UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA FACULDADE DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

APLICAÇÃO DE DISTINTAS DISCRETIZAÇÕES ESPACIAIS NO MODELO HIDROLÓGICO CONCENTRADO PRECIPITAÇÃO-VAZÃO HEC-HMS

JEFERSON DA COSTA

ORIENTADOR: NÉSTOR ALDO CAMPANA CO-ORIENTADOR: NABIL JOSEPH EID

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM – 044/2001 BRASÍLIA/DF: MARÇO 2002

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA FACULDADE DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

APLICAÇÃO DE DISTINTAS DISCRETIZAÇÕES ESPACIAIS NO MODELO HIDROLÓGICO CONCENTRADO PRECIPITAÇÃO-VAZÃO HEC-HMS

JEFERSON DA COSTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL 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)

NABIL JOSEPH EID, DSc (UnB) (CO-ORIENTADOR)

SÉRGIO KOIDE, PhD (UnB) (EXAMINADOR INTERNO)

JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA, Dr. (UFSM) (EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 20 DE MARÇO DE 2002

FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, JEFERSON DA		
Aplicação de distintas discretizações esp	baci	ais no modelo hidrológico concentrado
precipitação-vazão HEC-HMS [Distrito Federal] 2002.		
xvi, 127p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recurso		
Hídricos, 2002).		
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.		
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.		
1. Modelagem hidrológica	2.	Precipitação-vazão
3. HEC-HMS	4.	Discretização espacial
I. ENC/FT/UnB	II.	Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, J. (2002). Aplicação de distintas discretizações espaciais no modelo hidrológico concentrado precipitação-vazão HEC-HMS. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM 044/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jeferson da Costa.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Aplicação de distintas discretizações espaciais no modelo hidrológico concentrado precipitação-vazão HEC-HMS. GRAU: Mestre ANO: 2002

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

Jeferson da Costa QI 07 BI: "S" Apartamento: 204 Guará I – DF. Brasil. CEP: 71.020-196

DEDICATÓRIA

Esta dissertação é dedicada aos meus pais Gerson e Maria Neumann e para minha querida Christina, que com paciência e carinho possibilitou a sua realização.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, aos professores Nestor Aldo Campana e Nabil Joseph Eid, pela orientação, ajuda e atenção durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À querida professora Cristina Celia Silveira Brandão, que sempre esteve presente com seus conselhos.

Ao professor Sérgio Koide, que apesar de não ser orientador, em todos os momentos, esteve aberto a resolver dúvidas e a fornecer direcionamentos.

Aos professores, Marco Antônio Almeida de Souza, Oscar Cordeiro Netto e Ricardo Silveira Bernardes, pelo que transmitiram e ensinaram.

Aos amigos Rodrigo, Arlene, Allan e Mauro pela colaboração e a todos os outros, que fiz no MTARH.

v

APLICAÇÃO DE DISTINTAS DISCRETIZAÇÕES ESPACIAIS NO MODELO HIDROLÓGICO CONCENTRADO PRECIPITAÇÃO-VAZÃO HEC-HMS

RESUMO

O trabalho avaliou o efeito da variação da discretização espacial da bacia hidrográfica Corumbá até a seção da barragem Corumbá IV sobre os resultados produzidos pelo modelo hidrológico concentrado precipitação – vazão HEC-HMS versão 2.0. Assim, a bacia hidrográfica foi dividida nas configurações espaciais de 23 sub-bacias, 08 sub-bacias e bacia hidrográfica única. A etapa de calibração foi realizada com dados obtidos em estações fluviométricas, situadas dentro da área de estudo, para dois eventos máximos de precipitação, sendo, posteriormente, executada a verificação para um terceiro evento extremo. Por conseguinte, o modelo foi aplicado para as distintas discretizações espaciais nos três eventos, obtendo-se hidrogramas na seção da barragem. Os valores encontrados indicaram que a variação do nível da discretização espacial na bacia hidrográfica considerada para os eventos selecionados não apresentou grandes influências nos hidrogramas resultantes do modelo HEC-HMS.

