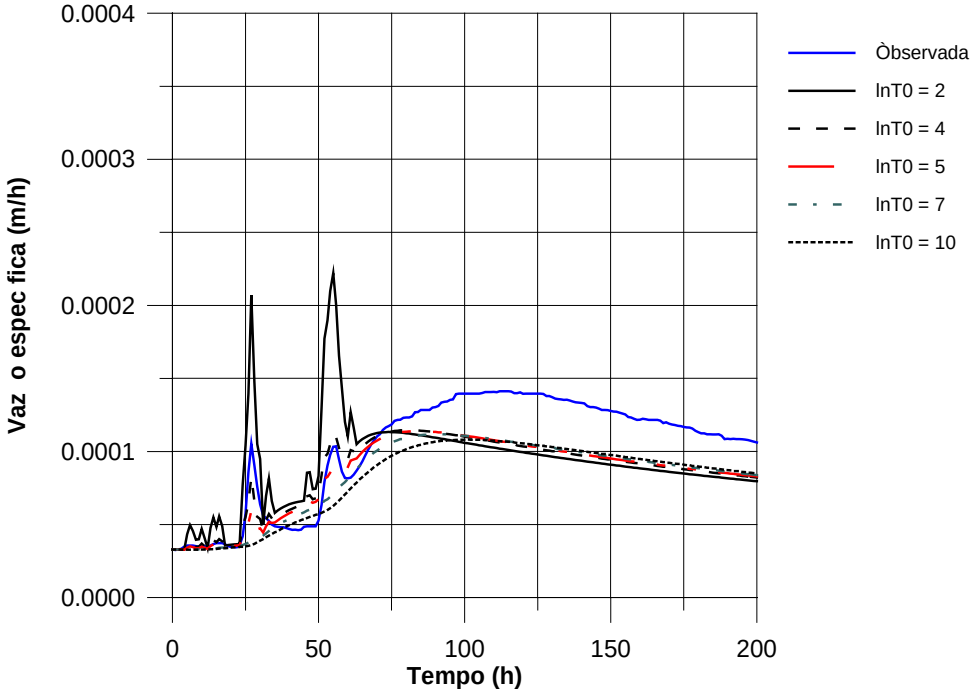


Figura 5.5- Vazões calculadas pelo modelo em função do parâmetro T_0

A influência do parâmetro m nos resultados produzidos pelo modelo é bastante acentuada, tanto no valor de vazão máxima quanto na forma do ramo recessivo. O parâmetro T_0 também altera os valores das vazões de pico, no entanto, praticamente não há alteração no ramo recessivo.

Portanto, os resultados apresentados nas figuras 5.4 e 5.5 indicam que no procedimento de calibração do modelo, o ajuste da forma do hidrograma pode ser alcançado fazendo-se alterações no valor do parâmetro de decaimento, m, e a seguir procurar o acerto da vazão de pico, variando-se o valor de T_0, a transmissividade lateral para solo saturado. Este estudo mostrou também que a diminuição dos valores destes dois parâmetros desloca o hidrograma no sentido crescente de vazões.

Os parâmetros de velocidade CHV e RV serão empregados no acerto do tempo ao pico. As influências dos demais parâmetros nos valores calculados pelo modelo, foram também verificadas não se encontrando indícios de que devam ser considerados como parâmetros vitais na calibração do TOPMODEL. Assim, estas conclusões formaram a base para a calibração do modelo na aplicação à bacia do rio Descoberto mostrada a seguir.

5.2. Calibração do modelo

A calibração do modelo consiste em determinar uma combinação de valores dos parâmetros que permita a melhor reconstituição possível dos hidrogramas observados na saída da bacia. O estudo de sensibilidade indicou que os parâmetros, m e T_0 são os que mais influenciam nos resultados produzidos pelo modelo, ou seja , vazão específica de pico, volume total de água e na forma do hidrograma na seção de saída da bacia.

No desenvolvimento das equações que descrevem o modelo, foi definido o índice topográfico que relaciona área drenada com a inclinação do terreno no local, sendo esta informação vital para o TOPMODEL. O cálculo da declividade do terreno, e em decorrência o índice topográfico, pode ser feito por diferentes técnicas. Acompanhando o TOPMODEL, o programa GRIDATB.FOR oferece uma alternativa de cálculo deste índice a partir do modelo numérico do terreno, que é formado pelas elevações do terreno referenciadas aos nós da grade

virtual que é sobreposta à área da bacia. Conforme apresentado no capítulo 4 deste trabalho, para cada resolução espacial do MNT adotada resultará uma distribuição de índice topográfico. Neste trabalho foram gerados 7 modelos numéricos do terreno, dos quais 4 foram escolhidos para se fazer a calibração do modelo. A figura 5.6 mostra as distribuições do índice topográfico em função da porcentagem de área acumulada geradas a partir dos 4 MNT escolhidos.

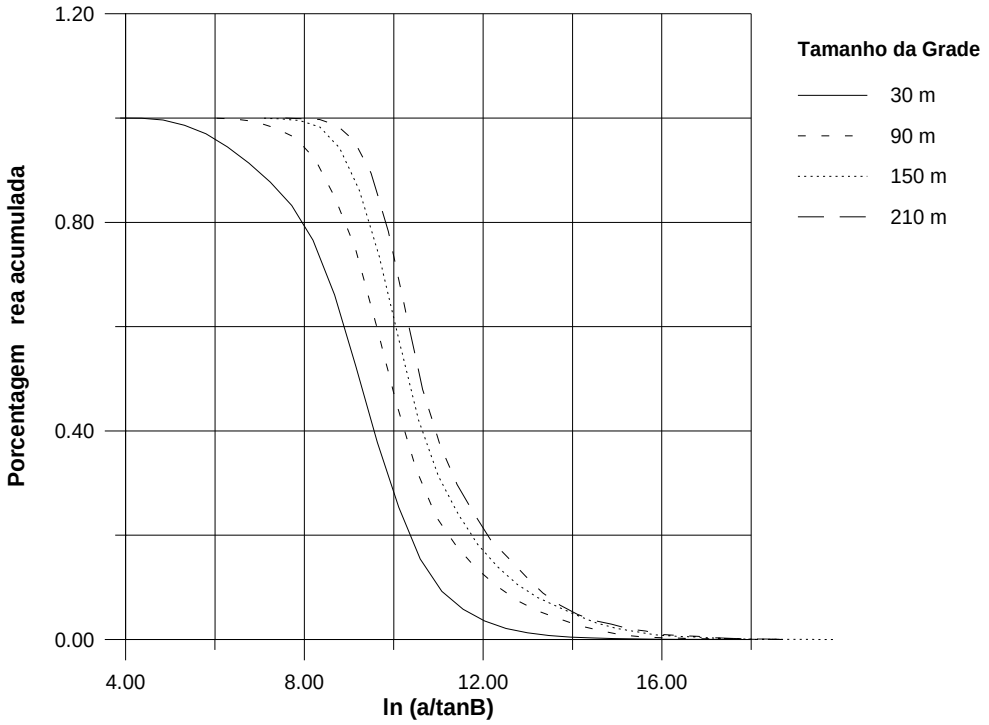


Figura 5.6- Distribuição do índice topográfico para a Bacia do rio Descoberto

Como se pode observar, a medida que se aumenta a resolução espacial do MNT através da diminuição do lado da grade, a distribuição dos valores de indíce topográfico em função da porcentagem da área total é alterada apresentado valores máximos, mínimos e médias progressivamente menores. Como a transmissividade, em cada local do terreno, varia com a declividade, os valores obtidos na calibração deste parâmetro dependeram também da resolução espacial do MNT.

Na calibração do modelo foi utilizada uma coleção de dados de precipitação obtidos na estação Descoberto e de vazões medidas na estação localizada na saída da bacia. Os dados abrangeram o período de 11 de fevereiro a 21 de março de 1988 perfazendo um total de 920 horas ininterruptas. Na figura 5.7 são mostrados os valores de precipitação e vazão para este intervalo de tempo e especificados os 5 eventos chuvosos que foram empregados na calibração dos parâmetros.

Assim, para se determinar os valores dos parâmetros do modelo, foram utilizados estes cinco eventos chuvosos e, para cada um deles, foram utilizadas quatro alternativas de distribuições do índice topográfico, das sete disponíveis, totalizando 20 conjuntos de dados de partida.

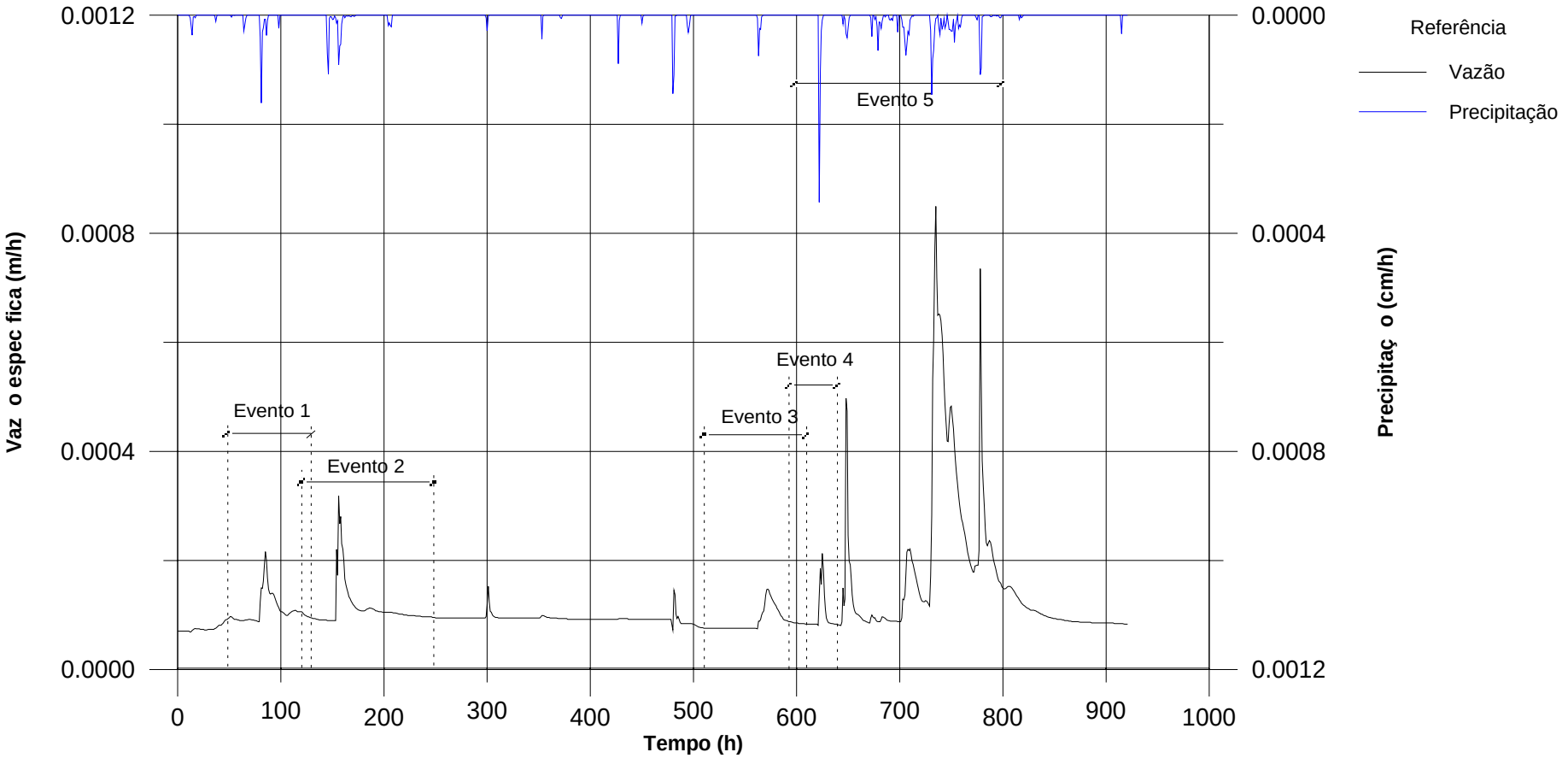


Figura 5.7- Precipitação e vazão, bacia do rio Descoberto - Início: 11/02/1988

5.2.1 Estimativa preliminar do parâmetro m

O parâmetro m é empregado no cálculo da transmissividade lateral, T_i, através das equações 3.1 ou 3.6 que têm como variáveis o déficit de armazenamento no local i e a profundidade da superfície do lençol freático medida a partir da superfície do terreno.

Uma hipótese básica do TOPMODEL é que a zona saturada se comporta como armazenamento exponencial e assim, este parâmetro pode ser inicialmente estimado para condições onde as entradas são nulas e, portanto, em período de recessão, através da seguinte equação que relaciona a vazão de base, com o tempo tendo m como parâmetro:

$$\frac{1}{Q_b} = \frac{1}{Q_0} + \frac{t}{m} \tag{5.1}$$

onde

Q_b = Vazão de base [L/T];

Q_0 = Vazão inicial [L/T];

t = Tempo[T];

Esta equação, derivada de 3.24 ($Q_b = Q_0 . e^{-f . z_{med}}$), conforme discutido por Beven et al. (1994) é aplicada para períodos onde não há entrada de água no solo, isto é não aconteceram precipitações, sendo esta uma maneira de se fazer uma primeira estimativa do valor do parâmetro *m*.

Traçando-se um gráfico que tem como ordenada o valor do inverso da vazão de base e em abscissa o valor do tempo obtêm-se uma reta, se as hipóteses assumidas forem válidas, onde o valor da declividade é numericamente igual ao inverso de *m*.

Para se determinar o valor deste parâmetro foi considerado um período de 52 horas contadas a partir da hora 868 da série de dados vazão mostrados na figura 5.7. O ajuste obtido para as vazões medidas na estação Descoberto, para o intervalo de tempo estudado é mostrado na figura 5.8 apresentada seguir.

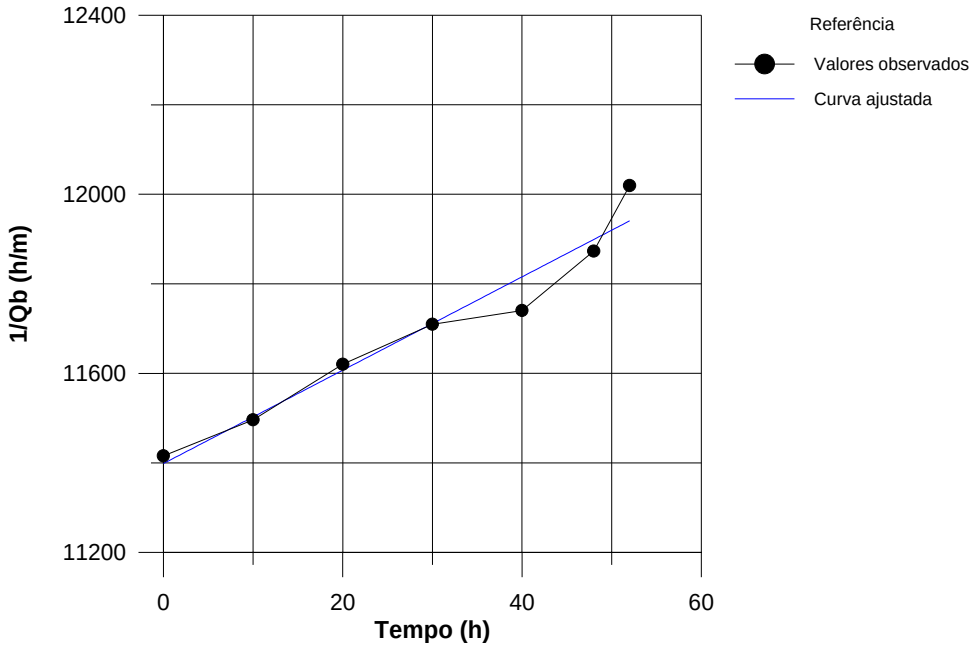


Figura 5.8- Curva de recessão da bacia do rio Descoberto

A equação da reta ajustada é:

$$\frac{1}{Q_b} = 11398 + 10{,}4258.t \qquad (5.2)$$

O ajuste, por mínimos quadrados, resultou num coeficiente de regressão, R^2 igual a 0,950289 e o valor de *m* calculado para esta curva de recessão, ($\frac{1}{10{,}4258}$) que é o valor usado com referência para a calibração, é igual a 0,0959.

O valor do parâmetro *m* estimado por este método, que utiliza a equação de recessão, foi chamado de preliminar pois na determinação do valor do parâmetro T_0, ele será novamente ajustado, considerando que haverá uma interferência entre os dois.

5.2.2 Parâmetros T_0 e *m*

Como foi mostrado no estudo de sensibilidade, os dois parâmetros, m e T_0, influenciam significantemente nos resultados do modelo e portanto requerem procedimentos mais precisos e confiáveis em suas estimativas. Os valores utilizados para os demais parâmetros, inclusive o de S_{rmax}, o máximo déficit possível na zona das raízes, foram retirados da bibliografia, e em particular do trabalho de Mine e Clarke (1996). A tabela 5.1 mostra valores iniciais dos parâmetros, adotados na calibração do modelo, ressaltando que o valor do parâmetro *m* foi arredondado para 0,1m.

Tabela 5.1- Parâmetros usados na calibração do modelo

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
m	0,100	m
$\ln T_0$	5,000	m^2/h
t_d	50,000	h/m
CHV	1,000	km/h
RV	1,000	km/h
S_{rmax}	0,050	m
S_{r0}	0,002	m
K_0	1,000	m/h
HF	0,020	m
DTH	0,100	Adimensional

Com a finalidade de auxiliar na estimativa dos valores dos parâmetros para as diversas situações testadas, foi calculado um fator global chamado de FG, que é simplesmente um valor médio entre o volume total de água (somatório do produto da vazão pelo tempo) e a vazão máxima, calculados em relação aos valores observados :

$$FG = \frac{\left(\left[\frac{Volume_{calc}}{Volume_{obs}}\right] + \left[\frac{Vaz_max_{calc}}{Vaz_max_{obs}}\right]\right)}{2} \qquad (5.3)$$

onde

FG = Fator global, adimensional;

$Volume_{calc}$ = Volume total calculado pelo modelo [L];

$Volume_{obs}$ = Volume total observado [L];

Vaz_max_{calc} = Vazão máxima calculada pelo modelo [L/T];

Vaz_max_{obs} = Vazão máxima observada [L/T];

Este fator global não leva em consideração o desvio que pode ocorrer entre o hidrograma calculado pelo modelo e o observado, o que é determinado pelo fator E, definido anteriormente, e que fornece uma indicação da qualidade do ajuste do hidrograma calculado ao observado.

Convém lembrar que os valores destes parâmetros dependem da resolução espacial do modelo numérico do terreno e portanto, para cada grade considerada haverá um par de valores de m e T_0 que calibram o modelo. Assim, usando os valores dos parâmetros mostrados na tabela 5.1, para um dado evento e uma dada distribuição de índice topográfico (tamanho da grade do MNT), o modelo foi rodado mantendo-se fixo o valor de $\ln T_0$ e variando m de 0,1 a 1,9 vezes o valor inicial, isto é, de 0,01 até 0,19, com incrementos de 0,05, resultando um total de 37 valores de m para cada valor de $\ln T_0$ testado. A quantidade de valores de transmissividade testada em cada caso, variou de acordo com os resultados obtidos em cada um deles. As figuras 5.9 a 5.12 mostram os resultados do evento 1 e grades do MNT de 30, 90, 150 e 210 m respectivamente.