DIFFERENT SPATIAL DISCRETIZATION ON THE HYDROLOGIC LUMPED RAINFALL-RUNOFF MODEL HEC-HMS

ABSTRACT

This study explored the effect of spatial resolution variation on the output of HEC-HMS hydrological lumped model version 2.0. There were established three different spatial configuration of 23 sub-basins, 08 sub-basins and only one basin. HEC-HMS was calibrated in discharge gages, located inside the study area to two extreme events and validated to other one. Therefore, the model was applied to those spatial discretization to the three extreme events. The results indicated that the variation of spatial discretization in the basin did not appear relevant influences in the hydrographs.

ÍNDICE

1. IN	TRODUÇÃO	Página 01
2. OE	BJETIVOS	03
3. RE	EVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3.1	1. Modelos Hidrológicos	04
	3.1.1. Classificação dos Modelos Hidrológicos	05
	3.1.2. Modelos Hidrológicos	07
	3.1.2.1. Método Racional	07
	3.1.2.2. Hidrograma Unitário	08
	3.1.2.3. SSARR	09
	3.1.2.4. Stanford IV	10
	3.1.2.5. SCS	11
	3.1.2.6. IPH	12
	3.1.2.7. SMAP	15
	3.1.2.8. MODHAC97	16
	3.1.2.9. AÇUMOD	18
	3.1.2.10. TOPMODEL	21
	3.1.2.11. DR3M	23
	3.1.2.12. HEC-HMS	26
	3.1.3. Considerações sobre Modelos	43
	3.1.4. Escala Espacial Hidrológica	47
3.2	2. Geoprocessamento	52
4. ÁRE	A DE ESTUDO	57
5. MET	ODOLOGIA	60
5.1	I. Estrutura Geral do Trabalho	60
5.2	2. Justificativa do Modelo Selecionado	63
5.3	3. Discretização Espacial	64
5.4	4. Características da Bacia Hidrográfica	71
5.5	5. Dados Hidrológicos	77

viii

	5.6.	Tratamento dos Dados Históricos	84
	5.7.	Calibração do Modelo	86
	5.8.	Verificação do Modelo	89
	5.9.	Aplicação do Modelo para as Discretizações Espaciais	89
6.	RESU	_TADOS	90
	6.1.	Resultados da Etapa de Calibração	90
	6.2.	Resultados da Etapa de Verificação	99
	6.3.	Resultados da Etapa de Aplicação nas Discretizações Espaciais	102
7.	ANÁLI	SE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	108
	7.1.	Análise dos Resultados da Etapa de Calibração	108
	7.2.	Análise dos Resultados da Etapa de Verificação	109
	7.3.	Análise dos Resultados da Etapa de Aplicação nas Distintas	
		Discretizações Espaciais	110
8.	CONC	LUSÕES E RECOMENDAÇÕES	113
RE	FERÊN	CIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
AF	PÊNDICI	E A – CURVAS DE CHUVAS ADIMENSIONAIS	121
AF	PËNDICI	E B – ISOIETAS DO EVENTO 3 PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO)
			123

ÍNDICE DE FIGURAS

Página
Figura 3.1 – Representação Típica do Escoamento Superficial da Bacia Hidrográfica no HEC-HMS 27
Figura 4.1 – Área de Estudo (Bacia Hidrográfica Corumbá até Barragem) 58
Figura 5.1 – Estrutura Geral do Trabalho 61
Figura 5.2 – MDE da Bacia Hidrográfica Corumbá até a Barragem (Altimetria) 66
Figura 5.3 – Discretização Espacial com 23 Sub-bacias Hidrográficas 67
Figura 5.4 – Discretização Espacial com 08 Sub-bacias Hidrográficas 69
Figura 5.5 – Discretização Espacial com Bacia Hidrográfica Única 70
Figura 5.6 – Localização das Estações Pluviométricas e Fluviométricas Analisadas 83
Figura 6.1 – Representação Esquemática da Estação Fluviométrica Ponte Anápolis- Brasília 90
Figura 6.2 – Representação Esquemática da Estação Fluviométrica S ^{to} Antônio do Descoberto91
Figura 6.3 – Representação Esquemática da Estação Fluviométrica Rio Antas 91
Figura 6.4 – Calibração na Sub-bacia Hidrográfica Rio Antas para Evento 1 93
Figura 6.5 – Calibração na Sub-bacia Hidrográfica Rio Antas para Evento 2 94
Figura 6.6 – Calibração na Sub-bacia Hidrográfica Ponte Anápolis – Brasília para Evento 1 95
Figura 6.7 – Calibração na Sub-bacia Hidrográfica Ponte Anápolis – Brasília para Evento 2 96
Figura 6.8 – Calibração na Sub-bacia Hidrográfica S ^{to} Antônio do Descoberto para Evento 1 97
Figura 6.9 – Calibração na Sub-bacia Hidrográfica S ^{to} Antônio do Descoberto para Evento 2 98
Figura 6.10 – Verificação na Sub-bacia Hidrográfica Ponte Anápolis – Brasília para Evento 3100
Figura 6.11 – Verificação na Sub-bacia Hidrográfica S ^{to} Antônio do Descoberto para Evento 3101

х

Figura 6.12 –	Representação Esquemática das 23 Sub-bacias Hidrográficas no HEC- HMS102
Figura 6.13 -	Representação Esquemática das 08 Sub-bacias Hidrográficas no HEC-HMS103
Figura 6.14 –	Representação Esquemática da Bacia Hidrográfica Única - HEC-HMS 103
Figura 6.15 –	Hidrogramas de Projeto para as Discretizações Espaciais para o Evento 1104
Figura 6.16 –	Hidrogramas de Projeto para as Discretizações Espaciais para o Evento 2105
Figura 6.17 –	Hidrogramas de Projeto para as Discretizações Espaciais para o Evento 3106
Figura A.1 –	Curvas Adimensionais122
Figura B.1 –	Isoietas para o Evento 3124

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 3.1 – Tipos de Escalas Hidrológicas	48
Tabela 5.1 – Tipos de Uso e Ocupação do Solo e Valores de CN	74
Tabela 5.2 – Larguras e Profundidades Médias dos Rios	76
Tabela 5.3 – Parâmetros Físicos das Sub-bacias Hidrográficas	78
Tabela 5.4 – Estações Pluviométricas em Operação	79
Tabela 5.5 – Estações Fluviométricas em Operação	81
Tabela 5.6 - Tempo de Concentração na Bacia Hidrográfica - Método Cinemático	85
Tabela 6.1 – Parâmetros Estimados e Calibrados	92
Tabela 6.2 - Resumo dos Principias Resultados da Etapa de Calibração	99
Tabela 6.3 - Resumo dos Principais Resultados da Etapa de Verificação	-101
Tabela 6.4 – Resumo dos Principais Resultados da Etapa de Aplicação da Discretizações	s 107

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIAÇÕES

Α	Área da Bacia Hidrográfica [L ²]
а	Área de Drenagem por Unidade de Comprimento da Curva de Nível
	Cortada pelo Escoamento
AÇUMOD	Modelo Hidrológico com Inclusão de Açudes
AMC	Umidade Antecedente
AINP	Percentual de Áreas Impermeáveis
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASBX	Expoente de Esvaziamento do Reservatório Subterrâneo
a/tan b	Índice Topográfico
CAD	Computer Aided Design
СНОМ	Representa a Fração da Evapotranspiração Potencial que é Suprida
	Diretamente pela Chuva
cm ²	Centímetro Quadrado [L ²]
CN	Curve Number
COORD3	Programa de Transformação de Coordenadas
Ср	Coeficiente de Armazenamento do Hidrograma Unitário
CQI	Coeficiente de Descarga do Reservatório Intermediário de Infiltração
CQR	Coeficiente de Descarga do Reservatório Intermediário do Escoamento
	Superficial
Crs	Coeficiente Máximo do Escoamento Superficial Direto
Crt	Nível Correspondente à Capacidade Média de Água no Solo [L]
CRWR-Vector	Pré-Processador do Arc View
Ct	Coeficiente da Bacia Hidrográfica
Dcrt	Capacidade de Armazenamento de Água no Solo [L]
DF	Distrito Federal
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (ANEEL)
DR3M	Distributed Routing Rainfall – Runoff Model
DXF	Tipo de Extensão de Arquivo de Desenho
EPXM	Capacidade Máxima de Interceptação da Cobertura Vegetal [L]
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EUA	Estados Unidos da América
fc	Taxa Constante de Perda