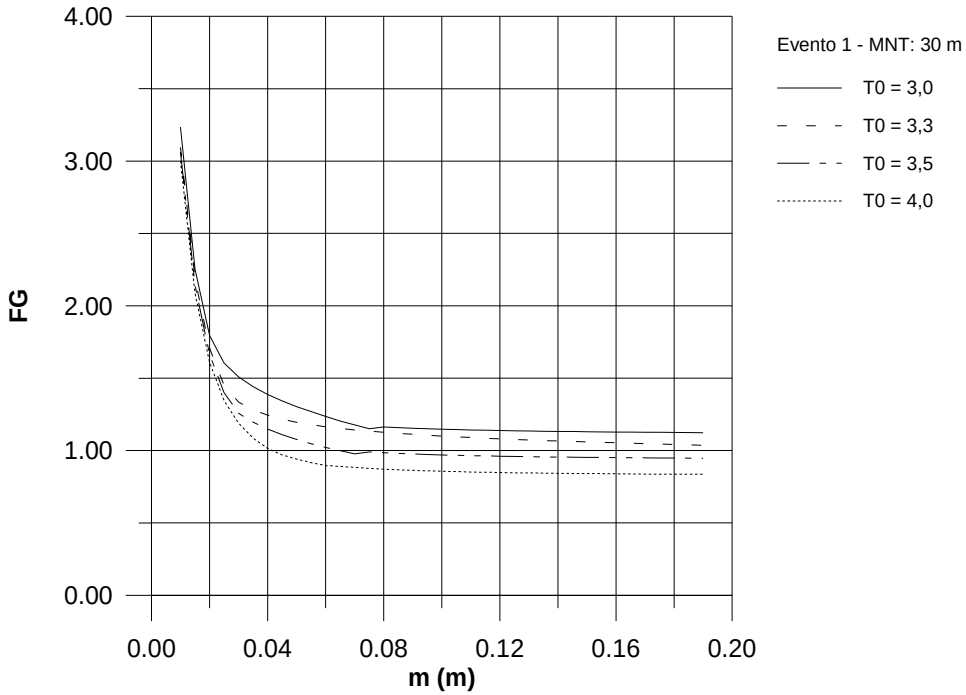


Figura 5.9- Calibração do Evento 1 - Grade do MNT de 30 m

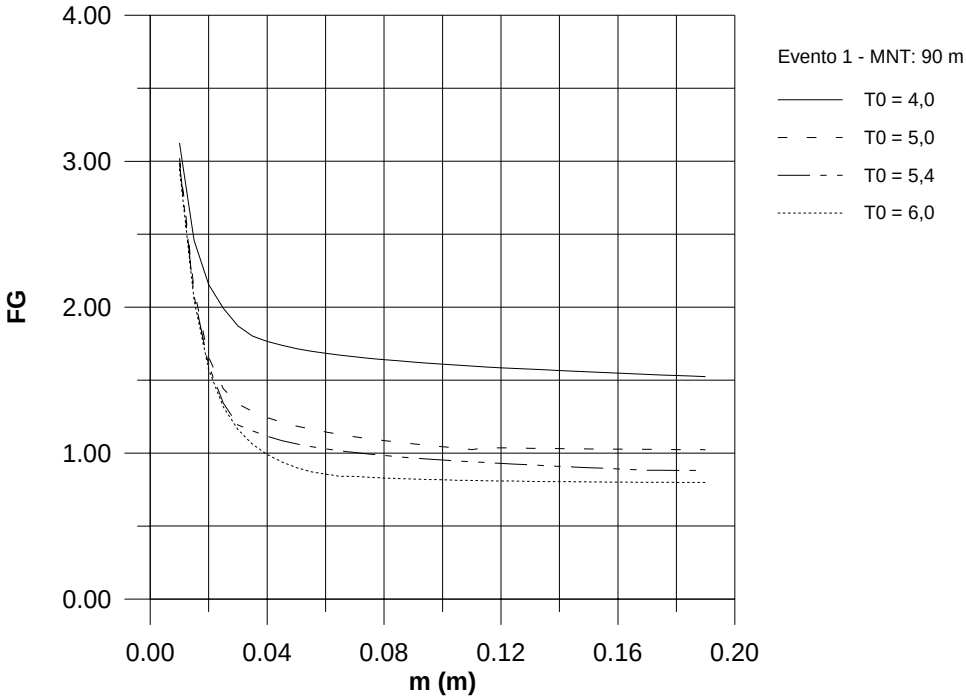


Figura 5.10- Calibração do Evento 1 - Grade do MNT de 90 m

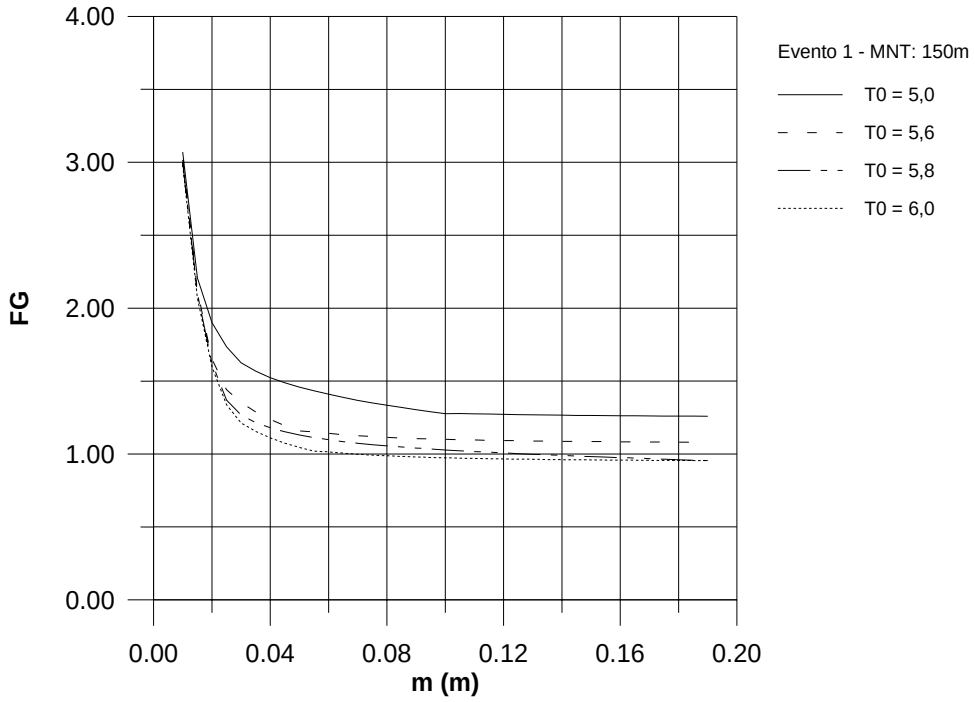


Figura 5.11-Calibração do Evento 1 - Grade do MNT de 150 m

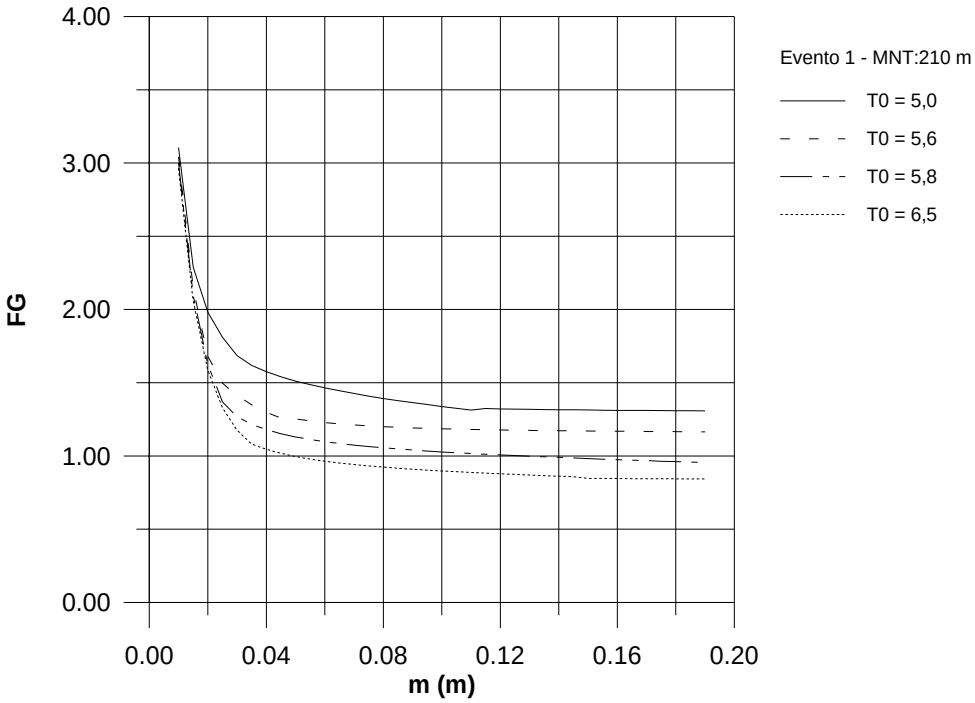


Figura 5.12- Calibração do Evento 1 - Grade do MNT de 210 m

Nas figuras 5.13 a 5.16 são apresentados os resultados obtidos para os eventos 2, 3, 4 e 5 respectivamente e grade do MNT de 90 m nos 4 casos.

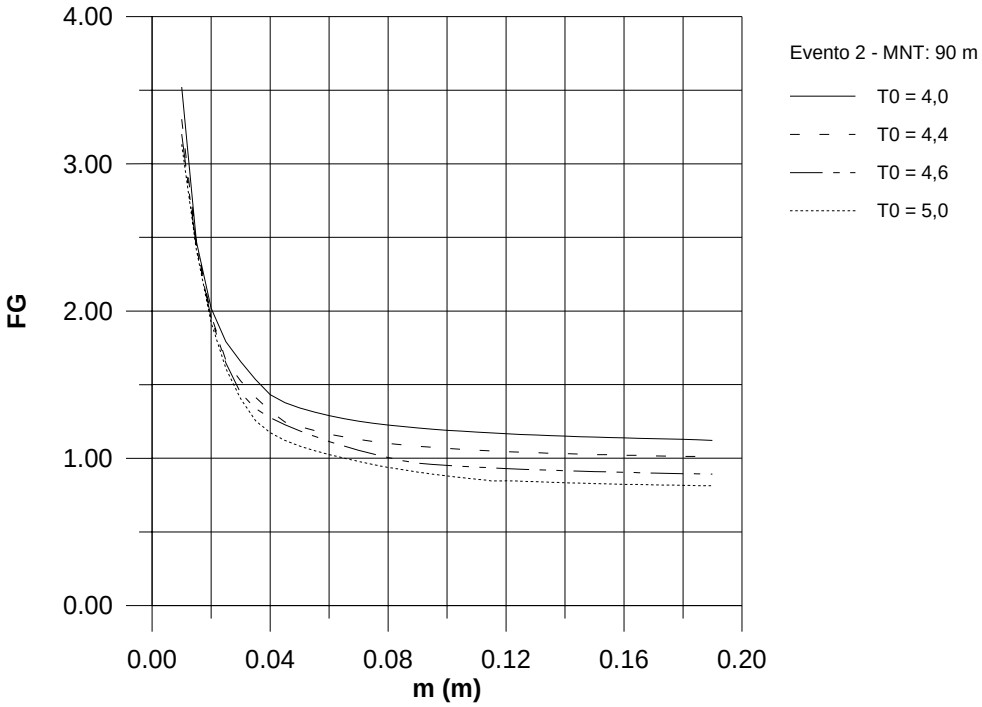


Figura 5.13- Calibração do Evento 2 - Grade do MNT de 90 m

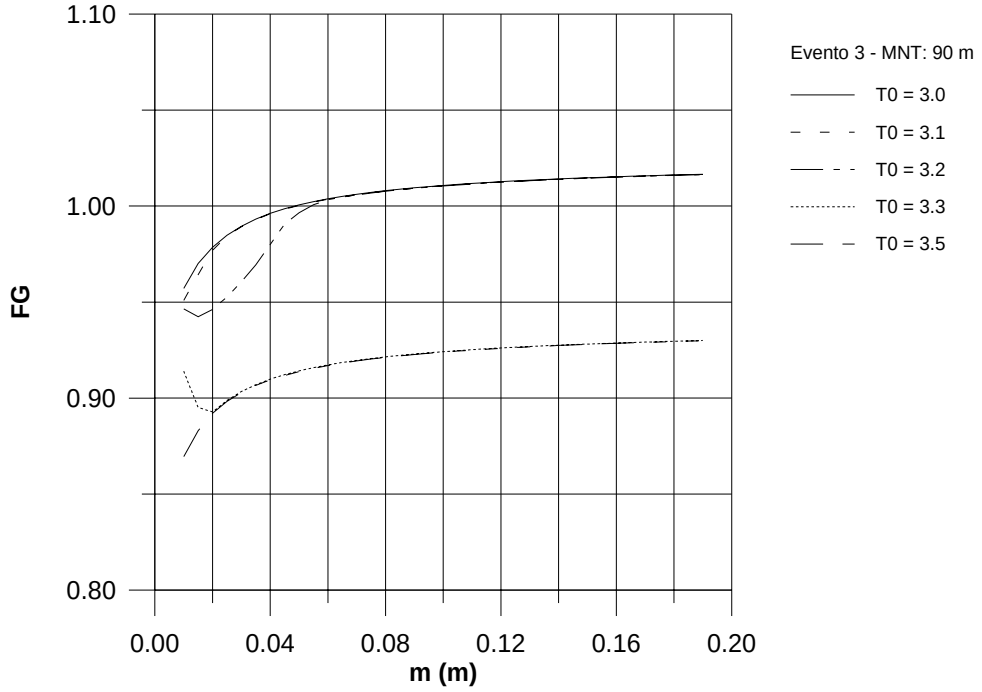


Figura 5.14- Calibração do Evento 3 - Grade do MNT de 90 m

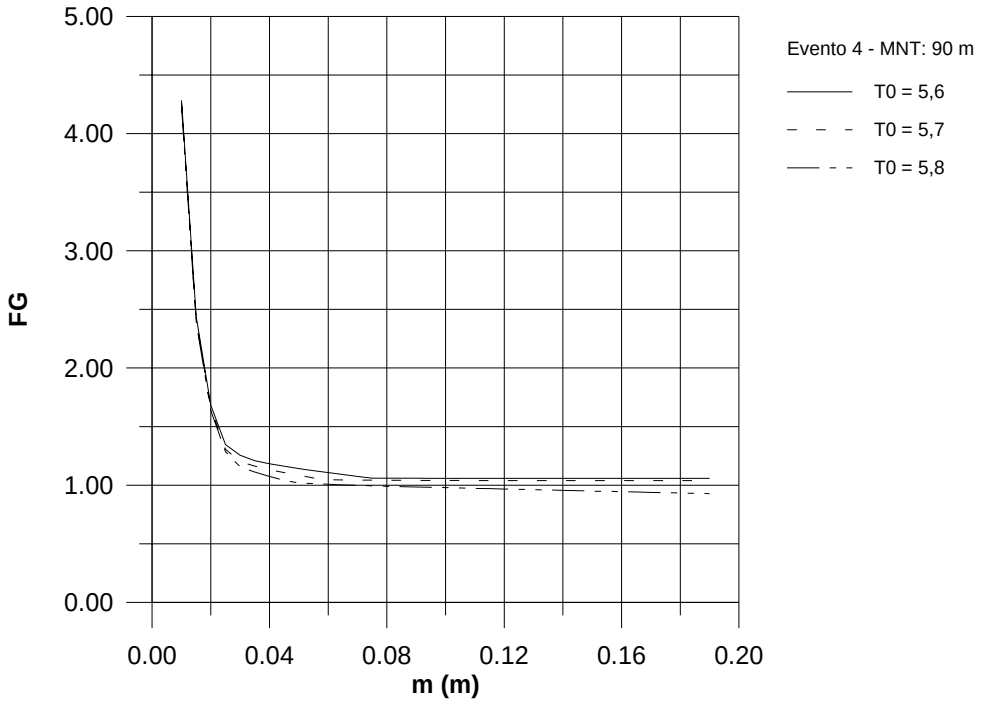


Figura 5.15- Calibração do Evento 4- Grade do MNT de 90 m

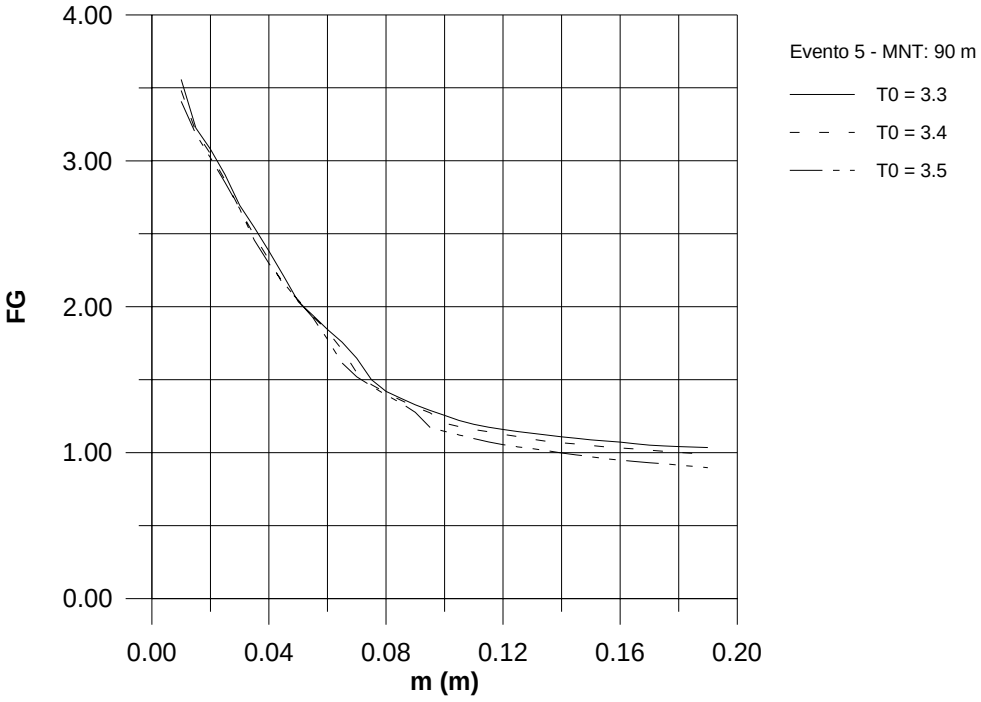


Figura 5.16- Calibração do Evento 5- Grade do MNT de 90 m

O único evento que apresentou um comportamento diferente dos demais foi o 3, o que dificultou a estimativa do valor de T_0.

Em cada um dos 20 gráficos obtidos neste procedimento foram lidos os valores de m e T_0 para as curvas que apresentaram tendência assintótica para FG igual a 1. A tabela 5.2 mostra os resultados das estimativas dos valores do parâmetro m para cada evento e grade do MNT. A referida tabela mostra que, em um única combinação de evento chuvoso/grade do MNT, das 20 estudadas, esse parâmetro apresentou o mesmo valor determinado na estimativa preliminar, 0,1 m, sendo que em todas as outras, este valor foi superado.

Tabela 5.2- Estimativa do parâmetro m

Grade do	**Valor do Parâmetro m**					
MNT (m)	**Evento 1**	**Evento 2**	**Evento 3**	**Evento 4**	**Evento 5**	**Média**
30	0,10	0,14	0,14	0,16	0,15	0,14
90	0,12	0,18	0,14	0,12	0,18	0,15
150	0,12	0,16	0,16	0,12	0,18	0,15
210	0,12	0,16	0,16	0,14	0,18	0,15
Média	0,12	0,16	0,15	0,14	0,17	0,15

O método empregado mostrou que, para as vinte alternativas estudadas, o valor do parâmetro m apresentou um valor médio de 0.15 m. As maiores variações nos valores médios deste parâmetro foram verificadas entre os eventos chuvosos estudados, de 0,12 a 0,17 m. As variações observadas com relação ao tamanho da grade do MNT foram menores, 0,14 a 0,15 m. Portanto, assumir o valor médio significa que para os eventos que na calibração admitiram valores menores que este valor haverá um deslocamento do hidrograma no sentido de valores menores de vazões e, para os eventos que na calibração apresentaram valores do parâmetro m maiores que o médio, o uso deste último valor implica no aumento dos valores das vazões calculadas.

Os valores obtidos na calibração para o parâmetro T_0, para cada um dos eventos estudados, em função do lado da grade do MNT são apresentados figura 5.17.

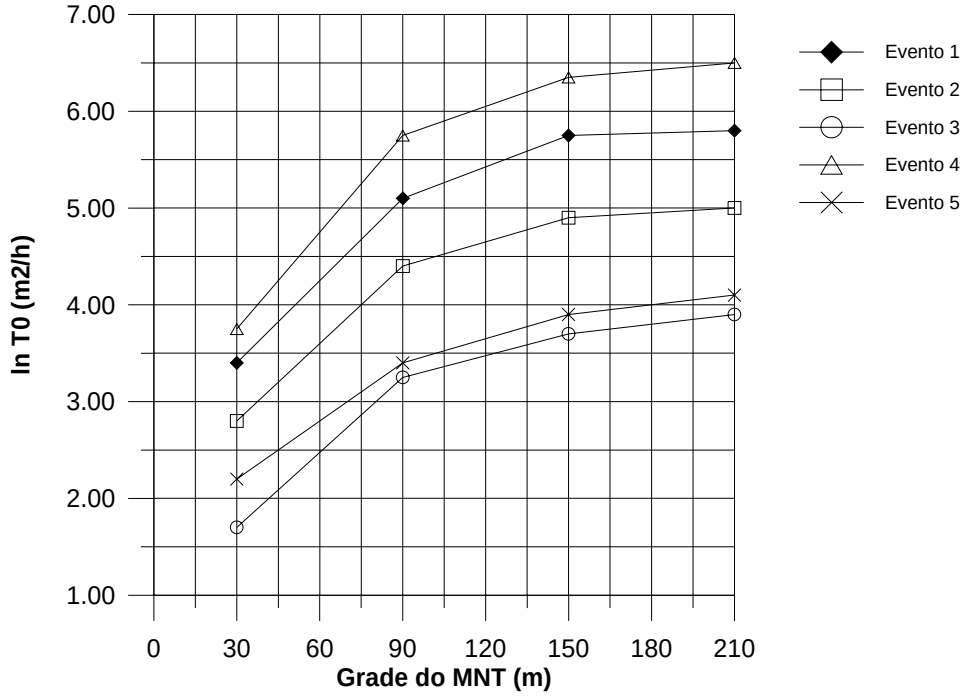


Figura 5.17- Estimativa do parâmetro T_0, para 5 eventos

A variação no parâmetro T_0 foi bastante pronunciada tanto para os diferentes eventos como para o tamanho da grade do MNT, sendo observada neste caso uma tendência à variações cada vez menores a medida que a resolução espacial do MNT diminui, como apresentado na figura acima.

A partir dos resultados mostrados na tabela 5.2, estimativas do parâmetro *m* e na figura 5.17 pode-se observar que os valores dos dois principais parâmetros do modelo, *m* e T_0 apresentaram variações em relação aos diferentes eventos chuvosos considerados e em particular a transmissividade T_0, mostrou grande variação em função da resolução espacial da grade do MNT.

5.2.3 Parâmetros *CHV* e *RV*

Na estrutura de cálculo do TOPMODEL o parâmetro *CHV* se refere à velocidade de viagem no canal principal e *RV* às velocidades nos canais das sub-bacias. Nesta aplicação do modelo a área total da bacia foi dividida em 3 sub-áreas que são mostradas na figura 5.18. A velocidade *CHV* , nesta divisão da área total da bacia, foi atribuída ao escoamento em canal na sub-área 1 enquanto que o valor de *RV* foi aplicado às sub-áreas 2 e 3.