xiii

FN	Parâmetro de Infiltração
GO	Estado de Goiás
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
HEC-PrePro	Pré-Processador do Arc View Acoplado ao HEC-HMS
HEC-1	Hydrologic Engineering Center – Modelo Predecessor ao HEC-HMS
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
HU	Hidrograma Unitário
1	Vazão de Entrada [L ³ /T]
la	Perda Inicial
lb	Declividade Média de Cada Sub-bacia Hidrográfica [L/L]
lc	Declividade Equivalente Constante do Rio [L/L]
IDEC	Coeficiente de Infiltração
li	Declividade Total do Trecho [L/L]
IMIN	Infiltração Mínima [L]
IMPV	Percentual da Área Total que Contribui para Escoamento Superficial
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
IPH II	Modelo Precipitação-Vazão Versão II
IPH III	Modelo Precipitação-Vazão Versão III
IPH IV	Modelo Precipitação-Vazão Versão IV
IPHMEN	Modelo Precipitação-Vazão Versão Mensal
κ	Parâmetro do Modelo de Escoamento Subterrâneo
К	Tempo de Viagem da Onda de Cheia [T]
K3	Parâmetro referente a Cobertura Vegetal
km	Quilômetro [L]
km²	Quilômetro Quadrado [L ²]
L	Comprimento do Rio Principal [L]
LANDSAT	Satélite de Observação da Terra
Larg	Largura Transversal [L]
L _{CG}	Distância da Seção Principal ao Ponto do Rio Mais Próximo ao Centro
	de Gravidade da Bacia Hidrográfica [L]
Li	Comprimento do Trecho [L]
m	Metro [L]
т	Parâmetro do Modelo TOPMODEL [L]
m²	Metro Quadrado [L ²]
MDE	Modelo Digital de Elevação

xiv

MODHAC97	Modelo Hidrológico Auto-Calibrável Versão 97		
MSDHD	Microssistema de Dados Hidrometeorológicos		
MTARH	Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos		
n	Coeficiente de Manning		
NASA	National Aeronautics and Space Administration		
NAVMO	Modelo Hidrológico Conceitual, Diário e Distribuído em Sub-bacias		
	Hidrográficas		
NCGIA	National Center for Geographical Information and Analysis		
Р	Precipitação Acumulada no Tempo [L]		
Ре	Precipitação Efetiva no Tempo [L]		
PIXEL	Contração de Picture Element		
PROHD	Programa de Homogeneização de Dados		
PSRM-QUAL	Penn State Runoff Quality Model		
Q	Vazão Inicial [L ³ /T]		
Qf	Vazão Final [L ³ /T]		
qi	Fluxo por Unidade de Comprimento do Contorno [L ² /T]		
q₀(t)	Vazões observadas;		
QIMax	Nível Superior do Reservatório Intermediário de Infiltração [L]		
Qp	Vazão de Pico [L ³ /T]		
q _s (t)	Vazões calculadas.		
QRMax	Nível Superior do Reservatório Intermediário de Escoamento		
	Superficial [L]		
R	Coeficiente de Armazenamento		
RMAX	Reservatório da Precipitação Interceptada		
RSBX	Capacidade Máxima do Reservatório Subterrâneo [L]		
RSPX	Capacidade Máxima do Reservatório Superficial [L]		
RSSX	Capacidade Máxima do Reservatório Sub-superficial [L]		
S	Capacidade Máxima da Camada Superior do Solo		
S'	Declividade Média do Rio Principal ao Longo de L [L/L]		
SCS	Soil Conservation Service		
SHE	System Hydrologic European		
Si	Déficit de Armazenamento Local		
SIG	Sistema de Informação Geográfica		
SMA	Soil Moisture Accounting		
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure		