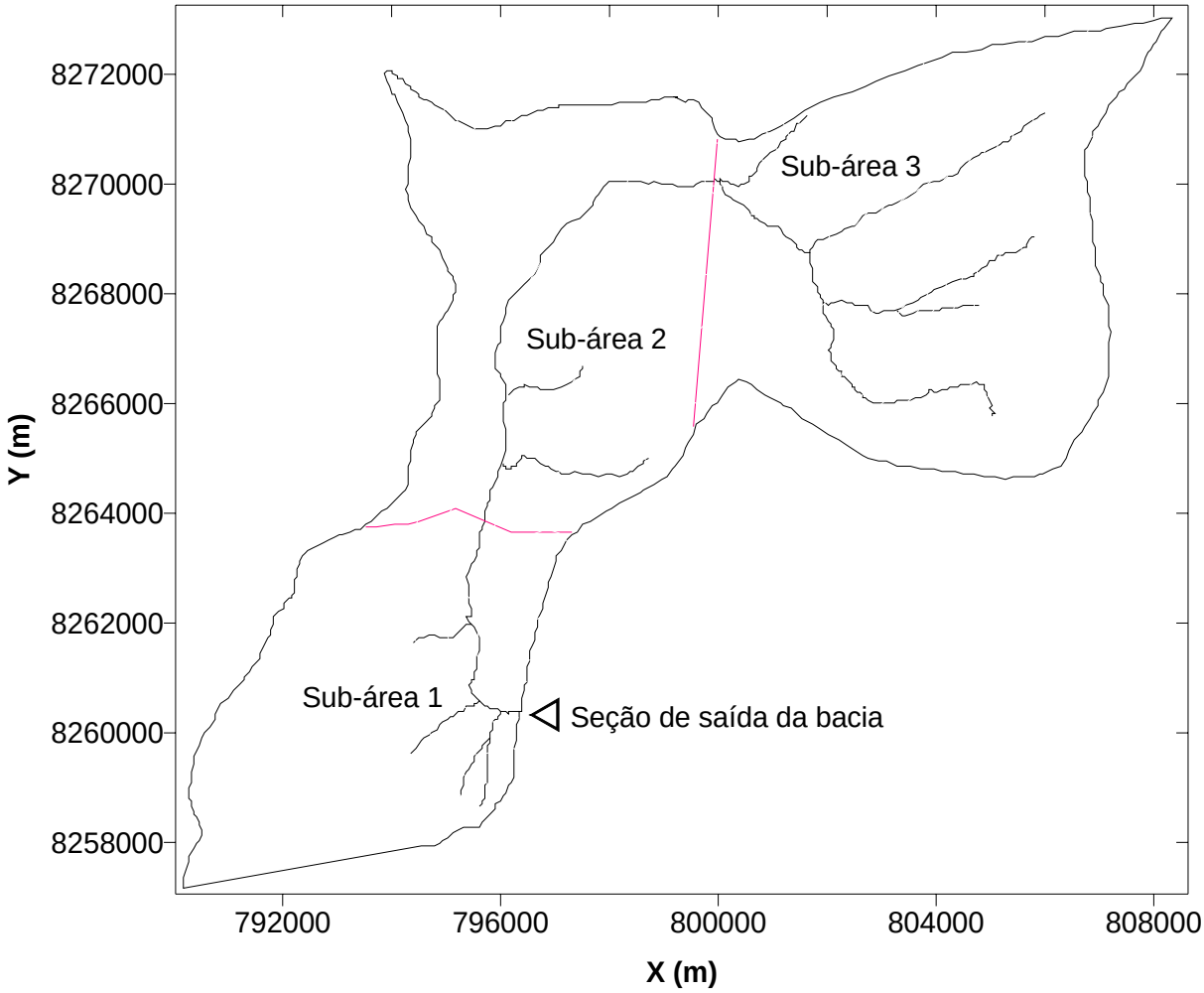


Figura 5.18- Divisão da bacia em sub-áreas

Os valores destes dois parâmetros de velocidade influenciam o tempo ao pico calculado pelo modelo, que independe da resolução espacial utilizada no MNT, isto é, *CHV* e

RV , são utilizados no cálculo do tempo gasto destas sub-áreas até a seção de saída da bacia, cálculo este que independe do volume transportado.

O evento 1 apresentou tempo ao pico observado ocorrendo 34 horas após início do evento e o calculado a 35 horas. Assim, para se eliminar ou minimizar esta diferença foi feito um estudo sobre os valores de tempo ao pico calculados pelo modelo para cada par de valores dos parâmetros de velocidade. Utilizou-se 3 valores de *CHV* , 1,0, 1,25 e 2,5 km/h e 8 valores de *RV* , compreendidos entre 0,9 à 3,6 km/h, analisando o fator *E* (coeficiente de Nash e Sutcliffe) e o tempo ao pico resultantes, os quais são mostrados na tabela 5.3. Estes resultados foram obtidos com dados de índice topográfico obtidos a partir de resolução espacial do MNT de 30 m. Outros tamanhos de grade também poderiam ser sido utilizados e produziriam resultados idênticos.

Tabela 5.3- Efeito dos parâmetros de velocidade nos valores do Fator E e do tempo ao pico

RV	***CHV* = 1,0 km/h**		***CHV* = 1,25 km/h**		***CHV* = 2,5 km/h**	
(km/h)	***E***	**Tpico (h)**	***E***	**Tpico (h)**	***E***	**Tpico (h)**
0,9	0,285	35	0,424	34	0,349	32
1	0,305	35	0,445	34	0,371	32
1,2	0,333	35	0,484	34	0,432	32
1,5	0,346	35	0,511	34	0,473	32
1,8	0,343	35	0,520	34	0,486	32
2	0,339	35	0,519	34	0,490	32
3	0,277	35	0,488	34	0,535	32
3,6	0,269	35	0,511	34	0,584	32

Assim, a velocidade no canal principal, *CHV* , que resulta em iguais valores de tempo ao pico, calculado pelo modelo e observado é igual a 1,25 km/h, enquanto que *RV* , que resultou em maior valor do coeficiente E de Nash e Sutcliffe, 0,520, foi 1,8 km/h. Os hidrogramas observado e o modelado, com os parâmetros estimados são mostrados na figura 5.19.

Estes valores para os parâmetros *CHV* e *RV* garantiram, para este evento, a coincidêndia dos picos observado e calculado pelo modelo, no entanto persistiu o atraso no ramo ascencional, que reflete o início do aumento da vazão na seção de saída da bacia.

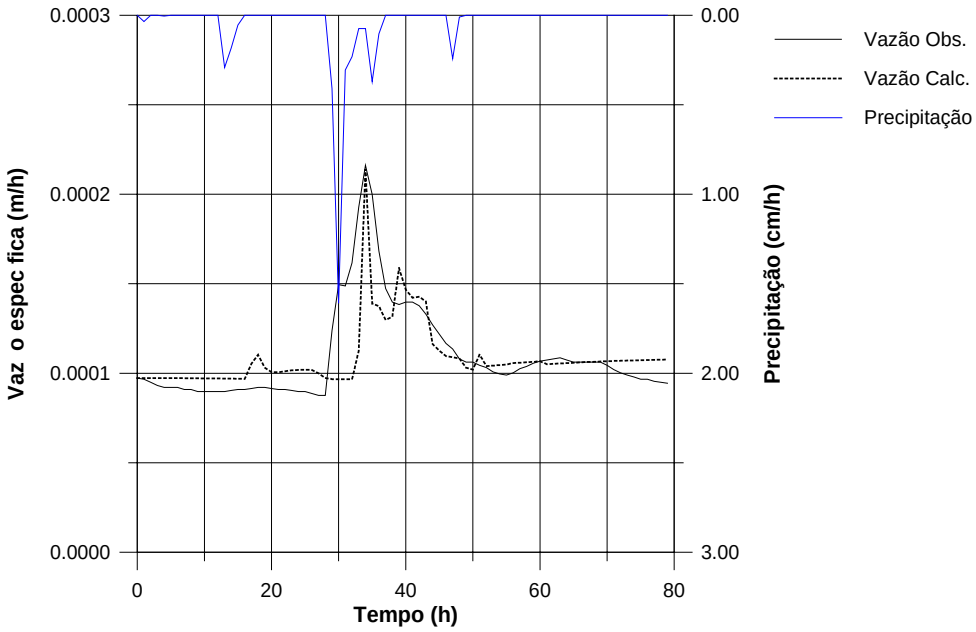


Figura 5.19- Hidrogramas calculado e observado para evento 1 grade do MNT de 30m

O mesmo procedimento adotado para o evento 1 foi repetido para os demais, obtendo-se os resultados resumidos na tabela 5.4 abaixo.

Tabela 5.4- Valores dos parâmetros de velocidade *CHV* e *RV*

Evento	CHV (km/h)	RV (km/h)	Vazão máxima (m/h)
1	1,250	1,800	0,000216
2	2,500	1,500	0,000319
3	0,625	1,800	0,000147
4	1,250	0,900	0,000213
5	2,500	1,800	0,001066

5.2.4 Valores finais dos parâmetros

A tabela 5.5 resume os valores de todos os parâmetros obtidos na calibração do modelo TOPMODEL para a bacia do rio Descoberto, utilizando cinco eventos chuvosos isoladamente.

Tabela 5.5- Valores dos parâmetros do modelo

Evento	Parâmetro	Resolução Espacial do MNT (m)			
		30	90	150	210
Evento1	T_0 (m^2/h)	3,40	5,10	5,80	5,60
	m (m)	0,10	0,12	0,12	0,12
	CHV (km/h)	1,25	1,25	1,25	1,25
	RV (km/h)	1,80	1,80	1,80	1,80
Evento2	T_0 (m^2/h)	2,80	4,40	4,90	5,00
	m (m)	0,14	0,18	0,16	0,16
	CHV (km/h)	2,50	2,50	2,50	2,50
	RV (km/h	1,50	1,50	1,50	1,50
Evento3	T_0 (m^2/h)	1,70	3,25	3,70	3,90
	m (m)	0,14	0,14	0,16	0,16
	CHV (km/h)	0,63	0,63	0,63	0,63
	RV (km/h	1,80	1,80	1,80	1,80
Evento4	T_0 (m^2/h)	3,75	5,75	6,35	6,50
	m (m)	0,16	0,12	0,12	0,14
	CHV (km/h)	1,25	1,25	1,25	1,25
	RV (km/h	0,90	0,90	0,90	0,90
Evento5	T_0 (m^2/h)	2,20	3,40	3,90	4,10
	m (m)	0,15	0,18	0,18	0,18
	CHV (km/h)	2,50	2,50	2,50	2,50
	RV (km/h	1,80	1,80	1,80	1,80

Os valores apresentados nesta tabela indicam que o modelo é bastante sensível ao parâmetro T_0, transmissividade lateral quando o solo está saturado. Observa-se também que os valores obtidos na calibração do modelo para este parâmetro, dependem diretamente da resolução espacial do modelo numérico do terreno, o que foi verificado para todos os eventos utilizados na calibração.

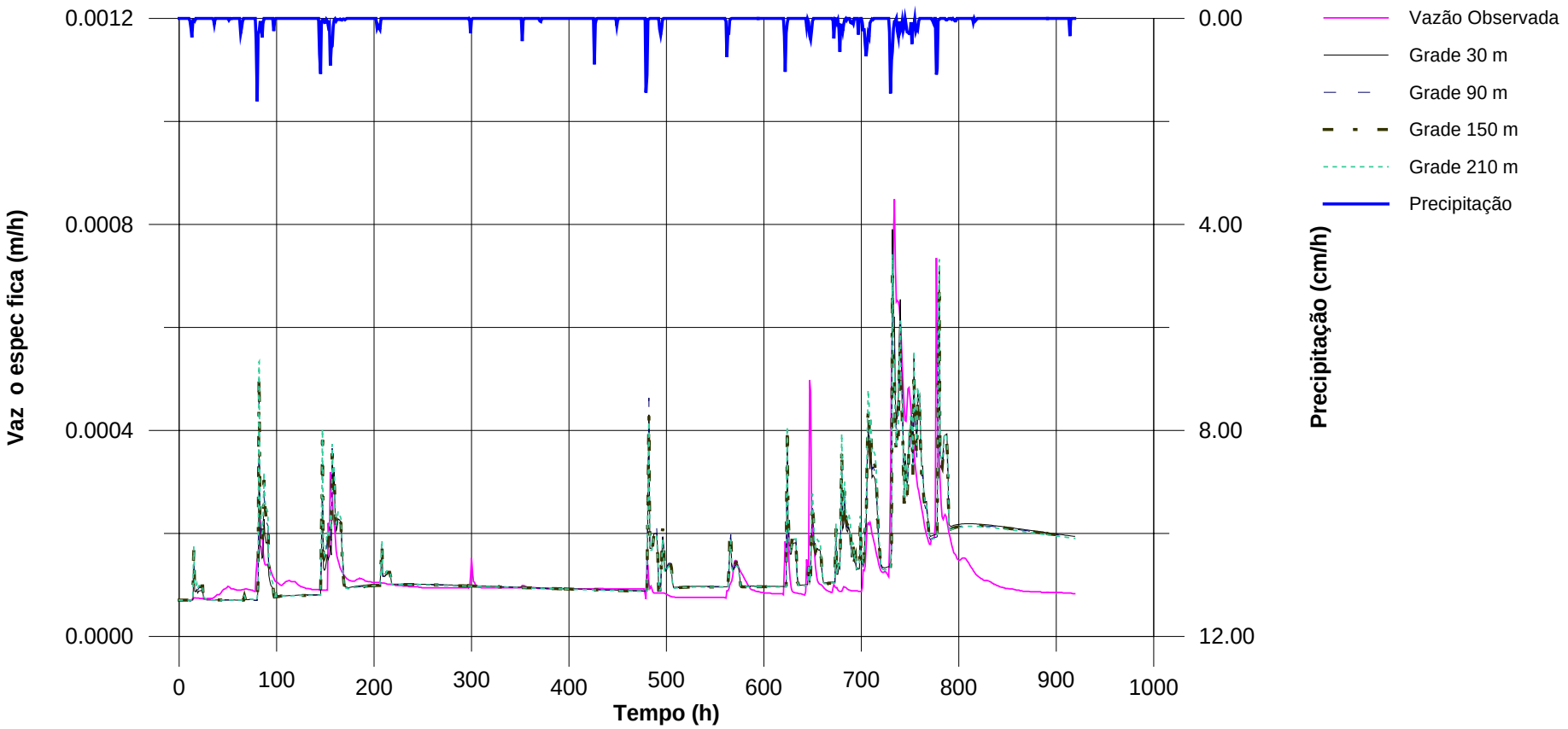
O parâmetro *m*, que está relacionado com a forma do ramo recessivo do hidrograma, apresentou variação muito pequena com relação à resolução espacial do MNT, para cada um dos eventos estudados. A variação dos valores médios deste parâmetro entre os cinco eventos foi ligeiramente superior àquela.

O parâmetro de velocidade *RV*, em 3 dos 5 eventos, foi estimado em 1,80 km/h, em um evento 1,50 km/h e somente em um deles foi estimado em 0.90 km/h. Já o parâmetro de velocidade *CHV* apresentou maior variação, chegando a um valor estimado máximo de 2,50 km/h para o evento 5, que foi o que apresentou os maiores valores de vazão de pico.

Na figura 5.20 pode-se observar o resultado da aplicação do modelo à serie completa de dados, 920 horas. As curvas para as quatro resoluções espaciais estudadas foram colocadas num mesmo gráfico para mostrar que se obtém, praticamente, o mesmo resultado para distintos conjuntos de parâmetros estimados em função da resolução espacial. Optou-se pelo emprego do conjunto de parâmetros obtidos na calibração com o evento 5, pois foi neste evento que se obteve o valor do parâmetro m que mostrou o melhor ajuste ao ramo recessivo do hidrograma, especialmente para os maiores picos de vazão.

Da mesma forma, os parâmetros de velocidade que apresentaram melhor ajuste para os tempos ao pico foram obtidos neste mesmo evento.

Nas simulações realizadas, obteve-se ajustes razoaveis para volume, para o valor da vazão máxima de pico e tempo de pico, no entanto, no entanto os valores de E resultantes foram pequenos indicando que o modelo não conseguiu reproduzir fielmente a forma do hidrograma.



Fi.gura 5.20 Simulação - Bacia rio Descoberto, 1988

Antes de aplicar o modelo calibrado é interessante observar que pode-se identificar na figura 5.20 alguns resultados que merecem comentário. Por exemplo, para os tempos de aproximadamente 145 e 155 h contados à partir do inicio da série de dados, ocorreram precipitações de 0,011 e 0,0093 m/h, respectivamente, observando-se apenas um pico de vazão específica em resposta ao mesmos. Por outro lado, o TOPMODEL produziu como resposta, dois picos de vazão, sendo que para o segundo deles a vazão de pico equivale à observada.

Com a calibração dos parâmetros do modelo, baseada em dados das estações localizadas na região da bacia do rio Descoberto em 1988, com as observações feitas acima com relação aos possíveis efeitos destas distorções nos valores dos parâmetros, pode-se então aplicar o modelo para simular uma série de dados de vazões registradas entre 17 de março e 23 de abril do ano de 1995.

5.3 Simulação

Para se aplicar o modelo TOPMODEL aos dados de 1995, inicialmente, uma imagem do satélite Landsat -TM da área de estudo foi classificada identificando as transformações ocorridas no período em relação aos tipos de cobertura, com o objetivo de calcular os fatores de correção para evapotranspiração pela metodologia anteriormente discutida

Para se fazer a verificação da validade dos valores dos parâmetros obtidos na calibração, foram utilizados dados de precipitação, evaporação e vazão obtidos nas estações de medida anteriormente mencionadas, no ano de 1995. Os dados abrangeram um período contínuo total de 905 horas , havendo um período de 104 h iniciando à zero hora do dia 30 de março e terminando às 8:00 h de 03 de abril, para o qual não se tinha registro nem de vazão e nem de precipitação Esta foi considerada nula no período e os valores de vazão foram calculados normalmente com auxílio da curva chave, obtidos admitindo que no período o nível da água do rio variou linearmente.

As figuras 5.21 a 5.24 apresentam os hidrogramas observado e simulado, incluindo neste último uma curva cujos valores foram calculados utilizando os parâmetros obtidos na calibração do modelo com dados do ano de 1988 e outra em que o parâmetro T_0 foi alterado de modo a corrigir os valores máximos dos picos de vazão específica.

Inicialmente deve-se notar nestas figuras que as vazões de pico calculadas pela modelo usando os parâmetros calibrados com eventos de 1988, são, em sua maioria superiores as registradas na estação. Estes valores das vazões dos picos apresentaram valores crescentes com relação às resoluções espaciais do MNT, por exemplo, para tempo igual a 56 h foi observado um pico de vazão específica de 0,00032 m/h. O valor calculado para a grade de 30 m foi de 0,0003781 m/h, enquanto que para as demais grades, 90, 150 e 210 m os valores gerados pelo modelo foram de 0,0004078, 0,0004422 e 0,0004668 m/h respectivamente. Para outros picos de vazão, como pode ser observado nestas figuras, este comportamento do modelo calcular valores de vazões específicas maiores que as observadas se repete.

Para se melhorar o ajuste entre valores calculados e observados foi necessário alterar os valores do parâmetro T_0 para cada uma das resoluções espaciais utilizadas na geração do MNT, conforme mostrado na tabela abaixo.

Tabela 5.6- Valores de T_0 estimados

Resolução Espacial do M NT (m)	**Valores Estimados de ln T_0 para o ano1988 (m^2/h)**	**Valores Estimados de ln T_0 para o ano1995 (m^2/h)**
30	2,2	2,4
90	3,4	4,2
150	3,9	4,8
210	4,1	4,9

Independentemente da resolução espacial adotada nos 4 modelos numéricos do terrenos, pode-se observar que a partir do tempo igual a 320 h, aproximadamente, as vazões calculadas pelo modelo foram superiores às observadas, que praticamente assumem, na ausência de precipitação, um valor constante de 0,0000810 m/h. A diferença entre as vazões que inicialmente era de .0000352 m/h foi diminuindo com o tempo, devido principalmente à evapotranspiração.

Esta diferença não foi notada nos resultados obtidos na estimativa dos valores dos parâmetros que foi feita na calibração do modelo, utilizando os dados referentes a 1988, tendo-se observado, ao contrário um perfeito ajuste entre vazões observadas e calculadas em período de aproximadamente 280 h com valores muito pequenos de precipitação.

O modelo, como era de se esperar, se comportou da mesma forma que na calibração, ou seja, reagiu praticamente à todos os eventos chuvosos, embora em alguns casos foram registrados pequenos picos de vazão para os quais o modelo não apresentou resposta.

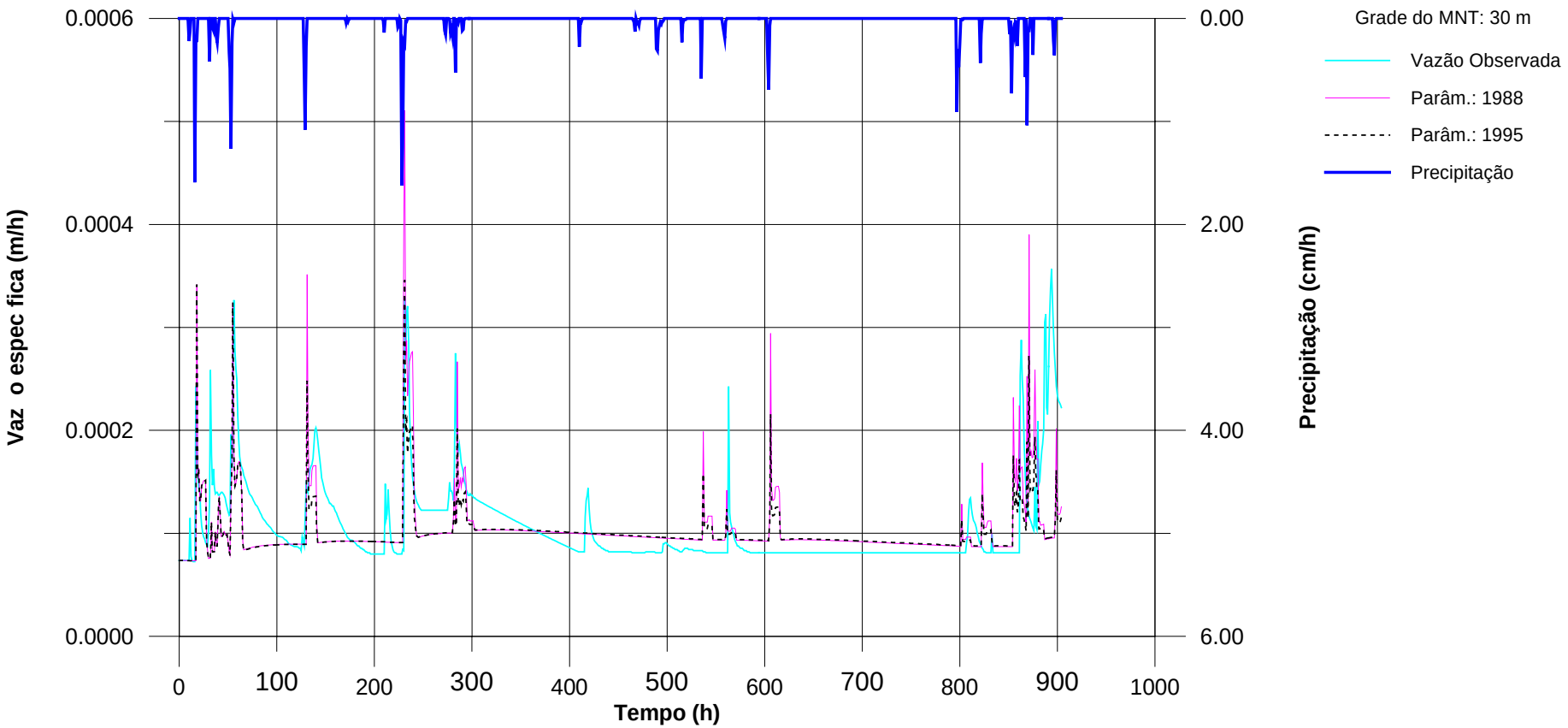


Figura 5.21- Simulação - Bacia rio Descoberto, 1995 - Resolução espacial do MNT: 30m

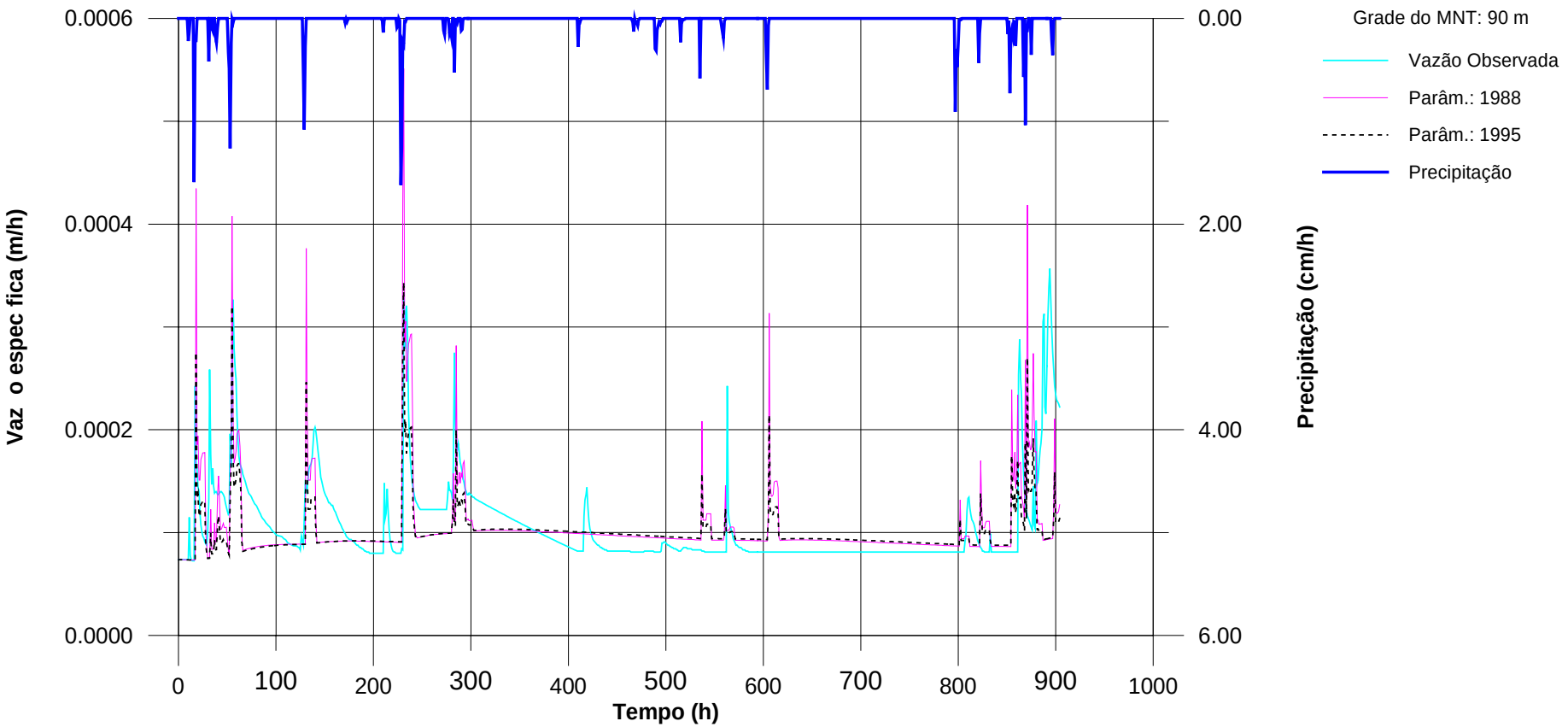


Figura 5.22- Simulação Bacia rio Descoberto, 1995 - Resolução espacial do MNT: 90m

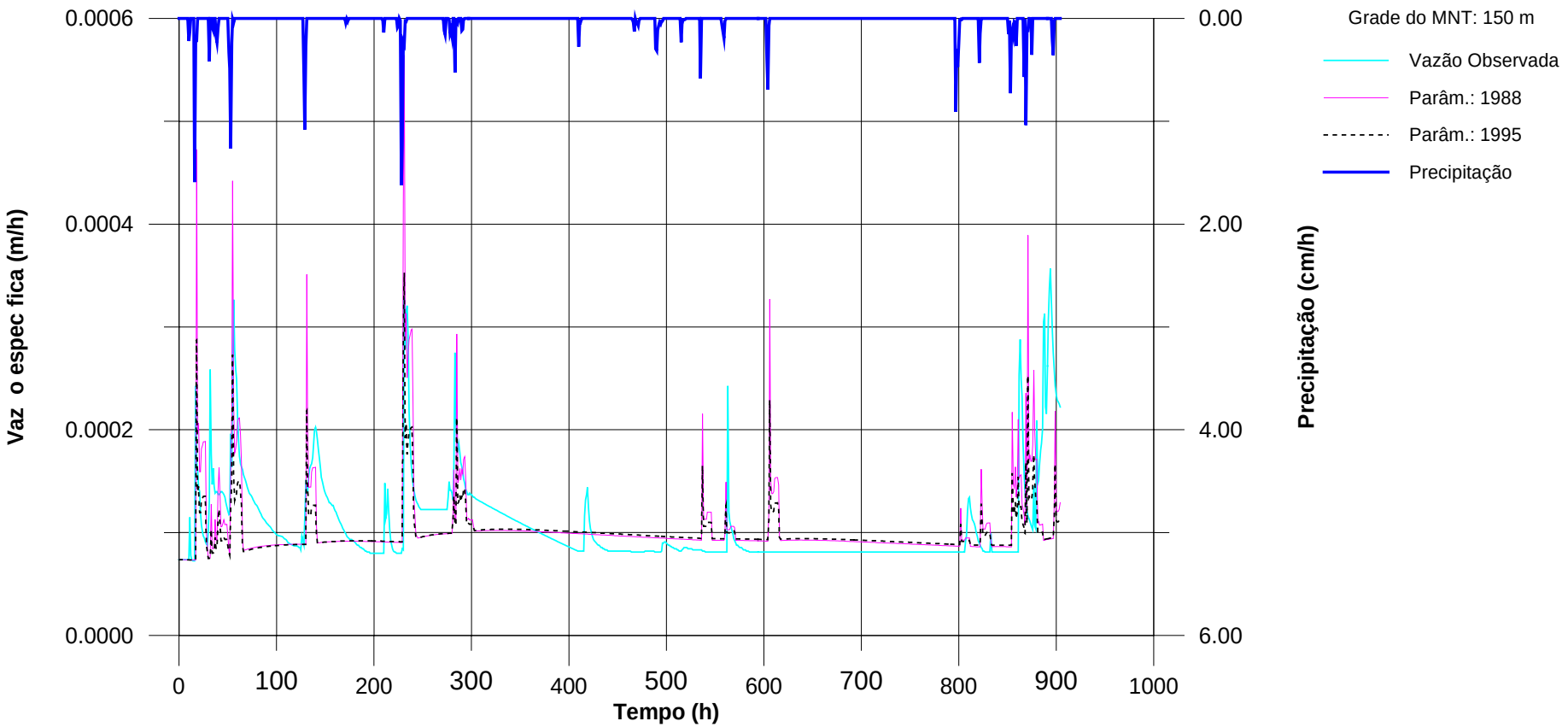


Figura 5.23- Simulação - Bacia do rio Descoberto, 1995 - Resolução espacial do MNT: 150m

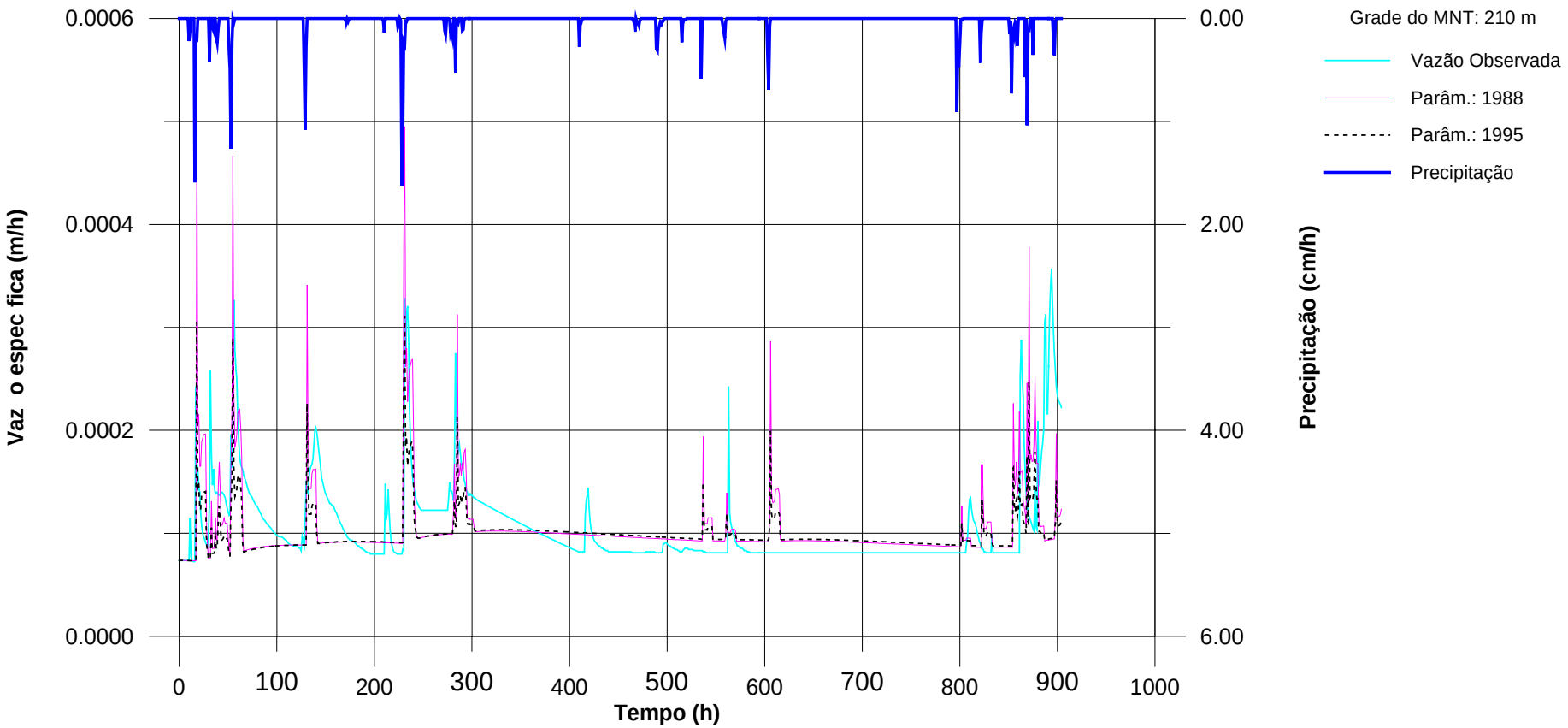


Figura 5.24- Simulação - Bacia rio Descoberto, 1995 - Resolução espacial do MNT: 210m

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi aplicado o modelo chuva-vazão TOPMODEL à bacia do rio Descoberto a montante do lago de mesmo nome, situada no Distrito Federal, com o objetivo de avaliar o desempenho global do modelo, identificando as dificuldades na sua aplicação além de aproveitar as potencialidade que as técnicas de geoprocessamento oferecem para aquisição e manipulação de dados e informações espaciais. Para tanto, foram feitos inicialmente estudos de sensibilidade do modelo aos vários parâmetros, identificando-se aqueles que mais influenciam nos valores das vazões calculadas pelo mesmo. A partir destas informações o modelo foi calibrado, estimando-se os valores de todos os parâmetros, utilizando dados referentes a diversos eventos registrados no ano de 1988. Esta estimativa levou em consideração a resolução espacial do modelo numérico do terreno, obtendo-se um conjunto de valores dos parâmetros para cada uma das resoluções espaciais considerada. Finalmente o modelo foi aplicado com a intenção de verificar seu funcionamento, utilizando-se dados registrados em eventos ocorridos em 1995.

O TOPMODEL é um modelo que possui reduzida quantidade de parâmetros e poucos apresentam influências significativas nos resultados. Nesta aplicação do modelo, os parâmetros que mais influenciaram a forma e o valor de vazão de pico do hidrograma foram T_0 e m, enquanto que os parâmetros de velocidade CHV e RV alteraram o tempo ao pico.

Como o número de parâmetros é pequeno o trabalho de determinação de seus valores não apresentou dificuldades, sendo por outro lado, facilitado pela adição ao programa de uma rotina que permite que o mesmo processe conjuntos de valores dos parâmetros, gerando arquivos de resultados estruturados no formato de planilhas eletrônicas de cálculo.

O parâmetro m foi determinado preliminarmente através da variação da vazão de base com o tempo resultando em 0,10 m. Na calibração, utilizando vinte alternativas, o valor médio obtido foi de 0.15 m e que, praticamente, não sofreu influência significativa da resolução espacial MNT. Finalmente, o valor de m foi aumentando para 0,18 m em função deste valor ter sido o que melhor representou o ramo recessivo do hidrograma, particularmente para os eventos de maior intensidade. Este valor de m é bastante alto quando comparado aos citados na bibliografia 0.002 m no trabalho de Mine e Clarke (1996), 0,032 m

na bibliografia de referência do TOPMODEL Beven et al. (1994), 0,02 m aplicação do modelo feita por Saulnier (1996) e por Holko e Lepistö (1996), sendo somente igualado, como extremo superior da faixa de valores citada por Horneberger et al.(1985).

Dos parâmetros, T_0 é o que apresentou maior variação de valores, apresentando dependência em relação à resolução espacial do modelo numérico do terreno. Os valores deste parâmetro obtidos para as maiores resoluções espaciais do MNT foram os menores indicando que, para se atingir o objetivo dos parâmetros do modelo representarem propriedades físicas deve-se gerar o MNT com a maior resolução possível, para com isso obter a distribuição do índice topográfico que melhor descreva a realidade topográfica do terreno.

Na simulação aplicada à série contínua de dados (905 h) observados entre março e abril de 1995, utilizando no modelo valores dos parâmetros determinados para o ano de 1988, verificou-se um aumento dos picos de vazão específica. Para se diminuir as diferenças entre picos de vazão calculados e observados, foi necessário alterar os valores de T_0 conforme mostrado na tabela 5.6. As correções dos valores deste parâmetro foram relativamente grandes para as menores resoluções espaciais do MNT, ultrapassando os 100 % para as grades de 150 m e 210 m, enquanto que para a maior resolução espacial empregada, 30 m, foi de aproximadamente 10 %. Estas alterações nos parâmetros indicam que ocorrem transformações nas características da bacia com relação a cobertura e uso do solo.

Constata-se nos hidrogramas obtidos para o ano de 1995, para todas as resoluções espaciais do MNT, que os valores de vazão observados são menores que os calculados. Na utilização de água do rio para irrigação pode-se obter uma das possíveis explicações para a ocorrência de valores de vazões calculadas maiores que as observadas, embora não se disponha de informações para comprovar esta afirmação. O aumento de área cultivada foi verificado através da classificação das imagens do satélite Landsat-TM para os dois anos estudados, utilização esta que se verifica até o presente momento.

O aumento da área cultivada poderia indicar um aumento no fator utilizado no cálculo da evapotranspiração potencial, o que implicaria numa diminuição da vazão do rio. A alteração no valor deste fator foi muito pequena, pois para a área de cerrado que foi

transformada em área cultivada assumiu-se o mesmo fator de conversão de evaporação para evapotranspiração que a classe de cobertura vegetação na qual as áreas cultivadas estão inseridas.

Um índice sugerido por Beven (1994) para determinar a qualidade do ajuste é o fator E. Mais do que um índice da qualidade global do ajuste, este fator quantifica o desvio entre as vazões calculadas e as observadas, representando a capacidade do modelo de reproduzir a forma do hidrograma. Nas diversas simulações realizadas, obteve-se ajustes razoavelmente precisos em termos de volume, vazão de pico e tempo de pico. No entanto, nestas simulações os valores de E foram pequenos, indicando que o modelo não consegue reproduzir fielmente a forma do hidrograma.

Desta forma, de acordo com os resultados obtidos, no caso da bacia do Rio Descoberto, esta versão do TOPMODEL seria mais apropriada para aplicações em estudos de enchentes onde interessa particularmente a vazão de pico, tempo ao pico e volume total mais do que a forma do hidrograma.

É importante destacar que o TOPMODEL, embora concebido como distribuído, apresenta algumas simplificações uma vez que determinados parâmetros e variáveis são assumidos como homogêneos em toda a bacia. Exemplo disto, observa-se com a precipitação e a evapotranspiração. O cálculo da profundidade do lençol freático, que é usado na determinação das áreas onde ocorre a saturação do solo, é feito de forma discretizada considerando áreas homogêneas que possuem o mesmo valor de índice topográfico. Desta forma pode-se dizer que o TOPMODEL é um modelo híbrido, podendo incorporar diferentes graus de discretização para variáveis e parâmetros.

Finalmente, deve-se ressaltar a importância de se ter uma maior atenção na determinação dos valores dos parâmetros m e T_0, para os quais o modelo apresentou maior sensibilidade. Em particular, os valores do parâmetro T_0 estimados na calibração do modelo dependem da resolução espacial do modelo numérico do terreno. Observou-se que as maiores resoluções do MNT influenciam em menor grau o valor do parâmetro T_0.

É também desejável que se trabalhe com a bacia de forma mais distribuída possível, dividindo-a em sub-bacias que apresentem maior homogeneidade em termos de cobertura de solo, aprimorando assim os cálculos de evapotranspiração e infiltração e portanto do balanço hídrico como um todo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, M.G. e Burt, T.P. (eds). (1990). *Process Studies in Hillslope Hydrology.* John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra.

Bathurst, J.C.e O'Connell, P.E (1991). Future of distributed modelling: the Systeme Hydrologique Europeen. In: Beven, K.J. e Moore, I.D. (eds). *Advances in Hydrological Processes - Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 213-225.

Becker, A. (1993). Application of geographical information system. In: K.Kovar e Nachtnebel, H.P. (eds.) *Hydrology and Water Resources Management.*. IAHS Publ. 211, 97-111.

Berthelot, R. (1970). *Curso de Hidrologia Sintética.* Mestrado em Hidrologia Aplicada. IPH-UFRGS.

Beven, K.J. (1984). Infiltration into a class of vertically non-uniforrm soils. *Hydrol.Sci.J.*, **29**, 425-434.

Beven, K.J. (1986). Hillslope runoff processes and flood frequency characteristics. In: Abrahams, A.D. (ed.) *Hillslope Processes.* Allen and Unwin, Boston, E.U.A., 187-202.

Beven, K.J. (1989). Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. *J. Hydrol.*, **105**, 157-172.

Beven, K.J., Quinn, P., Romanowicz, R., Freer, J., Fisher, J. e Lamb, R. (1994). Topmodel and gridatb Distribution Programs - A users guide to the distribution versions (94.01).*CRES Technical Technical Report TR110/94*, Lancaster University,UK.

Binley, A., Elgy, J. e Beven, K.J. (1989a). A physically based model on heterogeneous hillslopes - 1. Runoff Production. *Water Resour.Res.,* **25**(6), 1219-1226.

Binley, A., Elgy, J. e Beven, K.J. (1989b). A physically based model on heterogeneous hillslopes - 2. Effective hydraulic conductivities. *Water Resour.Res.*, **25**(6), 1227-1233.

Burnash, R.J.C., Ferrel, R.L. e McGuire, R.A. (1973). *A general streamflow simulation system conceptual modeling for digital computers. Report by the Joint Federal State River Forecasting Center*, Sacramento,California, E.U.A.

Cabral, M.C., Bras, R.L., Tarboton, D., Entekhabi, D.(1990). *A distributed, physically-based, rainfall-runoff model incorporating topography for real-time flood forecasting. Ralph Parsons Laboratory-Hydrology and Water Resource Systems*, Rep 332, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, E.U.A.

Charbeneau, R.J. (1984). Kinematic models for soil moisture and solute transport. *Water Resour.Res.,* **20**(6), 699-706.