SPOT	Système Pour l'Observation de La Terra
SPRING	Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas
SSARR	Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation
St	Armazenamento de Água
t	Tempo [T]
Tan b	Declividade do Terreno
t _b	Tempo da Base [T]
tc	Tempo de Concentração [T]
Ti	Transmissividade Lateral no Local i na Profundidade zi $[L^2/T]$
То	Transmissividade Lateral para o Solo Saturado [L ² /T]
TOPMODEL	Topography Based Hydrological Model
tp	Tempo ao Pico [T]
t _{PR}	Tempo ao Pico do Hidrograma Requerido
tr	Duração da Precipitação
t _R	Duração da Precipitação do Hidrograma Requerido
UnB	Universidade de Brasília
US	United States
USACE	United States Army Corps of Engineers
USGS	United States Geological Survey
STANFORD IV	Modelo Hidrológico
UZSN	Parâmetro de Capacidade Nominal de Armazenamento
V	Velocidade [L/T]
X	Peso Adimensional
Z	Função objetivo
1st Tools	Pré-Processador do Arc View
Ь	Declividade do Terreno

xvi

1. INTRODUÇÃO

A crescente consciência dos impactos ambientais, provenientes da atividade humana, tem elevado a demanda por monitoramento e gerenciamento de situações críticas, tais como as enchentes, as estiagens e as poluições (Todini, 1988).

A disponibilidade de dados hidrológicos, na maioria das vezes, é escassa, a qual proporcionou o desenvolvimento de técnicas de transferência de informações, de um local para outro na bacia hidrográfica, ou seja, a regionalização de vazões. Essa carência de dados hidrológicos também incentivou o uso de modelos hidrológicos, ferramentas capazes de melhor explorar as informações existentes.

No contexto da realidade brasileira, há uma grande carência de dados de vazão, sendo que, em muitos locais, têm-se somente informações de precipitação. Os modelos hidrológicos podem, desse modo, ser empregados na previsão das vazões resultantes dessas precipitações, sendo assim, denominados como precipitação-vazão.

Dos modelos hidrológicos precipitação-vazão existentes, os denominados concentrados têm a capacidade de proporcionar resultados "mais rápidos" sobre o processo de transformação da precipitação em vazão, incorporando um modesto número de parâmetros para as fases de ajuste e operação. Apesar de sua simplicidade, os modelos concentrados têm provado bastante sucesso para representar bacias hidrográficas (Refsgaard e Knudsen, 1996).

Porém, esses modelos não consideram, de forma explícita, a variabilidade espacial de parâmetros que caracterizam os processos físicos na bacia hidrográfica. Em assim sendo, tais modelos utilizam variáveis e parâmetros únicos para a bacia hidrográfica.

O esforço empreendido na pesquisa hidrológica desenvolveu os modelos distribuídos de base física, os quais utilizam parâmetros que são relacionados diretamente às características físicas da bacia hidrográfica, como a topografia, o solo, a vegetação e a geologia e, ainda, operam com uma estrutura capaz de representar a bacia hidrográfica de forma discretizada, incorporando a variabilidade espacial das características físicas e condições meteorológicas.

Embora o modelo distribuído de base física tenha representado uma elevação do nível potencial na modelagem hidrológica, existem pontos de vista divergentes se realmente eles

oferecem um significativo aumento do desempenho na modelagem, quando comparados com os modelos concentrados.

Devido à complexidade dos problemas envolvidos, uma análise adicional não pode ser encarada como uma conclusão definitiva a cerca das capacidades e das limitações entre os modelos concentrados e distribuídos, mas sim para estabelecer uma base para discussões mais avançadas sobre o assunto.