Clarke, R.T. (1973). A review of some mathematical models used with observations on their calibration and use. *J. Hydrol.,* **19**, 1-20.
Cordova, J.R. e Rodrigues-Iturbe, I. (1983). Geomorphologic estimation of extreme flow probabilities. *J. Hydrol.,* **65**, 159-173.

Dooge, J.C. (1985). Hydrological modelling and the parametric formulation of hydrological processes on a large scale. *WCP-Publ.Ser.Nº 96, WMO/TD - Nº 43*, Geneva.

Dunne, T. (1978). Field studies of hillslope flow processes. In: M.J. Kirkby (ed.) *Hillslope Hydrology*. John Wiley, New York, E.U.A.,227-293.

Franchini, M. e Pacciani, M. (1991). Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models. *J. Hydrol.,* **122**, 161-219.

Franchini, M. e Todini, E. (1987). Il modello Xinanjiang per el calcolo dell'assorbimento superficiale. *VIII Corso di aggiornamento in "Tecniche per la difesa dall'inquinamento"*. Univ.della Calabria, Cosenza, Itália.

Franchini, M., Wendling, J., Obled, C. e Todini, E. (1996). Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *J. Hydrol.,* **175**, 293-338.

Freeze, R.A. (1980). A stochastic-conceptual analysis of rainfall-runoff process on a hillslope. *Water Resour.Res.,* **16**(2), 391-408.

Jensen, K.H. e Mantoglou, A. (1991). In: Beven, K.J. e Moore, I.D. (eds). *Advances in Hydrological Processes - Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology.* John Wiley & Sons, Chichester, England, 203-211.

Holko, L. e Lepistö, A. (1997). Modelling the hydrological behaviour of a mountain catchment using TOPMODEL. . *J. Hydrol.,* **196**, 361-377.

Horton, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, **14**, 446-460.

Hornberger, G.M, Beven,K.J., Cosby, B.J. e Sappington, D.E. (1985). Shenandoah watershed study: Calibration of a topography-based, variable contributing area hydrological model to a small forest catchment. *Water Resour.Res.,* **21**(12), 1841-1850.

Kirkby, M.J. (1975). Hydrograph modelling strategies. In: Peel,R.,Chisholm,M. e Haggett,P (eds). *Process in Physical and Human Geography.* Heinemann, 69-90.

Kirkby, M.J.(1988). Hillslope runoff process and models. *J. Hydrol.,* **105**, 157-172.

Kirkby, M.J., Naden, P.S., Burt, T.P. e Butcher, D.P. (1987). *Computer Simulation in Physical Geography*, John Wiley & Sons, New York, E.U.A.

Machado, E.S. e Righetto, A.M. (1981). Modelo hidrológico determinístico para bacias urbanas. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Fortaleza-CE. Anais.*ABRH, São Paulo, **3**, 561-580.

Maison, P., Pinheiro,A e Caussade, B. (1997). Modelização Hidrológica de base física e o uso do SIG. *XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória-ES.*

Mine, M.R.M. e Clarke,R.T. (1996). O uso do TOPMODEL em condições brasileiras: Resultado preliminar. *RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos,* **1**(2), 89-105.

Moore, I.D., Grayson, R.B. e Ladson, A.R. (1991). Digital terrain modelling: Hydrological , geomorphological, and biological; applications. *Hydrological Processes,* **5,** 3-30.

O'Connell, P.E. e Todini, E. (1996). Modelling of rainfall, flow and mass transport in Hydrological systems: an overview. *J. Hydrol.,* **175**, 3-16.

Pinto, N.L.S., Holtz, A.C.T., Martins, J.A. e Gomide, F.L.S.(1976). *Hidrologia Básica*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil.

Porto, R., Zanho, K. e Gikas, A.N. (1993). ABC-3 Análise de cheias complexas. Manual do usuário. *Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica.* São Paulo.

Quinn, P., Beven, K.J., Chevallier, P. e Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes,* **5,** 59-79.

Rockwood, D.M., Davis, E.D. e Anderson, J.A. (1972). User manual for COSSARR Model. *U. S. ArmyEngineering Division*, North Pacific, Portland, Oregon, E.U.A.

Saulnier, G.M. (1996). Information pedologique spatialisee et traitementes topographiques ameliores dans la modelisation hydrologique par TOPMODEL. Tese de Doutorado, *Institut National Polytechnique de Grenoble,* França.

Sittner, T.W., Schauss, E.C. e Monro, J.C. (1969). Continuous Hydrograph synthesis with an API type hydrological model. *Water Resour.Res.,* **5**(5), 1007-1022.

Sivapalan, M., Beven, K. e Wood, E.F. (1987). On hydrologic similarity - 2. A scaled model of storm runoff production. *Water Resour.Res.,* **23**(12), 2266-2278.

Sugawara, M., Watanabe, I., Osaki, E. e Katsuyame, Y.(1983). *Reference manual for the TANK model. National Research Center for Disaster Prevention,* Tokyo, Japan.

Todini, E. (1988). Rainfall-runoff modeling - Past, present and future. *J. Hydrol.,* **100**, 341-352.

Tucci, C.E.M., Braga Jr., B.F.P. e Silveira, A.(1989). Avaliação do impacto da urbanização nas cheias urbanas. *RBE, Caderno de Recursos Hídricos,* **7**(1).

Valença, M.J.S. (1997). Aplicação de redes neurtais na áraea de recursos hídricos. *XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória-ES.*

Zhao, R.J. (1977). *Flood forecasting method for humid regions of China*. *East China College of Hydraulic Engineering,* Nanking, China.