Nesse cenário, insere-se o presente trabalho, onde se avaliou o efeito da discretização espacial de uma bacia hidrográfica sobre os resultados produzidos pelo modelo concentrado HEC-HMS. Assim, na bacia hidrográfica foram estabelecidas distintas configurações espaciais e a partir de uma precipitação de projeto foram observados os hidrogramas resultantes no respectivo exutório.

Como estudo de caso, foi selecionada a bacia hidrográfica do rio Corumbá até a seção prevista da barragem Corumbá IV, cujo reservatório tem a possibilidade de ser considerado como um dos principais mananciais abastecedores para o Distrito Federal e região do Entorno. Outro aspecto importante sobre essa bacia hidrográfica é a carência de dados hidrológicos, notadamente de descargas dos cursos d'água.

Esse trabalho está estruturado da seguinte forma: o segundo capítulo apresenta os objetivos propostos; o terceiro, apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto tratado; no quarto, há a apresentação da área de projeto; no quinto existe a abordagem da metodologia empregada; o sexto, é dedicado aos resultados encontrados; o sétimo, traz a análise e discussão dos resultados e, por último, o oitavo, que apresenta as conclusões e recomendações.

2. OBJETIVOS

Esta pesquisa teve como principal objetivo avaliar o efeito da discretização espacial de uma bacia hidrográfica sobre os resultados produzidos pelo modelo concentrado precipitaçãovazão HEC-HMS.

Essa avaliação foi efetuada por meio da comparação dos hidrogramas no eixo da barragem Corumbá IV em três níveis de discretização espacial.

O objetivo geral desagregou-se nos seguintes objetivos específicos, a saber:

- A definição de uma precipitação máxima de projeto;
- Uma avaliação do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica Corumbá; e
- O estudo da aplicabilidade do modelo HEC-HMS para a bacia hidrográfica Corumbá.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve visão do estágio atual e aplicabilidade dos modelos hidrológicos, notadamente, os do tipo precipitação-vazão.

3.1. Modelos Hidrológicos

Conforme definiu Tucci (1998):

"... o modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas".

Beven *et al.* (1994) esclareceram que o processo de modelagem envolve uma seqüência de estágios de simplificação, e que todo modelo é uma tentativa de capturar a essência da complexa natureza em uma forma mensurável.

De fato, o termo modelo representa o comportamento de um sistema por uma série de equações, expressando o relacionamento entre variáveis e parâmetros (Clarke, 1973).

O modelo hidrológico é uma técnica existente, utilizada pela ciência, a fim de compreender e representar o comportamento da bacia hidrográfica. Desse modo, o homem pode entender, melhor os diferentes processos existentes no ciclo hidrológico e utilizar os recursos hídricos de uma forma racional.

Dentre as diversas aplicações para os modelos hidrológicos destacam-se: a previsão do impacto da urbanização de uma bacia hidrográfica antes da sua ocorrência ou de alteração de um rio; a compreensão do comportamento dos fenômenos hidrológicos na bacia hidrográfica; o preenchimento de falhas nas séries hidrológicas de vazões; a estimativa de vazões para novos cenários existentes ou previstos para as bacias hidrográficas; o planejamento de novas obras para a contenção de cheias; a previsão de vazão em tempo real, entre outros.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados segundo vários critérios encontrados na literatura, os quais serão discutidos a seguir.

3.1.1. Classificação dos Modelos Hidrológicos

Segundo USACE (2000a), os modelos hidrológicos podem ser classificados em:

- Modelos Físicos representam o sistema por um modelo reduzido;
- Analógicos modelam o processo desejado por meio da analogia das equações que regem diferentes fenômenos. Como exemplo, tem-se a representação do sistema hidráulico por um circuito elétrico, em virtude da semelhança entre as equações do escoamento hidráulico e de um circuito elétrico; e
- Matemáticos representam a natureza por meio de uma equação ou um conjunto de equações matemáticas.

Com relação aos modelos matemáticos, os mesmos podem ainda ser classificados na seguinte forma:

- Quanto à discretização temporal discretos e contínuos, em que a distinção é aplicada, inicialmente, para os modelos de processo de escoamento em bacias hidrográficas. Enquanto os modelos discretos simulam a resposta de uma tempestade isolada de horas até dias de duração, os modelos contínuos simulam períodos longos, prevendo a resposta da bacia hidrográfica, tanto durante, como entre as precipitações;
- Quanto à discretização espacial concentrados e distribuídos, em que os modelos concentrados não levam em conta a distribuição espacial da variável de entrada, como também a variação espacial de parâmetros que caracterizam os processos físicos na bacia hidrográfica (Clarke, 1973). Já os, distribuídos são aqueles em que as variáveis e parâmetros de entrada dependem do espaço;
- Quanto àbase conceitual empíricos e conceituais, cuja distinção é convergida para a forma em que os modelos matemáticos foram desenvolvidos. Assim, os modelos são denominados conceituais quando possuem funções, utilizadas na sua elaboração, que consideram os processos físicos existentes no ciclo hidrológico. Entretanto, são empíricos quando fundamentados na observação das entradas e saídas, sem procurar, explicitamente, o processo de conversão;
- Quanto aos processos e variáveis determinísticos e estocásticos. Os modelos determinísticos são aqueles em que os dados de entrada, os parâmetros e os processos nos mesmos são considerados livres da variação aleatória e certamente conhecidos (Chow *et al.*, 1988). Contudo, quando a possibilidade de ocorrência das

variáveis é admitida e o conceito de probabilidade é introduzido na estrutura dos modelos, esses são chamados de estocásticos.

Torna-se claro que existem diversas classificações possíveis para os modelos hidrológicos, cuja diversidade de tipos e abordagens é resultante da forma que são considerados os processos físicos envolvidos.

A bacia hidrográfica apresenta uma grande variabilidade espacial dos parâmetros, em virtude, principalmente, da heterogeneidade da topografia, da pedologia, da cobertura vegetal e da geologia. Assim, a variabilidade do comportamento da bacia hidrográfica, devido aos diferentes usos possíveis do solo, pode ser grande.

Nesse sentido, os modelos denominados físicos-distribuídos tentaram retratar a bacia hidrográfica por meio de uma discretização mais detalhada, incorporando as melhores formulações conhecidas em cada processo hidrológico. Para tal, os referidos modelos buscaram estabelecer relações entre os parâmetros e as características físicas das bacias hidrográficas e um conhecimento distribuído do escoamento e dos impactos na bacia hidrográfica, conforme relatou Tucci (1998).

Righetto (1998) avaliou que quando a bacia hidrográfica é caracterizada por um conjunto de módulos, cada um com características hidrológicas próprias, os modelos conceituais baseados, fundamentalmente, na topografia da bacia são muito mais eficientes se estiverem acoplados com Sistemas de Informação Geográfica. Tal fato torna viável a definição de uma resolução refinada para a discretização dos módulos na bacia hidrográfica, de forma a se considerar algumas peculiaridades, como a topografia, as características do solo e a vegetação.

De forma prática, não existem modelos puramente distribuídos, pois são utilizadas discretizações numéricas, que de alguma forma, torna-os concentrados em uma pequena subdivisão computacional (Tucci, 1998).

É notório que os modelos distribuídos possuem uma melhor capacidade de representar a variabilidade espacial do sistema considerado; contudo, o elevado número de módulos computacionais para grandes bacias hidrográficas, pode dificultar um melhor entendimento por parte do usuário, principalmente, na integração dos processos e no ajuste de parâmetros.

Com referência aos modelos estocásticos e determinísticos, Chow *et al.* (1988) retrataram que se a variação aleatória dos resultados é grande, um modelo estocástico é mais apropriado, porque o resultado real pode ser bastante diferente do valor único, que o modelo determinístico pode produzir.

Deve-se atentar para o fato de que a definição de modelos conceituais é artificial, pois diversas funções empíricas são utilizadas na estrutura dos mesmos. Como exemplo, tem-se a utilização das equações de Darcy e Horton, que apesar de serem empíricas, estão relacionadas aos processos físicos do sistema.