ANEXO I

```
/*************************** CV98.CPP - Rev. Janeiro_1998 ***********************/

 //BIBLIOTECAS  CPP
 #include <iostream.h>//  objetos C++

 //BIBLIOTECAS C
 #include <process.h>
 #include <string.h>
 #include <stdlib.h>
 #include <stdio.h>
 #include <conio.h>
 #include <math.h>
 #include <ctype.h>
 #include <time.h>

 // PARÂMETROS:DEFINIÇÕES
 #define ESC 27
 #define maxin 1300//Nº de intervalos de tempo Descoberto 920 (maximo)
 #define maxln 33 // Nº de valores de ln(a/tanB). No Descoberto 30.
 /*Os valores de maxin e maxln foram redifinidos para atender as necessidades desta aplicação*/
 #define maxch 10
 #define para getch();

 //FUNÇÕES
 inline void msg0(int a){printf("\n\tErro Não abriu Arq:fp%d",a);}

 void            arq_saida(void),
                 encerra(void),
                 entrada(FILE *p),/*sub-rotina inputs(tpmodel) ponteiro p/ o arquivo $inputs.dat*/
                 hora(void),
                 init(FILE *p3, FILE *p4),//pont.p/$params & $output.dat
                 le_param(void),
                 loop(int x, char c),
                 max(void),
                 openarq(),
                 resultados(void),
                 results(FILE *p4),
                 simula(float varreal, char x),
                 t1(void),
                 titulo(void),
                 topmod(FILE *p4),//ponteiro p/ arquivo $output.dat
                 tread(FILE *p2);//ponteiro p/ arquivo $subcat.dat

 int             alter_params(void),
                 alteraln_atanb(void),
                 bloco1(void),
                 excel(void),
                 expinf(void),
                 label20(void),
                 otimiza(void),
                 processo(void);

//VARIAVEIS GLOBAIS
//       CONSTANTE INTEIRA
 const           TRUE = 1;

//       PONTEIROS PARA ARQUIVOS
 FILE             *fp[10],//Matriz de ponteiros para arquivos
                  *p4excel,//Formato MS Excel
                  *p4prm;//Para gravar valores de parâmetros
```

```
//          CARACTERES
 char               arq[10][12],// para guardar nomes de arquivos
                    arq_novo[12],
                    arq_excel[12],//alternativa para  o arq de saida
                    ch,//auxiliar
                    datebuf[9],//string para mostrar data
                    destempor[12],
                    destino[12],//excel
                    params[12],//acompanha destino com os valores dos parametros
                    ka,kab,//respostas a perguntas
                    num,  //resposta a pergunta
                    SUBCAT[30],//para o nome da sub-bacia
                    subcat1[2],// complemento da sub-bacia
                    timebuf[9],//string para mostrar hora na tela
                   *turbo = ".gph",//extensão de arquivo grafico
                   *prm = ".wri";

//          INTEIRAS
 int                bloc, //Retorno de bloco1()
                    flagarqnovo=0, flaginit,  flagexcel=0, flagotm,      flagatgb=0,//Bandeiras
                    IMAP,//IMAP=1 p/ saida de mapa otherwise==0,
                    IOUT,/*IOUT =0 saida mínima , =1 resumido;
                   e  =2 p/ saída a cada intervalo de tempo.*/
                    i,j,//contadores para  LOOPs.
                    ihour[maxln],/* Nº de passo de tempo para incremento de ln(a/tanB)*/
                    imax,//Tempo ao pico calculado
                    imaxobs,//Tempo ao pico observado
                    INFEX,//se==1 excesso de infiltração é calculado, se=0, Não
                    iSC, //Contador para sub-bacias
                   IT, IROF,//Contadores de topmdel(passa para expinf())
                    lab,//Retorno de  label20()
                    NAC,// Qttdde de valores de ln(a/tanb)
                    NCH,//Variavel que recebe o Nº de Canais da rede
                    ND,// Variável auxiliar
                    NR,// Variável auxiliar
                    NSC,// Nº de sub-bacias
                    NSTEP,//Numero de intervalos de tempo
                    respexcel, respotm,//Retorno das funções
                    s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12,s13,//sinalizadores
                    simu;//Informa à processo() que está em simula()

//          REAIS
float               AC[maxln], /* AC[NAC] fração da área da sub_bacia que
                    possui o respectivo valor ST[NAC] de ln(a/tanB)*/
                    ACH[maxch], /*ACH é distribuiçao acumulada de area com
                   a distância D da saida. Ex D[1] distancia da saida do
                   sub-bacia sendo ACH[1]=0*/
                    ACMAX,//Máxima área de contribuição p/Sub-bacia neste run
                    AR[20],//Auxiliar
                    AREA,// Fração da área total (area_sub_bac/area_tot_bac)
                    BAL,// Balanço de água na sub_bacia
                    CA[maxin],//auxiliar
                    CHV,//Velocidade de viagem no canal principal [m/h]
                    CUMF,//Infiltração acumulada
                    D[maxch],//Distância D da saida da bacia.
                    DF,//É incremento volumétrico de infiltração retorna em m/DT
                    DT,//Tamanho do passo de tempo( no exemplo 1 hora)
                    /* DTH, HF, XK0 +INFEX são usados no calculo Excesso de Infiltração */
                    DTH,//Mudança no conteúdo de água através da frente de molhamento
                    HF,//HF=Sucção da frente de molhamento[m]
```

```
                    indtop=1.00,// fator p alterar ln(a/tanB),.9= reduz 10%  1.1=aumenta em 10%
                    PE[maxin],//Dados de Evapotranspiração Potencial
                    Q0,/* O primeiro valor de descarga observado [m/time step]*/
                    Q[maxin],QOBS[maxin],//Vazão calculada e Vazão medida
                    QB, QOUT,//Calculo de  drenagem na Zona Saturada
                    R[maxin],// Dados de Chuva
                    REX,//Inflitration Excess Runoff(Green_Ampt)função expinf()
                    RINT,//Auxiliar
                    RV,//Velocidade de viagem / canais de sub_bacia [km/h]
                    SBAR,//Deficit medio na Su_Bacia, nível do lençol freático
                    SUZ[maxln],/*Armazenamento na Zona Não saturada  para cada incremento[m]*/
                    SR0,//Valor inicial do defict na zona das raízes [m]
                    SRMAX,//Max Armazenamento de Agua na zona das raízes [m]
                    SRZ[maxln],/*Deficit de armaz. Zona das Raizes p cada incremento de ln(a/tanB)*/
                    ST[maxln],//ST[NAC] = ln(a/tanB)*
                    SUM,//Auxiliares para somatoria
                    SUMAC,//Auxiliares para somatoria
                    SUMAE,//Valor de evapotranspiração real acumulada
                    SUMP,//Entrada acumulada de precipitação
                    SUMQ,//Valor acumulado de vazões de saida simuladas
                    SZM,//Valor de 'M' na equação de recessão QB=SZQ*exp(SBAR/M)
                    SZQ,//Por definicão: = T0*exp(-TL)=exp(T0-TL)
                   tarea,//SUM(áreas parciais de uma sub-bacia)
                    tempq, tempqobs,//maxima vazão calc, e obs
                    T0,//Valor  médio na bacia de ln(T0) [m^2/h]
                    TD,//Tempo resp.zona insat./unid. de defict armaz[h/m]
                    TL,//Cálculo total de área com ln(a/tanB)
                    varproc,//variável auxiliar
                   Vobs=0.00, Vcalc=0.00,//Integrais = Q[]*dt
                    XK0;//Condutividade hidráulica da superfície [m/h]

//          REAIS DE DUPLA PRECISÃO
double              F,CD, SZF,XKF,R2,TP, F1,F2, E;// Ultimos 3:Cálculos  Estatísticos

/***************************INÍCIO DE MAIN()*************************/
                                    int main(void)
{//inicio de MAIN, que é apenas um janela com o menu !
int         ret;
char      bx, gt;

clrscr();
while(TRUE)
{
cout<<"\n\n\t\t\t    UnB - MTARH\n";
cout<<"\t\t\t  MODELO TOPMODEL\n";
cout<<"  ----------------------------------------------------------------\n";
cout<<"\n\n\t   SELECIONE UMA OPÇÃO:  TECLE A PRIMEIRA LETRA !";
cout<<"\n\n\t [A]lterar parâmetros";
cout<<"\t\t [P]rocessar";
cout<<"\n\n\t [L]er parametros(Default)";
cout<<"\t [M]udar nome arq_saida";
cout<<"\n\n\t [I]mpressora";
cout<<"\t\t\t [H]elp";
cout<<"\n\n\t [R]esult(Qcalc)";
cout<<"\t\t [E]xcel/Graf";
cout<<"\n\n\t [O]timizar         ";
cout<<"\t\t [X]"          ;
cout<<"\n";
cout<<"\n\n\t\t\t TECLE [ESC] PARA SAIR: ";
bx=toupper(getch());
```

```
            switch(bx)
            {
            case 'A': alter_params();clrscr(); break;
            case 'P': ret=processo();clrscr();break;
            case 'L': le_param();clrscr();       break;
            case 'M': arq_saida();clrscr();break;
            case 'I': cout<<"\n\tAinda nao tem";getch();clrscr();break;
            case 'H': cout<<"\n\tAinda nao tem";getch();clrscr();break;
            case 'R': resultados();clrscr();break;
            case 'E': respexcel=excel();clrscr();break;
            case 'O': respotm=otimiza();le_param();clrscr();break;
            case 'x': cout<<"\nAinda nao tem";getch();clrscr();break;
            case ESC: encerra();break;
            default : cout<<"\n\t\t-> Opcao  Incorreta ! ";getch();clrscr();
            }
}
}/**************************FIM DE MAIN()************************/

/********************** Muda nome  do arquivo de saída **************/
                    void arq_saida(void)
 {

  do{
    clrscr(); t1();
            if(strlen(arq_novo)!=0)
            {//an=1;
            printf("\n\n\tO ARQ_SAIDA atual é %s. Quer Mudar o nome? ",arq_novo);
            }
            else
            {
            printf("\n\n\tO ARQ. saida atual é $output.dat. Quer Mudar o nome? ");
            }
    printf("\n\tTecle [s] - para Alterar ou [n] - Não alterar \n");
    ka=tolower(getche());
    }while ( (ka!='s') && (ka!='n'));
  if(ka =='s')
  {//if nº100
            do
            {
            clrscr();t1();
            printf("\n\n\t*Digite o novo nome do arquivo de resultados:");
            gets(arq_novo);
            printf("\n\t*O arquivo de resultados é agora:%s ",arq_novo);
            printf("\n\t*Esta Correto ? [s]-caso afirmativo  [n]-Caso negativo \n");
            kab=tolower(getche());
                    if(strlen(arq_novo)==0)
                    {
                     kab='n';printf("\n\tDigite um nome de arquivo válido ! pressione uma tecla");
                    para
                    }
   }while (kab!='s');
  }//fim do if nº100
  if(ka=='s')
  {
  printf("\n\n\n ATENÇÃO: SE VOCE DESEJAR QUE OS RESULTADOS DO ESTUDO SEJAM
GRAVADOS ");
  printf("\n          NO ARQUIVO [%s], RODAR -[P]rocessar NO MENU PRINCIPAL.",arq_novo);
  para
  }
}//fim de arq_saida
```

```
/****************** Cabeçalho, só 1ª linha  *********************/
                    void t1(void)
{  // Apresentação do Prg,              = ctrl C
 cout<<"  ------------------------------------------------------------  \n";
 cout<<"\                              - UnB - MODELO TOPMODEL -94.01-                  "<<"\n";
 cout<<"  ------------------------------------------------------------  \n";
} //terminou t1()

/******************alter_params(void)*********************/
                    alter_params(void)
{
char valor[15];
int ln, n;
do{
          cout<<"\n\tDeseja alterar o valor de algum parâmetro ? ";
          cout<<"\n\tTecle [s] - caso afirmativo ou [n] - Caso negativo \n";
          n=tolower(getche());
  }while (n!='n' && n!='s');
if(n=='n')return 0;
do{
          clrscr();
                    if( (SZM==0) && (RV==0) && (CHV==0))
                    {printf("\n\n\tOs valores de parâmetros ainda não foram lidos !");
                    printf("\n\tRodar [L]eitura de dados !");
                    para
                    return 0;
                    }
          cout<<"\n\n\tValores Parâmetros originais ou alterados(*ALT*) \n";
          cout<<"\n   ------------------------------------------------------------------------  ";
          printf("\n\t a)-SZM =%9.5f",SZM);if(s1==1)cout<<"[alt]";
          printf("\t\t b)-T0    =%9.5f",T0); if(s2==1)printf("[alt]");
          printf("\n\t c)-TD  =%9.5f",TD);if(s3==1)printf("[alt]");
          printf("\t\t d)-CHV   =%9.5f",CHV);if(s4==1)printf("[alt]");
          printf("\n\t e)-RV  =%9.5f",RV);if(s5==1)printf("[alt]");
          printf("\t\t f)-SRMAX =%9.5f",SRMAX);if(s6==1)printf("[alt]");
          printf("\n\t g)-SR0 =%9.5f",SR0);if(s7==1)printf("[alt]");
          printf("\t\t h)-INFEX =%3d",INFEX);if(s8==1)printf("[alt]");
          printf("\n\t i)-XK0 =%9.5f",XK0);if(s9==1)cout<<"[alt]";
          printf("\t\t j)-HF    =%9.5f",HF); if(s10==1)printf("[alt]");
          printf("\n\t k)-DTH =%9.5f",DTH);if(s11==1)printf("[alt]");
          printf("\t\t l)-Indtop=%9.5f",indtop);if(s12==1)printf("[alt]");
          printf("\n\t m)-Q0  =%9.5f",Q0);if(s13==1)printf("[alt]");
          cout<<"\n   ------------------------------------------------------------------------  ";
          printf("\n\tTecle a letra/Parametro p/ Alterar OU [ESC] p/ sair");
          n=tolower(getch());
          if(n != ESC)
                    switch(n)
                    {//abre o switch
                    case 'a':
                    printf("\n\tDigite novo valor de SZM: ");
                    gets(valor);SZM=atof(valor);s1=1;
                    break;
                    case 'b':
                    printf("\n\tDigite novo valor de T0: ");
                    gets(valor);T0=atof(valor);s2=1;
                    break;
                    case 'c':
                    printf("\n\tDigite novo valor de TD: ");
                    gets(valor);TD=atof(valor);s3=1;
                    break;
```

```
                    case 'd':
                    printf("\n\tDigite novo valor de CHV: ");
                    gets(valor);CHV=atof(valor);s4=1;
                    break;
                    case 'e':
                    printf("\n\tDigite novo valor de RV: ");
                    gets(valor);RV=atof(valor);s5=1;
                    break;
                    case 'f':
                    printf("\n\tDigite novo valor de SRMAX: ");
                    gets(valor);SRMAX=atof(valor);s6=1;
                    break;
                    case 'g':
                    printf("\n\tDigite novo valor de SR0: ");
                    gets(valor);SR0=atof(valor);s7=1;
                    break;
                    case 'h':
                    printf("\n\tDigite novo valor de INFEX: ");
                    gets(valor);INFEX=atoi(valor);s8=1;
                    break;
                    case 'i':
                    printf("\n\tDigite novo valor de XK0: ");
                    gets(valor);XK0=atof(valor);s9=1;
                    break;
                    case 'j':
                    printf("\n\tDigite novo valor de HF: ");
                    gets(valor);HF=atof(valor);s10=1;
                    break;
                    case 'k':
                    printf("\n\tDigite novo valor de DTH: ");
                    gets(valor);DTH=atof(valor);s11=1;
                    break;
                    case 'l':
                    ln=alteraln_atanb();if(indtop!=1.00)s12=1;
                    break;
                      case 'm':
                    printf("\n\tDigite novo valor de Q0: ");
                    gets(valor);Q0=atof(valor);s13=1;
                    break;
            }//fecha switch
}while (n != ESC);
return 1;
}/************* fim  de alter_params(void)*************/

/********************** titulo(): Cabeçalho*****************************/
                     void titulo(void)
 {
cout<<"\n                    UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA # UnB                    "<<"\n";
hora();
cout<<"-------------------------------------------------------------------  \n";
cout<<"Área        : Recursos Hídricos - Versão(TopModel): CV98.CPP "<<"\n";
cout<<"Referência  : Modelo Distribuido Chuva-Vazão, Base Física"<<"\n";
cout<<"-------------------------------------------------------------------  \n";
}// TERMINOU TITULO()


/********* ************** Entrada de Dados ***************************/
                    void entrada(FILE *p)//recebe ponteiro para arquivo
{
int IT;
```

```
 clrscr();t1();
 fscanf(p,"%d %f",&NSTEP,&DT);
 cout<<"\n            Leitura de Ri PE e Qobs            \n";
 for(IT=0;IT<NSTEP;IT++)
 {
 fscanf(p,"%f%f%f",&R[IT],&PE[IT],&QOBS[IT]);
 if(R[IT]>0)
 Q[IT]=0;//[eq-1]Zerou matriz de valores de vazão calculada
 }
 max();
 fclose(p);
} //terminou entrada()

/***********  Rotina principal Ordem de cálculo do programa: int processo()  *****/
                int processo(void)//Sequencia geral de cálculo
{
        openarq();//abertura de arquivos de dados
        entrada(fp[1]);//Lê em $subcat.dat, inicial/ 3 inteiros.
        fscanf(fp[2],"%d%d%d",&NSC,&IMAP,&IOUT);

/* Calculos para cada sub-bacia: loop principal*/

        for(iSC=0;iSC<NSC;iSC++)
        {
        if(IOUT>=2)printf("\nIniciando Sub_Bacia: %d",iSC);
        tread(fp[2]);//Leitura de dados de area e ln(a/tanB)
        init(fp[3],fp[4]);/*leitura dos parâmetros do modelo e determinação
                        do cenário hídrico de partida para os cálculos */
        topmod(fp[4]);//Função que faz os cálulos
        }// terminou o for de sub-catch(NSC)

        results(fp[4]);//Calculos estatísticos e grava em arquivo

/* fechar todos arquivos*/
        for(i=0;i<6;i++)
        {
        fclose(fp[i]);
        }
        return 0;
}// Fim de processo  main()

/********************** tread() ln(a/tanb) ****************************/
                void tread(FILE *p2)
{
int iLN;//contador para leitura de ln(a/tanB)

fscanf(p2,"%s%s",SUBCAT,subcat1);
strcat(SUBCAT,subcat1);// esta etapa esta aqui devido ao modo
                        // como foi escrito  o arquivo de entrada
fscanf(p2,"%d%f",&NAC,&AREA);
clrscr();t1();

        for(iLN=0;iLN<NAC;iLN++)
        {
        fscanf(p2,"%f%f",&AC[iLN], &ST[iLN]);
        }
tarea=AC[0];//[eq-2]variavel vai receber SUM(areas parciais)
        for(iLN=1;iLN<NAC;iLN++)
        {
```

```
		tarea +=AC[iLN];//[eq-3]
		}
/* Os valores de ln(a/tanB) são ordenados do maior para o
menor de forma que ST[0] (18 no exemplo) é o limite superior
sendo AC[0]=0.0, AC[1] representa a área entre ST[0]e ST[1].
		CALCULO DO TOTAL DE AREA PONDERADA COM ln(a/tanB) */
TL=0;//[eq-4]
AC[0]/=tarea;//[eq-5]
SUMAC= AC[0];//[eq-6]
//printf("\n\tNAC=Total de incrementos de ln(a/tanB)=%d",NAC);
		for(iLN=1;iLN<NAC;iLN++)
		{
		AC[iLN]/=tarea;//[eq-7]
		SUMAC += AC[iLN];//[eq-8]
			if(flagatgb==7)
			{
			TL+=(indtop)*AC[iLN]*( ST[iLN]+ST[iLN-1])/2;//[eq-9]
//printf("\n Verif se esta corrigindo AC[]%f ST[]=%f",AC[iLN],ST[iLN]);para
			}
			else
			{
			TL += AC[iLN]*( ST[iLN]+ST[iLN-1])/2;//[eq-10]
			}
		}
AC[NAC]=0;//[eq-11]
//Leitura de dados da rede de canais
fscanf(p2,"%d",&NCH);//Número de canais da rede
		for(iLN=0;iLN<NCH; iLN++)
		{
		fscanf(p2,"%f%f",&ACH[iLN], &D[iLN]);
		}
}//término de  tread():> ln(a/tanb)


/********************** init() params ****************************/
			void init(FILE *p3, FILE *p4)//$params.dat e $output.dat
{
float TCH[10],TIME,A1,A2, SUMAR;
char scat[30];//para o nome da subcat
char scat1[4];//Nºque aparece depois do nome
int iP;//contador para leitura de parametros
int IR,IN;//outros contadores
int resp_alter;

		if(flaginit!=1)
		{//if de flaginit != 1
// leitura dos parâmetros do modelo
		fscanf(p3,"%s%s",scat,scat1);
		fscanf(p3,"%f%f%f%f%f%f%f%f%d%f%f%f",
		&SZM,&T0,&TD,&CHV,&RV,&SRMAX,&Q0,&SR0,&INFEX,&XK0,&HF,&DTH);
		strcat(scat,scat1);// esta etapa esta aqui devido ao modo de escrita
		}// fim de if de flaginit != 1
clrscr();t1();
printf("\tSZM  =Valor de 'M' na Eq_Recessão=%f",SZM);
printf("\n\tT0   =Média(sub-bacia)Transmissividade ln(T0)=%f",T0);
printf("\n\tTD   =Time resposta/unidade de defict(eq de QUZ)=%f",TD);
printf("\n\tCHV  =Velocidade canal principal=%f",CHV);
printf("\n\tRV   =Velocidade nos canais da sub-bacia=%f",RV);
printf("\n\tSRMAX=Capacidade de armaz agua zona raizes=%f",SRMAX);
printf("\n\tQ0   =Vazão inicial descarga do rio=%fm/time step",Q0);
```

```
printf("\n\tSR0  =Valor inicial de deficit zona raízes=%fm",SR0);
printf("\n\tINFEX=(1-Calcula Infilt_Excess,0-Não)=%d",INFEX);
printf("\n\tXK0  =Valor Cond_Hidraul superficie=%f",XK0);
printf("\n\tHF   =Valor de sucção na frente de molhamento=%f",HF);
printf("\n\tDTH  =Variação conteudo água na frente_molhamento=%f\n",DTH);
cout<<"   ------------------------------------------------------------   ";
/*Primeiro, os valores dos parâmetros são convertidos  para [m/passo de tempo DT], com excessão
de XK0 que deve permanecer em m/h. Q0 já esta em m/passo de tempo e  T0 que entra como ln(T0).
No exemplo tmodel DT=1 hora.*/
  RV  *= DT;//[eq-12]
  CHV *= DT;//[eq-13]
  TD  *= DT;//[eq-14]
  T0  += log(DT);//[eq-15]

//calculo do parametro SZQ
  SZQ = exp(T0-TL);//[eq-16]

//Conversão de distância/área p/ ordenadas time delay do histograma
  TCH[0]=D[0]/CHV;//[eq-17]
          for(iP=1;iP<NCH;iP++)
          {
          TCH[iP]=TCH[0]+(D[iP]-D[0])/RV;//[eq-18]
          }//DO 15
  NR = (int) TCH[NCH-1];//conversão de tipo [eq-19]
  if((float)NR<TCH[NCH-1])NR++;
  ND = (int) TCH[0];//conversão de tipo [eq-20]
  NR -= ND;//[eq-21]
          for(IR=0;IR<NR;IR++)//DO 20
          {
          TIME=TCH[0]+IR+1;//[eq-22]
          for(iP=1;iP<NCH;iP++)//DO 21
          {
                  if(TIME<=TCH[iP])
                  {
                          AR[IR]=ACH[iP-1] +(ACH[iP]-ACH[iP-1])*
                          (TIME-TCH[iP-1])/(TCH[iP]-TCH[iP-1]);//[eq-23]
                  break;
                  }
          }//termino do for DO 21
    }//termino do for DO 20
  A1 = AR[0];//[eq-24]
  SUMAR = AR[0];//[eq-25]
  AR[0] *= AREA;//[eq-26]

          for(IR=1;IR<NR;IR++)//DO 22
          {
          A2 = AR[IR];//[eq-27]
          AR[IR]=A2-A1;//[eq-28]
          A1=A2;//[eq-29]
          SUMAR += AR[IR];//[eq-30]
          AR[IR] *= AREA;//[eq-31]
          }//fim DO 22

  if(IOUT>=1)
  fprintf(p4,"SZQ= %f\n",SZQ);
  if(IOUT>=1)
  fprintf(p4," %s\n","Dados de viagem na Sub_Bacia");
  fprintf(p4," %s %.5f\n","Maximum Routing Delay",TCH[NCH-1]);
  fprintf(p4," %s %8.5f\n","Soma das Ordenadas do Hidrograma",SUMAR);
          for(IR=0;IR<NR;IR++)
```

```
        {
        fprintf(p4,"%12.5Le",(long double)AR[IR]);
        }
/**********************
 Daqui para baixo o programa vai inicializar SRZ e Q0

-SR0 é o deficit de armazenamento inicial na zona de raízes abaixo da capacidade de campo
-Q0 é a descarga inicial dessa sub_bacia

Inicialização dos Armazenamentos*/
        for(iP=0;iP<NAC;iP++)
        {
        SUZ[iP]=0;//[eq-32]
        SRZ[iP]=SR0;//[eq-33]
        }//fim do for p/NAC
SBAR = -SZM*log(Q0/SZQ);//[eq-34]

//Reinicialização da matriz de descarga zerando todos valores de Q
        for(iP=0;iP<NSTEP;iP++)
        {
         Q[iP]=0;//[eq-35]
        }//inicio-fim DO 28
         SUM=0;//[eq-36]
        for(iP=0;iP<ND;iP++)
        {
        Q[iP] += Q0*AREA;//[eq-37]
        }//inicio-fim DO 29
        for(iP=0;iP<NR;iP++)//DO 30
        {
        SUM += AR[iP];//[eq-38]
        IN = ND+iP;//[eq-39]
        Q[IN] += Q0*(AREA-SUM);//[eq-40]
        } // fim DO 30

/*Inicialização do Balanço de água. BAL é positivo quando se tem  Armazenamento*/

BAL = -SBAR - SR0;//[eq-41]

/* Variáveis convertidas para long double para arquivar na forma potencia E+__*/
fprintf(p4,"\n");
fprintf(p4," %s %12.5Le","Balanco Inicial  BAL  :",(long double) BAL);
fprintf(p4," %s %12.5Le","\n Valor Inicial de SBAR :",(long double) SBAR);
fprintf(p4," %s %12.5Le\n","\n Valor Inicial de SR0  :",(long double) SR0);
} //TERMINOU A FUNÇÃO  void init(file *.. file *..)

/********************** topmod() params *****************************/
                    void topmod(FILE *p4)
/*
   Esta função executa o programa para uma Sub_Bacia incluindo os cálculos
 de deslocamento linear (viagem)  em canal.
   Os cálculos são efetuados para cada sub_divisão de área baseando-se em
 sub-divisões de ln(a/tanB) expressas pela variável NAC. O cálculo do deficit
 de saturação para cada subdivisão é feito a partir de SBAR no início de cada
 intervalo de tempo. Cada um desses incrementos apresenta um valor de deficit
 de armazenamento na zona das raízes (SRZ) que é igual a ZERO na capacidade
 de campo e vai se tornando cada vez mais POSITIVO a medida que o solo seca;
 e, um valor de armazenamento na zona não saturada (SUZ) que é igual a ZERO
 na capacidade de campo e vai se tornando cada vez mais POSITIVO a medida
 que o armazenamento aumenta. SUZ tem um limite superior no deficit local de
 saturação SD(Saturation Deficit).
```

```
   A área local de contribuição é onde SD-SUZ é < ou = a ZERO.
   LEMBRAR que SBAR, SD e SRZ são DEFICITS e SUZ é ARMAZENAMENTO.*/

{
 float EX[30];// SATURATION EXCESS PARA CADA INCREMENTO (SE POSITIVA)
 int IA, IB, IHROF,IR, IN;
 float QOF,QUZ,EP,P;
 /*Sendo:
   QOF- Usada nos calculos de vazão a partir área totalmente saturada,
   QUZ- Vazão referente à drenagem da Zona Unsaturada,
   EP-  Evapotranspiração,
   P-   Chuva,Precipitação*/

 float ACM, ACF,UZ,SD[maxln];
 float  SAE, EA, OF;//
 int flag=0,  rexpinf;
 float SUMRZ, SUMUZ;// somatoria p/ balanço nas zonas das raízes e insatur.
 /* Inicialmente zerar as variáveis */
 IROF  = 0;//[eq-42]
 REX   = 0.0; //INFILTRATION EXCESS RUNOFF//[eq-43]
 CUMF  = 0.0; //Infiltração acumulada//[eq-44]
 ACMAX = 0.0; //Máx área de contrib p/ esta Sub_bac, neste run//[eq-45]
 SUMP  = 0.0; //Entrada acumulada de precipitação//[eq-46]
 SUMAE = 0.0; //Valor de evapotranspiração real acumulada//[eq-47]
 SUMQ  = 0.0; //Valor acumulado de vazões de saida simuladas//[eq-48]
//Inicilaização do contador de area de contribuição
 IHROF=0;//[eq-49]
 printf("\n");
 for(IA=0;IA<NAC;IA++)//DO 5
 {
 ihour[IA]=0;//[eq-50]
 }
 if(IOUT>=2)
 fprintf(p4,"  IT P      EP     Q[IT]  QUZ    Q      SBAR    QOF");
  // ESCREVEU ESTA LINHA EM $OUTPUT.DAT

/*inicio do loop principal (do 10) de cálculos que abrange quase toda a  função,  varrendo todo o
nstep(no exemplo do topmodel: 950 valores) vai incluir vários comandos daqui até o final, que
incluem calculos de excedentes de infiltraçao e de saturação evapotranspiração e de  tempo de
deslocamento n0s canais */

for(IT=0;IT<NSTEP;IT++)// inicio -> DO 10 - LOOP de Tempo
{
 Vcalc=  0.0;//[eq-51]
 QOF  =  0.0;//[eq-52]
 QUZ  =  0.0;//[eq-53]
 EP   =  PE[IT];//[eq-54]
 P    =  R[IT]; // verificado//[eq-55]
 SUMP+=  P;// Entrada acumulada de precipitação//[eq-56]

/*          Cálculo de   -** Infiltration Excess **-
  (Unidadedes de todos parâmetros e variáveis de entrada em [m/h])
          A rotina no topmodel que calcula os excedentes de infiltração é a "EXPINF" que é baseada
na teoria de infiltração de Green-Ampt em solo onde a condutividade hidráulica decai
exponencialmente com a profundidade (BEVEN, Hydr.Scien. Journal, 1984).
          IMPORTANTE: Notar que se ocorrer excedência de infiltração ela ocorrerá em toda a
SUB_BACIA devido à se ter assumido que o solo é HOMOGÊNEO !  Este cálculo será bypassado
caso INFEX = 0, Na condição oposta,isto é, calcular o excedente de infiltraçao,  a variável INFEX tem
de assumir o valor 1 expresso no if abaixo:                */
          if(INFEX==1)//se infex=1 vai fazer o cálculo de infilt excess
```

```
        {// inicio if_infex=1
        if(P>0)
        {//inicio if do P>0
        //Ajustar a intensidade de pptação de m/time step para m/h
        RINT = P/DT;//[eq-57]
        rexpinf=expinf();

 /* expinf-Variveis  Usadas:IROF,IT,RINT,DF,CUMF;  Sendo que
   DF é incremento volumétrico de infiltração e retorna em m/DT */
                REX = P-DF;//[eq-58]
                P  -= REX;//[eq-59]
                if(IROF==1)IHROF++;//[eq-60]
        }//fim do if do P>0
        else
        {
                REX =0.00; //[eq-61]
                IROF=0   ; //[eq-62]
                CUMF=0.00; //[eq-63]
        }
   }// fim if_infex=1

/* P é a chuva(preciptação disponivel)para infiltração apos cálculo de superfície de controle*/
   ACM =0;//[eq-64]

/* Inicio de um loop interno ao (for -> DO 10) chamado de
    Loop de incrementos de  (a/tanB), Do 30 */
  flag=0;//[eq-65]
  for(IA=0; IA<NAC; IA++)// inicio -> DO 30 Loop de ln a/tanb
  {
        flag++;//[eq-66]
        ACF=(AC[IA]+AC[IA+1])/2;//[eq-67]
        UZ=0.0;//[eq-68]
        EX[IA]=0.0;//[eq-69]

    //calculo do defict local de armazenamento
        if(flagatgb==7)// a flag indica que se quer corrigir ST[]
        {
        SD[IA]=SBAR+SZM*( TL - ST[IA]*(indtop) );//[eq-70]
        }
        else
        {
        SD[IA]=SBAR+SZM*( TL - ST[IA]); //[eq-71]
        }

        if(SD[IA]<0)SD[IA]=0.0;//[eq-72]

    //calculos na Zona das Raizes (RZ)
        SRZ[IA] -= P;//[eq-73]
        if(SRZ[IA]<0)
        {
        SUZ[IA]-=SRZ[IA];SRZ[IA]=0.0;//[eq-74]
        }
    //calculos na Zona Un_insaturada (UZ)
        if(SUZ[IA]>SD[IA])
        {
        EX[IA]=SUZ[IA]-SD[IA];SUZ[IA]=SD[IA];//[eq-75]
        }
    //calculos da drenagem do armazenado na Zona insaturada (UZ)
        if(SD[IA]>0)
        {
```

```
        UZ=SUZ[IA]/(SD[IA]*TD);/*[eq-76] equação 18.11 de Beven, que propõe  na descrição do
modelo que é possivel usar uma          equação de fluxo Darciniano que é a eq 18.12 para a base
da  zona não saturada    qv= UZ = alfa* K0 * exp(-f*zi)*/

                if(UZ>SUZ[IA])UZ=SUZ[IA];//[eq-77]
        SUZ[IA] -=UZ;//[eq-78]
                if(SUZ[IA]<0.0000001)SUZ[IA]=0.0;//[eq-79]
        QUZ +=(UZ*ACF);//[eq-80]
        }
//calc. EVAPOTRANSP a partir de Defict na  Zona das Raizes (RZ)
   EA = 0;
   if(EP>0)
   {
    EA = EP * (1-SRZ[IA]/SRMAX);//[eq-81]Evapotransp REAL
          if(EA>SRMAX-SRZ[IA])EA = SRMAX - SRZ[IA];//[eq-82]
    SRZ[IA] += EA;//[eq-83]
    }
    SUMAE += EA*ACF;//[eq-84]
    SAE   += EA*ACF;//[eq-85]
    //FIM calc. EVAPOTRANSP

/*CALCULO de Vazão a partir de AREAS completamente saturadas. Para isso, os valores de (a/tanB)
devem estar ordenados do  maior para o menor.*/
  OF = 0;//[eq-86]
  if(IA>1)
  {
        IB = IA-1;//[eq-87]
                if(EX[IA]>0)
                {
                OF = AC[IA] * (EX[IB]+EX[IA])/2;//[eq-88]
                ACM += ACF;//[eq-89]
                ihour[IB]++;//[eq-90]
                }//FIM DO IF EX IA
                else
                {
                        if(EX[IB]>0)
                        {
                        ACF *= EX[IB] / (EX[IB]-EX[IA]);//[eq-91]
                        OF   = ACF * EX[IB]/2;//[eq-92]
                        ACM += ACF;//[eq-93]
                        ihour[IB]++;//[eq-94]
                        }//FIM DO IF EX IB
                }//FIM DO else
  }//FIM DO IF DE IA>1
  QOF += OF;//[eq-95]

  //Montagem da matriz  de plotagem da area de contribuição
  CA[IT] = ACM;//[eq-96]
  if(ACM>ACMAX)ACMAX=ACM;//[eq-97]
}// termino do for -> DO 30

// Somar  o excedente de infiltração
  QOF += REX;//[eq-98]

  if(IROF==1)ACMAX=1;//[eq-99]

// Calculo da drenagem na Zona Saturada
  QB    = SZQ * exp(-SBAR/SZM);//[eq-100]
  SBAR += (QB-QUZ);//[eq-101]
  QOUT  = QB + QOF;//[eq-102]
```

```
  SUMQ += QOUT;//[eq-103]
/* Calculos do transporte em canais considera o tempo de residência*/
for(IR=0; IR<NR; IR++)// inicio -> DO 40
            {    //como IR inicia em 0 não subtrai 1 como no original
             IN = IT+ND+IR;//[eq-104]
    if(IN>NSTEP){flag=1;break;}
   Q[IN] = Q[IN]+ QOUT * AR[IR];//[eq-105]
   }// termino do for -> DO 40

  fprintf(p4,"\n%3d %6.3f %6.3f %8.6f %8.6f %6.3f %6.3f %6.3f",
IT,P,EP,Q[IT],QUZ,QB,SBAR,QOF);// ESCREVEU ESTA LINHA EM $OUTPUT.DAT
  if(flag)continue;
            if(IOUT>=2)
            {
            fprintf(p4,"\n");
            fprintf(p4,"%d    %f   %f     %8.6f     %8.6f    %f   %f      %f",
                 IT,P,EP,Q[IT],QUZ,QB,SBAR,QOF);
            }
 }// termino do for -> DO 10, O LOOP de Tempo

 tempq=Q[0];
 for(IT=1;IT<NSTEP;IT++)// inicio -> DO EXTRA
 {
  Vcalc+=0.5*(Q[IT]+Q[IT-1])*DT;//[eq-106]
            if(tempq<Q[IT])
            {
            tempq=Q[IT];//[eq-107]
            imax=IT;//[eq-108]
            }
 }//fim DO EXTRA

 // Equações finais de balanço
 SUMRZ = 0.0;//[eq-109]
 SUMUZ = 0.0;//[eq-110]
            for(IA=0; IA<NAC; IA++)// inicio -> DO 50
            {
            ACF    = 0.5 * (AC[IA]+AC[IA+1]);//[eq-111]
            SUMRZ += SRZ[IA]*ACF;//[eq-112]
            SUMUZ += SUZ[IA]*ACF;//[eq-113]
            } // termino do for -> DO 50
 /************ EQUAÇÃO FINAL DO BALANÇO ******************/

 BAL   += SBAR + SUMP - SUMAE - SUMQ + SUMRZ - SUMUZ ;//[eq-114]

 fprintf(p4,"\n %s %s\n"," Balanco de Agua p/ Sub_Catch:",SUBCAT);
 fprintf(p4,"SUMP\tSUMAE\tSUMQ\tSUMRZ\tSUMUZ\tSBAR\tBAL");
 fprintf(p4,"\n%6.3f\t%6.3f\t%6.3f\t%6.3f\t%6.3f\t%6.3f\t%8.5f",
              SUMP,SUMAE,SUMQ,SUMRZ,SUMUZ,SBAR,BAL);
  // ESCREVEU ESTA LINHA EM $OUTPUT.DAT
if( IOUT>1)
fprintf(p4,"\n%s,%12.5f\n"," Area máxima de contribuição:",ACMAX);
}//********************************** fim de topmod()

/************ results() calculo de variancias***************/
                    void results(FILE *p4)
            {
   int IT;// contador com o mesmo nome ja usado
   double SSQ, QBAR, VARQ, VARE;
```

```
   /*calculos das funções objetivo:
   Inicial/ zera todas variáveis pois elas irão receber somatórias*/
   F1=0.0; F2=0.0; SUMQ=0.0; SSQ=0.0;
   for(IT=0;IT<NSTEP;IT++)
   {//INICIO DO 60 ORIGINAL
           SUMQ += QOBS[IT];//[eq-115]
           SSQ  += pow(QOBS[IT],2);//[eq-116]
           F1   += pow((Q[IT]-QOBS[IT]),2);//[eq-117]
           if((Q[IT]-QOBS[IT])<0.0)
                   F2   += ( (Q[IT]-QOBS[IT])* (-1));//[eq-118]
           else
                   F2   += (Q[IT]-QOBS[IT]);//[eq-119]
   }//FIM DO 60 ORIGINAL
           QBAR  = SUMQ/NSTEP;//[eq-120]
           VARQ  = (SSQ/NSTEP - QBAR*QBAR);//[eq-121]
           VARE  = F1/NSTEP;//[eq-122]
           E     = 1-VARE/VARQ;//[eq-123]
           fprintf(p4,"\n Valores das funções objetivo\n");
           fprintf(p4," 1. F1=%12.5Le\tE=%12.5Le\tF2=%12.5Le",
                    (long double) F1,(long double)E,(long double) F2);
           fprintf(p4,"\n 2. Qmedia obs=%12.5Le\tVariância Qobs=%12.5Le",
      (long double)QBAR,(long double) VARQ);
           fprintf(p4,"\n 3. Variância do erro=%12.5Le",(long double) VARE);
           fprintf(p4,"\n 4. Vazão Máx_Calcul =%12.5Le\t Tpicocalc =%d",(long double) tempq,imax);
           fprintf(p4,"\n 5. Vazão Max_Observ =%10.5Le\t Tpicobser = %d\t",
                             (long double) tempqobs,imaxobs);
           fprintf(p4,"\n 6. Volume obs = %12.5f\t Volume calc =%12.5f", Vobs, Vcalc);
           printf("\tF1=%12.5Le\tE=%12.5Le\tF2=%8.5f",(long double)F1,(long double)E, F2);
           printf("\n\tQmaxobs\t\t  Tpicoobs\t    Vobs\t  ");
           printf("\n\t%10.5Le\t  %d\t    \t    %.6f\t  ",
                    (long double) tempqobs,imaxobs,Vobs);
           printf("\n\tQmaxcalc\t  Tpicocalc\t    Vcalc");
           printf("\n\t%10.5Le\t  %d\t    \t    %.6f",
                    (long double) tempq,imax,Vcalc);
           cout<<"\n   ---------------------------------------- pressione [<-ENTER]    ";

           if(simu!=1)para
}//*****************************************************fim de results

/**************Ler parametros em arquivo de dados*****/
                   void le_param(void)
{
char scat[12],scat1[3];
FILE *p3;
char b;

   do{
   clrscr();         t1();
   printf("\tValores dos parâmetros do PRG (fonte: $params.dat)\n");
   cout<<"   ------------------------------------------------------------   \n";
   printf("\n\tSZM=%f  T0=%f  TD=%f CHV=%f\n\tRV=%f SRMAX=%f Q0=%f SR0=%f\n\tINFEX=%d
XK0=%f HF=%f DTH=%f",
   SZM,T0,TD,CHV,RV,SRMAX,Q0,SR0,INFEX,XK0,HF,DTH);
   printf("\n\n\tEsta funçao le o valor dos parametros do PRG no arquivo ");
   printf("\n\t$params.dat. Portanto o PRG vai colocar nas variáveis os ");
   printf("\n\tvalores originais do arquivo e serão perdidas alterações");
   printf("\n\tque eventualmente tenham sido feitas.\n");
   printf("\n\tTecle [s] - para Continuar ou [n] - Sair \n");
   b=tolower(getche());
   }while ( (b!='s') && (b!='n'));
```

```
if( b=='s')
{//inicio caso b==s
strcpy(arq[3],"$params.dat"); //parâmetros
if((p3=fopen(arq[3],"r"))== NULL)msg0(i);//default modo TXT
fseek(fp[i],SEEK_SET,0);//Posiciona ponteiro no início do arquivo
fscanf(p3,"%s%s",scat,scat1);
fscanf(p3,"%f%f%f%f%f%f%f%f%d%f%f%f",
&SZM,&T0,&TD,&CHV,&RV,&SRMAX,&Q0,&SR0,&INFEX,&XK0,&HF,&DTH);
flaginit=1; clrscr();
printf("\n\n\n\n\n\n\n\n\t Leitura realizada,parâmetros originais repostos!\n");
}
else
{
printf("\n\n\n\n\n\n\t Mantidos valores atuais dos parâmetros !");
}para
}//***********-->fim de  le_param

/*****************Mostrar resultados*****************/
                    void resultados(void)
{
int i;
char n, num[3], resp;
clrscr();t1();
          for(i=0;i<NSTEP;i++)
          {//inicio for nstep
          printf("\n\tQobs[%d]=%9.7f\tQcalc[%d]=%9.7f",i,QOBS[i], i,Q[i]);
                    if(i%20==0)
                    {
                    printf("\n\tDigite: ESC=sair ENTER=continuar  [G]oto= Ir p/ linha _:");
                    n=tolower(getch());
                    if(n == ESC)break;
                              if(n== 'g')
                              {
                              printf("\n Digite Nº da Linha desejada: ");gets(num);i=atoi(num)-1;
                              }
                    }
          }//fim for nstep
}//fim de resultados
   /***************** Excel (void)***********************/
                    excel(void)//Gravar resultados ASCII p/ MS_Excel
{
char qa,qab,com, coment[81];
int i;

   do{
   clrscr();         t1();
            if(flagexcel!=0){
   printf("\n\n\tO ARQ ASCII atual é %s. Quer Alterar o nome? ",destino);
   printf("\n\n\tTecle [a]-Alterar    [m]-Manter   [ESC]-Sair\n");
                }
   else{
   printf("\n\n\tO Arq ASCII de saida Inexistente. Quer Criar? ");
            printf("\n\tTecle [c]-Criar   [n]-Não Criar  [ESC]-Sair \n");
       }
   qa=tolower(getche());
   }while ( (qa!='a') && (qa!='n') && (qa != 'm')&& (qa!='c') && (qa != ESC));
   if(qa == ESC)return 1;

 if(qa =='a'|| qa=='c'){//if nº1001
          do
```

```
          {clrscr();t1();
           printf("\n\n\t*Digite nome Arq ASCII/EXCEL (Sem extensão):");
           gets(arq_excel);
           strcpy(destempor, arq_excel);
           flagexcel=1;
           printf("\n\t*O Arq ASCII p/ EXCEL é agora:%s ",destempor);
   printf("\n\t*Esta Correto ? [s]- Sim  [n]-Não  [ESC]-Sair \n");
           qab=tolower(getche()); if(qab == ESC)return 1;
                    if(strlen(destempor)==0)
                    {
     qab='n';
                     printf("\n\tDigite nome de Arq válido ! pressione uma tecla");
     para
                    }
                    if(strlen(destempor) >12)
                    {
                    qab='n';
                    printf("\n\tDigite nome de Arq válido ! pressione uma tecla");
    para
                    }
  }while (qab!='s');
 sscanf(destempor,"%s", destino);
 strcat(destino, turbo);

 strcat(destempor, prm); //adiciono extensão .wri
 sscanf(destempor,"%s", params);// copia nome em destempor para params
 }//fim do if nº1001
 else printf("\n Não alterou ou Criou ARQ !");
//Se for gravar ai pede comentário

 if((p4excel=fopen(destino,"w"))== NULL)msg0(i);//default modo TXT
 fseek(p4excel,SEEK_SET,0);//Coloca ponteiro no início do arquivo
 if((p4prm=fopen(params,"w"))== NULL)msg0(i);//default modo TXT
 fseek(p4prm,SEEK_SET,0);//Coloca ponteiro no início do arquivo
                    do{
            printf("\n\n\t*Quer Gravar dados de chuva: [s] ou [n] ");
            com=tolower(getche());
                     }while( (com!='s') && (com!='n') ) ;
          if(Q[0])//if Q0
          {
          if(tempq>tempqobs)fprintf(p4excel,"\t%d\t%f\n",NSTEP,tempq);
          else fprintf(p4excel,"\t%d\t%f\n",NSTEP,tempqobs);
          }//fim ifQ0
          if(Q[0])
          {//if q[0]
          if(p4excel!=NULL)
                    {//if grava
          for(i=0;i<NSTEP;i++)
                    {//inicio for nstep
                              if(com=='s')fprintf(p4excel,"\t%d\t%9.7f\t%9.7f\t%9.7f\n",i,QOBS[i],Q[i],R[i]);
          else fprintf(p4excel,"\t%d\t%9.7f\t%9.7f\n",i,QOBS[i],Q[i]);
                              }//fim do for
                    }//fim do if grava
fprintf(p4prm,"\tSZM  =Valor de 'M' na Eq_Recessão=%f",SZM);
fprintf(p4prm,"\n\tT0   =Média(sub_cath)Transmissividade ln(T0)=%f",T0);
fprintf(p4prm,"\n\tTD   =Time delay/unidade de defict(eq de QUZ)=%f",TD);
fprintf(p4prm,"\n\tCHV  =Velocidade canal princip.=%f",CHV);
fprintf(p4prm,"\n\tRV   =Velocidade nos canais da sub_cath=%f",RV);
fprintf(p4prm,"\n\tSRMAX=Capacidade de armaz agua zona raizes=%f",SRMAX);
fprintf(p4prm,"\n\tQ0   =Vazão inicial descarga do rio=%fm/time step",Q0);
```

```
fprintf(p4prm,"\n\tSR0  =Valor inicial de deficit zona raízes=%fm",SR0);
fprintf(p4prm,"\n\tINFEX=(1-Calcula Infilt_Excess,0-Não)=%d",INFEX);
fprintf(p4prm,"\n\tXK0  =Valor Cond_Hidraul superficie=%f",XK0);
fprintf(p4prm,"\n\tHF   =Valor de wetting front SUCTION(m)=%f",HF);
fprintf(p4prm,"\n\tDTH  =Variação conteudo H2O frente_molhamento=%f\n",DTH);
fprintf(p4prm,"\n F1=%12.5Le\tE=%12.5Le\tF2=%12.5Le",
                    (long double) F1,(long double)E,(long double) F2);
fprintf(p4prm,"\n Vazão Máx_Calcul =%12.5Le\t Tpicocalc =%d",(long double) tempq,imax);
fprintf(p4prm,"\n Vazão Max_Observ =%12.5Le\t Tpicobser = %d\t",
                                (long double) tempqobs,imaxobs);
fprintf(p4prm,"\n Volume obs = %12.5f\t Volume calc =%12.5f", Vobs, Vcalc);
printf("\n\n\t\t=>Gravado ! pressione [ENTER] <==");para
          }//if do q[0]
   else//do ifQ[0]
          {
          printf("\n\tNada foi gravado em:\n\t%s - Vazões de saida não foram calculadas!",destino);
          }
fclose(p4excel);
fclose(p4prm);
return 0;
}//dfim de excel(void)
/******************** Excedente de Infiltração **********************/
                    expinf(void) //arquivo EXPDOC.DOC
{
int flag,I,j,FAC;
float E=0.00001;
double CONST, SUM,FC,FUNC,DFUNC, ADD;

//Nota: As variáveis HF & DTH são usadas apenas no cálculo de CD a seguir
CD  = HF * DTH;//[eq-124]
//SZM=valor de 'm'na eq de recessão QB=SZQ * exp(SBAR/M)
SZF = 1.00/SZM;//[eq-125]
//printf("\nszf=1/szm=%f ",SZF = 1.00/SZM);
//XK0=Condutividade hidráulica da superfície [m/h]
XKF = XK0;//[eq-126]
if(IROF==1)printf("");//JÁ OCORREU PONDING CALCULA EXCESS
//continue if1-caso positivo vai para linha 10
else //ifelse 1-vai parar na linha 10.
//ESTIMATIVA INICIAL TEMPO DE Formação de poça
{
 if(CUMF==0){//goto # 7:if2
bloc=bloco1();if(bloc)return bloc;}
 else//inicio ifelse2
 {
  F1 = CUMF;//[eq-127]
  R2 = -XKF*SZF*(CD+F1) / ( 1-exp(SZF*F1) );//[eq-128]
  if(R2<RINT)
  {//if3
TP = IT * DT;//[eq-129]
  IROF=1;//[eq-130]
  F=CUMF;//[eq-131]
  //GOTO8;
  }// fim do if3
  else//do if3
  {
  bloc=bloco1();if(bloc)return bloc;
  }//fim do ifelse3
 }//fim do ifelse2
CONST=0;//[eq-132]//linha # 8
FAC=1;//[eq-133]
```

```
FC=(F+CD);//[eq-134]
for(j=1; j<=10;j++)//P
{// inicio DO 12
FAC *= j;//[eq-135]
ADD = pow((FC*SZF),j)/(j*FAC);//[eq-136]
CONST += ADD;//[eq-137]
}// fim DO 12
CONST= log(FC) - (log(FC)+CONST)/exp(SZF*CD);//[eq-138]
IROF=1;//[eq-139]
F += 0.5*RINT*(IT*DT-TP);//[eq-140]
}// fim do ifelse 1
/*Nesta linha 10  acabou o 1º grande Bloco
 A seguir começa o 2º bloco do prg que é a soluçao da funcao F(T) feita por Newton Raphson*/
for(I=0;I<20;I++)
{// inicio DO 14
FC=F+CD;//[eq-141]
SUM=0.0;//[eq-142]
FAC=1.0;//[eq-143]
 for(j=0;j<10;j++)
 {// inicio DO 13
  FAC *= (j+1);//[eq-144]
  ADD = pow((FC*SZF),(j+1))/((j+1)*FAC);//[eq-145]
  SUM += ADD;//[eq-146]
 }//fim do DO 13
FUNC = -(log(FC)-(log(FC)+SUM)/exp(SZF*CD)-CONST)/(XKF*SZF)-(IT*DT-TP);//[eq-147]
DFUNC=(exp(SZF*F)-1)/(XKF*SZF*FC);//[eq-148]
DF = (float) -FUNC/DFUNC;//[eq-149]
            if(fabs(DF)<=E)flag=1;break;//inicio e fim if10
}//fim do DO 14
if(!flag)//if adicional de controle de fluxo
              if(F<CUMF+RINT)
              {//inicio  if11
              DF   = F-CUMF;//[eq-150]
              CUMF = F;//[eq-151]
         //estimativa inicial p/ novo passo de tempo
              F   += DF;//[eq-152]
              return 0;
              }//fim do  if11
lab=label20();// comando linha # 20 = continue
return 0;
}//fim de expinf()

/****************** label go to 20:label20():usada em expinf()*/
                        label20(void)
 {//label20 retorna 1 (encerramento  normal)
/*printf("\nIT=%d Lable20-Não ocorreu 'PONDING' neste interv_tempo!",IT);*/
 IROF=0;//[eq-153]
 DF=RINT*DT;//[eq-154]
 CUMF+=DF;//[eq-155]
 return 1;
 }//FIM DE LABEL20()

 /*/\/\/\/\/\/\/\bloco1():usada em expinf()*/
                        bloco1(void)
{
   int flag,I;
   float E=0.00001;

            F2=CUMF+DT*RINT;//[eq-156]//linha # 7
            if(F2==0){ //inicio if4
```

```
        lab=label20(); return lab;}//fim do if4
                R2 = - XKF*SZF*(CD+F2)/(1-exp(SZF*F2));//[eq-157]

                        if(R2>RINT)
                        {//inicio if5-label go to 20: COMANDOS ABAIXO
                lab=label20();return lab;
                }//fim do if5
        F=CUMF+DT*R2;//[eq-158]
        flag=0;//linha exclusiva do C++
        for(I=0; I<20;I++)
        {// inicio DO 9
         R2 = - XKF*SZF*(CD+F)/(1-exp(SZF*F));//[eq-159]
         if(R2>RINT)
         {//inicio do if6
                F1=F;//[eq-160]
                F=(F2+F)/2;//[eq-161]
    if(fabs(F-F1)<E)flag=1;break;//inicio e fim if7
         }//fim if6
    else
         {//inicio ifelse6
                F2=F;//[eq-162]
                F=(F1+F)/2;//[eq-163]
    if(fabs(F-F2)<E)flag=1;break;//inicio e fim if8
    }//fim do ifelse6
        }// fim DO 9
        if(!flag)//if adicional de controle de fluxo
        TP=(IT-1)*DT+(F-CUMF)/RINT;//[eq-164]
        if(TP>IT*DT)
        {//inicio if9 label go to 20: COMANDOS ABAIXO
        lab=label20();
        return lab;
        }//fim do if9
return 0;
}   //fim do bloco1()

/**************************OTIMIZAÇÃO*****************************/
                otimiza(void)
{
char n0,n1,n;

flagotm=0;
do{//inicio DO 500
  clrscr();
        if( (SZM==0) && (RV==0) && (CHV==0))
   {
    printf("\n\n\tOs valores de parâmetros ainda não forma lidos !");
    le_param();
    printf("\n\t[L]eitura de dados : Valores originais repostos!");
    para
   }// fim do if

 cout<<"\n\n\tValores dos Parâmetros originais \n";
 cout<<"\n  ------------------------------------------------------------------------  ";
 printf("\n\t a)-SZM =%9.5f",SZM);
 printf("\t b)-T0    =%9.5f",T0);
 printf("\n\t c)-TD  =%9.5f",TD);
 printf("\t d)-CHV   =%9.5f",CHV);
 printf("\n\t e)-RV  =%9.5f",RV);
 printf("\t f)-SRMAX =%9.5f",SRMAX);
 printf("\n\t g)-SR0 =%9.5f",SR0);
```

```
 printf("\t h)-INFEX =%3d",INFEX);
 printf("\n\t i)-XK0 =%9.5f",XK0);
 printf("\t j)-HF    =%9.5f",HF);
 printf("\n\t k)-DTH =%9.5f",DTH);
 cout<<"\n   ------------------------------------------------------------------------   ";
           do{// do 3f
             cout<<"\n\tTecle a letra do Parâmetro que deseja estudar ? ";
    cout<<"\n\t\t[ESC] = Sair";
             n1=tolower(getche());
    if(n1==ESC)return 1;
             cout<<"\n\tLETRA : "<<n1;
             cout<<"\n\tEsta correto Tecle [s]-Sim  [n]-Não\n";
             n0=tolower(getche());
             }while (n0!='s');// fim do 3f

 switch(n1)
 {//abre o switch
 case 'a':
                      strcpy(destempor, "SZM");
                      simula(SZM,n1);if(flagotm==1)return 0;break;
 case 'b':
                      strcpy(destempor, "T0");
                      simula(T0,n1);if(flagotm==1)return 0;  break;
 case 'c':
                      strcpy(destempor, "TD");
                      simula(TD,n1);if(flagotm==1)return 0;break;
 case 'd':
                      strcpy(destempor, "CHV");
                      simula(CHV,n1);if(flagotm==1)return 0;break;
 case 'e':
                      strcpy(destempor, "RV");
                      simula(RV,n1);if(flagotm==1)return 0;break;
 case 'f':
                      strcpy(destempor, "SRMAX");
                      simula(SRMAX,n1);if(flagotm==1)return 0;break;
 case 'g':
                      strcpy(destempor, "SR0");
                      simula(SR0,n1);if(flagotm==1)return 0;break;
 case 'h':
                      strcpy(destempor, "INFEX");
                      puts("\t\t * I M U T A V E L *");break;
 case 'i':
                      strcpy(destempor, "XK0");
                      simula(XK0,n1);if(flagotm==1)return 0;break;
 case 'j':
                      strcpy(destempor, "HF");
                      simula(HF,n1);if(flagotm==1)return 0;break;
 case 'k':
                      strcpy(destempor, "DTH");
                      simula(DTH,n1);if(flagotm==1)return 0;break;
 }//fecha switch

 printf("\n\tESTA C/PROBL.Quer fazer outro estudo - Digite: ESC=sair [s]=continuar");
 n=tolower(getch());

}while ( (n!=ESC) && ( n!='s')); //FIM DO 500
if(n==ESC)return 0;
return 0;
}/************* fim  de otimização(void)*************/
```

```
/************************Procedimento de simulação*****************/
                    void simula(float varreal, char x)
{
char nm[5], var[12], a1,a0, nx;
int cont,i, porc;
float contf, FG;
FILE *p7;

          strcpy(var,destempor);
          printf("\n\n\t*O arquivo de saida é formado por digitos");
          printf("\n\t*que representam a variável que vai ser   ");
          printf("\n\t*simulada e por 3 Números que definem esse");
          printf("\n\t*estudo !");
          printf("\n\n\t*Digite 3 Números para nomear  o arquivo:");
  gets(nm);strcat(destempor, nm);
  strcpy(arq[7],destempor);/* O arquivo de resultados é composto
  pelas letras da variavel mais tres numeros fornecidos pelo
  usuario, por exemplo SZM123, que significa arquivo referente
  ao estudo do parâmetro SZM de nº 123*/
  if((p7=fopen(arq[7],"w"))== NULL)msg0(i);//default modo TXT
  fseek(p7,SEEK_SET,0);//Posiciona pont no início do arquivo
  do{// do 5000
            cout<<"\n\t*Qual a Porcentagem de variação do Parâmetro que deseja estudar ? ";
            cout<<"\n\t [1]-10%\t [2]-20%\t [3]-30%";
            cout<<"\n\t [4]-40%\t [5]-50%\t [6]-60%";
            cout<<"\n\t [7]-70%\t [8]-80%\t [9]-90%";
            cout<<"\n\t\t[ESC] = Sair";
            a1=tolower(getche());
            if(a1==ESC)break;
            cout<<"\n\tValor Selecionado : "<<a1;
            cout<<"\n\tEsta correto Tecle [s]-Sim  [n]-Não\n";
            a0=tolower(getche());
            }while (a0!='s');// fim do 5000
    switch(a1)
     {


     case '1':porc=10;break;
     case '2':porc=20;break;
     case '3':porc=30;break;
     case '4':porc=40;break;
     case '5':porc=50;break;
     case '6':porc=60;break;
     case '7':porc=70;break;
     case '8':porc=80;break;
     case '9':porc=90;break;
     case ESC:break;
     }//fecha switch
 if(a1!=ESC)
  {//if 3920. O formato de fprintf é para excel
   if(varreal>=1)
   {
//   printf(" tempqobs=%f\t imaxobs=IT=%d", tempqobs,  imaxobs);para
   fprintf(p7,"  Qmax0bs=%f\t TpicoObs=%d\n ",tempqobs,imaxobs);
   fprintf(p7,"  %s\t  E\t  Qmax\t  Tpico\t   Vobs\t  Vcalc\t  FG\n",var);
   fprintf(p7,"  %s\n","*E-03");
   }
   else
   {
   fprintf(p7,"  Qmax0bs=%f\t TpicoObs=%d \n",tempqobs,imaxobs);
```

```
  fprintf(p7,"  %s\t  E\t  Qmax\t  Tpico\t    Vobs\t  Vcalc\t  FG\n",var);
  }
  for(cont=-porc;cont<=porc;cont+=5)
  { //for de cont39
          contf = (float) cont;//[eq-165]
          varproc = varreal * (1 + contf/100) ;//[eq-166]
    switch(x)
    {
    case 'a':SZM=varproc;break;
    case 'b':T0=varproc;break;
    case 'c':TD=varproc;break;
    case 'd':CHV=varproc;break;
    case 'e':RV=varproc;break;
    case 'f':SRMAX=varproc;break;
    case 'g':SR0=varproc;break;
    case 'h':INFEX=varproc;break;
    case 'i':XK0=varproc;break;
    case 'j':HF=varproc;break;
    case 'k':DTH=varproc;break;
    }//fecha switch
    simu=1;//vai dizer ao processo que esta rodando simula()
    processo();
   //fprintf(p7,"  %.6f  %.6f %12.5Le  %d    %.6f  %.6f\n",
   if(varreal>=1)
   {
   FG= (float) ( (tempq/tempqobs)+(Vcalc/Vobs) ) / 2;
   printf("\n FG = %f",FG);
  /* fprintf(p7,"  %.6f\t  %.6f\t %12.5Le\t  %d\t    %.6f\t  %.6f\t  %.6f\n",
              varproc/1000,E,(long double) tempq,imax,Vobs,Vcalc,
              ((tempq/tempqobs)+(Vcalc/Vobs))/2);   */
   fprintf(p7,"  %.6f\t  %.6f\t %12.5Le\t  %d\t    %.6f\t  %.6f\t  %.6f\n",
              varproc/1000,E,(long double) tempq,imax,Vobs,Vcalc,FG/1000000);

   }
   else
   {
   fprintf(p7,"  %.6f\t  %.6f\t %12.5Le\t  %d\t    %.6f\t  %.6f\t  %.6f\n",
               varproc,E,(long double) tempq,imax,Vobs,Vcalc,
              ((tempq/tempqobs)+(Vcalc/Vobs))/2);
   }
       }//fim de for de cont39

  do{
  printf("\n\tQuer fazer outro estudo - Digite: ESC=sair [s]=continuar");
  nx=tolower(getch());if(nx==ESC)otimiza();
  }while ( (nx!=ESC) && ( nx!='s'));
  if(nx==ESC)flagotm=1;else otimiza();
 }//fim  if 3920
}//fim de simula

/***************************alteraçao de ln a/tanb************/
                      alteraln_atanb(void)
{
int m;
char b, fator[7];

do{
clrscr();t1();
printf("\n\n\n\n\n\n\tDigite o Fator p/ alterar os valores de ln(a/tanB)por exemplo: ");
printf("\n\n  (0.77=reduz 23% ** 1.138=aumenta em 13.8% ** 1.00=NÃO altera):");
```

```
gets(fator);indtop=atof(fator);
printf("\n\t Fator alteração: %f. Correto [s]  [n]  [ESC]-SAIR ",indtop);
b=tolower(getche());
  }while( (b!='s') && (b!= ESC) );

if(b==ESC)return 1;
if(b=='s')flagatgb=7;
return 0;
}

/***************** Somente abertura de arquivos ******************/
                      void openarq()
{
strcpy(arq[1],"$inputs.dat"); //chuva, evapo_pot e Qobservada
 strcpy(arq[2],"$subcat.dat"); //Info sub-bacias
 strcpy(arq[3],"$params.dat"); //parâmetros
 strcpy(arq[5],"$mapfile.dat");//ln(a/tanB) das sub-bacias
 clrscr();
 for(i=1;i<4;i++)
 {
             if(i==3)
             {
             if( (SZM!=0) && (RV!=0) && (CHV!=0))continue;
    }
 if((fp[i]=fopen(arq[i],"r"))== NULL)msg0(i); fseek(fp[i],SEEK_SET,0);
}//Arquivos abertos fim do for
            if(kab=='s')//if 101
            {
            strcpy(arq[4],arq_novo);
            flagarqnovo=1;
            } //arquivo de saida
   else //ifelse 101
            {
            strcpy(arq[4],"$output.dat");
            } //arquivo de saida fim ifelse 101

            if((fp[4]=fopen(arq[4],"w"))== NULL)msg0(4);
            fseek(fp[4],SEEK_SET,0);//Posiciona ponteiro no início do arquivo
 }//fim de openarq

 /********************confirma encerramento**********************/
                       void encerra(void)
{
char fim;
do{
            clrscr();t1();
            printf("\n\n\n\n\n\n");
            printf("\n\n\      ***********  DESEJA ENCERRAR ESTA SESSÃO ?   ***********   ");
            printf("\n\n                       [ S ]  [ N ] => ");
            fim=tolower(getche());
   }while( (fim!='s') && (fim!='n') );
if(fim=='s'){clrscr();exit(0);}
if(fim=='n')clrscr();
}// fim de encerra

/*************** max() Calcula:Valores max Vobs,QOBS e imaxobs ******/
                      void max(void)
{
  if(Vobs==0)
  {
```

```
        tempqobs=QOBS[0]; //[eq-167]
        for(IT=1;IT<=NSTEP;IT++)
        {
                Vobs += 0.5*(QOBS[IT]+QOBS[IT-1])*DT;//[eq-168]
                if(tempqobs<QOBS[IT])
                {
                        tempqobs=QOBS[IT];//[eq-169]
                        imaxobs=IT;//[eq-170]
                }
        }
  }
}//fecha max
```

```
/**** GRAIN.C ➔ PROGRAMA PARA DESENHAR GRAFICOS NA TELA ******/
//************************* BIBLIOTECAS
#include <string.h>
#include <graphics.h>
#include<stdlib.h>
#include <conio.h>
#include<stdio.h>

//************************* DEFINI€ÇO
#define ESC 27
#define maximo 1200

//************************* FUNCOES
void    qgraf(float qy);
void    grafmode();// abre o sistema grafico
void    ler_q();


//************************* VARIAVEIS GLOBAIS

//Inteiras
int                     iesc=0,
                        i,
                        IT,
                        j,
                        j2,
                        flagq=0,
                        NSTEP,
                        orx=120,
                        ory=400,
                        qx,
                        R[maximo],
                        sig =4, /* digitos significativos */
                        sig3=3,
                        yq,yq1,//ordenadas de vazao
                        yr,yr1;//ordenados para chuva

//Strings
char                    arq_qpro[25],
                        g,
                        me[25],
                        qab,
                        com,
                        destino[12],
                        *turbo=".grf",
                        str[25],
                strain[25];

//REAIS
float           Qcalc[maximo],
                        qobsmax,
                        Qobs[maximo],
                        chuva[maximo],
                        chuvamax=0,//maximo valor de chuva
                        ymax,//maxima ordenada para vazÆo
                        yrmax,//maxima ordenada para CHUVA
                        yord[20],
                        yrain[20];
//REAIS DE DUPLA PRECISÃO
double  num,
```

```
        rain;

//PONTEIROS
FILE                    *fp;


//*************************  main ()
        void main()//chama grain.c()
{

do{
        clrscr();
        printf("\nQuer ver arquivos disponiveis no diretorio:");
        printf("\n [s]- Sim  [n]-Nao  [ESC]-Sair ");
        qab=tolower(getch()); if(qab == ESC)break;
        }while( (qab!='s') ||(qab!='s') || (qab!='s') );
if(qab=='s')
{
 clrscr();
 system("dir *.grf");
 getch();
 }

grafmode();//abre grafico
ler_q();
//----------------------- Processamento
do{
cleardevice();
settextstyle(SMALL_FONT , HORIZ_DIR, 7);
setlinestyle(0, 1, 3);
setbkcolor(15);//era7
setcolor(1);
//----------------------- p/ desenho do retangulo da legenda
rectangle(10,10,629,469);
rectangle(20,20,619,459);
rectangle(30,30,609,449);
outtextxy(250,40, "Graf_Chuv_Vazao");//legenda
line(250,50,370,50);
        do
        {
        outtextxy(145,103, "[D]IGITAR:");//legenda
        outtextxy(145,133, "[A]-Grafico para Tempo  de    0 a  400 h");
        outtextxy(145,153, "[B]------------------>  de  400 a  800 h");
        outtextxy(145,173, "[C]------------------>  de  800 a 1200 h");
        //outtextxy(145,193, "[X]-Mudar arquivo de dados");
        outtextxy(145,213, "[ESC]<-   ENCERRAR ESTA SESSAO");
        g=tolower(getch());
        }while( (g!='a') && (g!='b') && (g!='c') && (g!='x') && (g!=ESC));
        if(g==ESC) {closegraph();break;}
cleardevice();
setcolor(8);
line(orx,ory,orx,ory-300);//eixo y
line(orx,ory,orx+400,ory);//eixo x
line(orx,ory-300,orx+400,ory-300);//eixo y fechamento
line(orx+400,ory-300,orx+400,ory);//eixo x fechamento
moveto(orx,ory);
setlinestyle(1, 1, 1);


        for(i=30;i<=300;i+=30)
```

```
            {
            line(orx,ory-i,orx+400,ory-i);//divisoes do eixo y
            yord[i/30]= (ymax/10)*(i/30) ;
            num = (double)yord[i/30];
            gcvt(num, sig, str);
            outtextxy(60, ory-i-3,str);//escala vazÆo
            yrain[i/30]= (yrmax/1000)*(i/30) ;//perfeito
            rain = (double)yrain[i/30];
            gcvt(rain, sig3, strain);
            outtextxy(orx+410, ory-300+i-3,strain);//escala chuva
            }
            for(j=40;j<=400;j+=40)
            {
            line(orx+j,ory,orx+j,ory-300);
                        if(g=='a'){j2=j;}
                        if(g=='b'){j2=j+400;}
                        if(g=='c'){j2=j+800;}
            itoa(j2,me,10);
            moveto(orx+j-10,ory+12);
            outtext(me);
            }//divisoes do eixo x
 moveto(orx+200,ory+32);
 outtext("Tempo(h)");
//------------------------trecho 0-400 plotagem dos pontos
for(IT=1;IT<400;IT++)
{//inicio do for a
            setcolor(4);
            setlinestyle(0, 1, 2);
            if(g=='a')
            {
                        if((IT)<NSTEP)
                        {
                        yq =1+ (int) (300*Qobs[IT]/ymax);
                        yq1=1+ (int) (300*Qobs[IT-1]/ymax);
                        line((orx+IT), (ory-yq),(orx+IT-1), (ory-yq1));
/**************  bloco para chuva ************************/
if( com=='s' ) {
                        setcolor(1);
                        yr =1+ (int) (300*chuva[IT]/chuvamax);
                        yr1=1+ (int) (300*chuva[IT-1]/chuvamax);
                        line((120+IT), (100+yr),(120+IT-1), (100+yr1));
                        setcolor(4);
                        }
/**************  FIM bloco para chuva ************************/
                        }
                        else
                        {
                        //setcolor(11);//qdo finalizou desenha linha vertical ciana
                        //line( (orx+NSTEP),(ory+5), (orx+NSTEP),(ory-1.1*yq1));
                        }
            setcolor(4);
            }// ordenada do valor de Vaz_OBS


            if(g=='b')
            {
                        if(NSTEP<401)
                        {
                        moveto(orx+100,ory-200);
                        outtext("Tempo Maximo do Evento <= 400 h");
```

```
                    }
                    else
                    {
                              if((IT+400)<NSTEP)
                              {
                              yq=1+ (int) (300*Qobs[IT+400]/ymax);
                              yq1=1+ (int) (300*Qobs[IT+399]/ymax);
                              line((orx+IT), (ory-yq),(orx+IT-1), (ory-yq1));

/**************  bloco para chuva ***********************/
if( com=='s' ) {
                    setcolor(1);
                    yr =1+ (int) (300*chuva[IT+400]/chuvamax);
                    yr1=1+ (int) (300*chuva[IT+399]/chuvamax);
                    line((120+IT), (100+yr),(120+IT-1), (100+yr1));
                    setcolor(4);
               }
/**************  FIM bloco para chuva ***********************/
                              }
                              else
                              {
                         //setcolor(11);
                              //line( (orx+NSTEP-400), (ory+5),(orx+NSTEP-400), (ory-1.1*yq1));
                              }
                    }
          setcolor(4);
          }// ordenada do valor de Vaz_OBS
          if(g=='c')
          {
                    if(NSTEP<801)
                    {
                    moveto(orx+100,ory-200);
                    outtext("Tempo Maximo do Evento <= 800 h");
                    }
                    else
                    {
                              if((IT+800)<NSTEP)
                              {
                              yq=1+ (int) (300*Qobs[IT+800]/ymax);
                              yq1=1+ (int) (300*Qobs[IT+799]/ymax);
                              line((orx+IT), (ory-yq),(orx+IT-1), (ory-yq1));
/**************  bloco para chuva ***********************/
if( com=='s' ) {
                    setcolor(1);
                    yr =1+ (int) (300*chuva[IT+800]/chuvamax);
                    yr1=1+ (int) (300*chuva[IT+799]/chuvamax);
                    line((120+IT), (100+yr),(120+IT-1), (100+yr1));
                    setcolor(4);
            }/**************  FIM bloco para chuva ***********************/

                              }
                              else
                              {
                              //setcolor(11);
                              //line( (orx+NSTEP-800), (ory+5),(orx+NSTEP-800), (ory-1.1*yq1));
                              }
                    }
setcolor(4);
          }// ordenada do valor de setcolor(4);//observado
          line(530,70, 540,70);
```

```
settextstyle(SMALL_FONT , HORIZ_DIR, 4);
outtextxy(545,63, "Qobs");//legenda
setcolor(4);//calculado

if(g=='a')
{
setcolor(3);//calculado
        if((IT)<NSTEP)
        {
        yq=1+ (int) (300*Qcalc[IT]/ymax);
        yq1=1+ (int) (300*Qcalc[IT-1]/ymax);
        line((orx+IT), (ory-yq),(orx+IT-1), (ory-yq1));
        }
        else
        {
    //  setcolor(11);
    //  line( (orx+NSTEP), (ory+5),(orx+NSTEP), (ory-1.1*yq1));
        }
setcolor(3);
}// ordenada do valor de Vaz_CALC
//se eu colocar IT+401 da grafico de area

if(g=='b')
{
        if(NSTEP<401)
        {
        moveto(orx+100,ory-200);
        outtext("Tempo Maximo do Evento <= 400 h");
        }
        else
        {
        setcolor(3);//calculado
                if((IT+400)<NSTEP)
                {
                yq=1+ (int) (300*Qcalc[IT+400]/ymax);
                yq1=1+ (int) (300*Qcalc[IT+399]/ymax);
                line((orx+IT), (ory-yq),(orx+IT-1), (ory-yq1));
                }
                else
                {
            //  setcolor(11);
                //line( (orx+NSTEP-400), (ory+5),(orx+NSTEP-400), (ory-1.1*yq1));
                }
        }
setcolor(3);
}// ordenada do valor de Vaz_CALC




if(g=='c')
{
        if(NSTEP<801)
        {
        moveto(orx+100,ory-200);
        outtext("Tempo Maximo do Evento <= 800 h");
        }
        else
        {
        setcolor(3);//calculado
```

```
                                if((IT+800)<NSTEP)
                                {
                                yq=1+ (int) (300*Qcalc[IT+800]/ymax);
                                yq1=1+ (int) (300*Qcalc[IT+799]/ymax);
                                line((orx+IT), (ory-yq),(orx+IT-1), (ory-yq1));
                                }
                                else
                                {
                                //setcolor(11);
                                //line( (orx+NSTEP-800), (ory+5),(orx+NSTEP-800), (ory-1.1*yq1));
                                }
                        }
                setcolor(3);
                }// ordenada do valor de Vaz_CALC
                setcolor(3);
                line(530,90, 540,90);
                settextstyle(SMALL_FONT , HORIZ_DIR, 4);
                outtextxy(545,83, "Qcalc");
                {
                setcolor(1);
                line(530,50, 540,50);
                settextstyle(SMALL_FONT , HORIZ_DIR, 4);
                outtextxy(545,43, "Chuva");//legenda
                setcolor(14);
                 }

}// fim do for a
//------------------------ Titulos
settextstyle(TRIPLEX_FONT , HORIZ_DIR, 1);
setcolor(8);// cinza escuro
outtextxy(170,15, " UnB  -  MTARH  -  Modelo Chuva-Vazao");
outtextxy(170,35, "       T O P M O D E L  - 1998 ");
settextstyle(SMALL_FONT , VERT_DIR, 4);
setcolor(8);
outtextxy(639-33,getmaxy()-325, "Precipita‡Æo(m/h/100) ");
outtextxy(33,getmaxy()-325, "VazÆo espec¡fica(m/h) ");
getch();
//restorecrtmode();
}while( g!=ESC);
closegraph();
restorecrtmode();
}//fim de main

//************************** qgraf()
void      qgraf( float qy)
{
int saida=0;

do{
  qy*=10; flagq++;
  if(qy>1)
   {
                for(iesc=2;iesc<10;iesc++)
                {
                if(qy<iesc){saida=1;break;}
                }
   }
  }while(saida==0);
}//fim de qgraf()
```

```
//*************************  grafmode()-abre modo grafico
                                                    void grafmode()
{

int gdriver = DETECT, gmode, errorcode;

initgraph(&gdriver, &gmode, "c:");
errorcode = graphresult();
if (errorcode != grOk)  /* um erro ocorreu */
{
initgraph(&gdriver, &gmode, "a:");
}
if (errorcode != grOk)  /* um erro ocorreu */
   {
   printf("Ocorreu Erro: %s\n", grapherrormsg(errorcode));
   printf("Pressione qualquer tecla:");
   getch();
   exit(1); /* termina com  codigo de erro */
   }
}// fim de grafmode();


//*************************  ler_q valores
          void   ler_q()
{//inicio

for(IT=0;IT<1200;IT++)
{Qobs[IT]=0;Qcalc[IT]=0;chuva[IT]=0;}

do{
          cleardevice();
          settextstyle(DEFAULT_FONT , HORIZ_DIR, 1);
          outtextxy(145,133, "Digite nome do arq de Resultados:");
          printf("\t");
          gets(arq_qpro);
          outtextxy(145,153, "O Arq. Resultados atual :");
          outtextxy(145,173, arq_qpro);
          outtextxy(145,193, "Esta Correto ? [s]- Sim  [n]-Nao  [ESC]-Sair ");
          qab=tolower(getch()); if(qab == ESC)break;
                    if(strlen(arq_qpro)==0)
                    {
                    qab='n';
                    }
                    if(strlen(arq_qpro) >25)
                    {
                    qab='n';
                    }
          }while (qab!='s');

strcat(arq_qpro,turbo);
if( (fp=fopen(arq_qpro,"r"))== NULL)
{
printf("\n\n\tFinalizando ! Problema: abertura de- %s",arq_qpro);
getch();
exit(0);}
fseek(fp,SEEK_SET,0);
fscanf(fp,"%d",&NSTEP);
fscanf(fp,"%f",&qobsmax);
do{
  printf("\n\n\t*Arquivo contem  dados de chuva: [s] ou [n] ");
```

```
  com=tolower(getche());
  }while( (com!='s') && (com!='n') ) ;


for(IT=0;IT<NSTEP;IT++)
{
if( com=='s' )
{
fscanf(fp,"%d%f%f%f",&R[IT],&Qobs[IT],&Qcalc[IT],&chuva[IT]);
                        if(chuvamax<chuva[IT]){chuvamax=chuva[IT];}
}
else
fscanf(fp,"%d%f%f",&R[IT],&Qobs[IT],&Qcalc[IT]);
}
qgraf(qobsmax);//maximo p/ montar a escala y NSTEP a x
ymax=(float)  iesc / 10 ;
for(i=2;i<=flagq;i++){ymax/=10;}

flagq=0;
qgraf(chuvamax);//maximo p/ montar a escala y NSTEP a x
yrmax=(float)  iesc / 10 ;
for(i=2;i<=flagq;i++){yrmax/=10;}

}//fim ler_q()
```