Alguns modelos hidrológicos são apresentados no item subseqüente, tentando expor que diferentes algoritmos podem ser utilizados para representar os processos hidrológicos existentes em uma bacia hidrográfica.

3.1.2. Modelos Hidrológicos

Este item tem por fim apresentar alguns modelos hidrológicos de precipitação-vazão, discutindo, sucintamente, as abordagens utilizadas em cada estrutura de simulação. Não se tem a pretensão de esgotar o assunto, mas de esclarecer, brevemente, as distintas estruturas conceituais. A discussão das diversas abordagens das estruturas dos modelos é importante para posicionar a evolução e os principais aspectos positivos e negativos dos modelos hidrológicos.

O entendimento e a representação do comportamento hidrológico na bacia hidrográfica requerem a análise de todas as fases do ciclo hidrológico, contudo, serão abordados nesse item somente as fases identificadas como as mais importantes no mecanismo de transformação de precipitação em vazão, como a própria precipitação e os fenômenos que influenciam o escoamento superficial, isto é, a interceptação, a infiltração e a evaporação (também denominados de perdas).

3.1.2.1. Método Racional

A preocupação em representar, matematicamente, o processo de transformação da precipitação em vazão é antiga, porém, as primeiras tentativas de modelagem são

encontradas no final do século XIX e início do XX, fundamentalmente, com fórmulas empíricas desenvolvidas para casos particulares.

Nesse sentido, o método clássico para estimar a vazão máxima decorrente de uma precipitação de intensidade uniforme é denominado racional, o qual relaciona a área da bacia hidrográfica, a intensidade da precipitação e um coeficiente de escoamento superficial para determinar a vazão máxima (Mota e Tucci, 1983).

A intensidade da chuva é determinada por meio de análises estatísticas para um determinado período de recorrência desejado. O coeficiente de escoamento é um valor tabelado, que considera, principalmente, as perdas por infiltração e a retenção para cada tipo de cobertura superficial da bacia hidrográfica.

O método racional fornece a vazão máxima de projeto, mas não indica a forma e o volume do hidrograma de saída e, ainda, ignora a distribuição espacial da precipitação. A aplicação do método está restrita a bacias hidrográficas com área total ou inferior a 2 km² (Tucci, 1997).

3.1.2.2. Hidrograma Unitário

Em 1932, Sherman introduziu o conceito de hidrograma unitário, que é definido por Righetto (1998) como:

"... o hidrograma resultante de uma chuva excedente unitária uniformemente distribuída sobre a bacia e também ao longo de sua duração..."

O hidrograma unitário tem sido aplicado em simulações de escoamento em cursos d'água e em projetos e simulações de bacias hidrográficas urbanas e rurais.

A estimativa das ordenadas do hidrograma unitário em uma bacia hidrográfica pode ser feita com base nos registros de precipitação e vazão para um evento. O método admite que o hidrograma unitário reflete todos os fatores que afetam o escoamento na bacia hidrográfica em estudo, sendo esses considerados invariantes no tempo.

O hidrograma unitário admite que a precipitação é a mesma em toda a bacia hidrográfica no intervalo de tempo de cálculo considerado e que a intensidade da precipitação também é

constante no intervalo de tempo. Esse método considera, ainda, que a bacia hidrográfica comporta-se como um sistema linear, existindo, assim, a propriedade da superposição dos efeitos.

O hidrograma unitário, desenvolvido a partir de hietogramas e hidrogramas medidos na bacia hidrográfica, é aplicado somente para a própria bacia e para o ponto do escoamento onde foram obtidos os dados de vazão. Contudo, a situação freqüente de carência de dados históricos (precipitação e descarga) implicou no desenvolvimento dos hidrogramas unitários sintéticos, os quais são utilizados para outros pontos do escoamento de uma mesma bacia hidrográfica ou em bacias hidrográficas com características semelhantes (Chow *et al.*, 1988). Nesse contexto, têm-se os hidrogramas unitários sintéticos, como: de Snyder, o SCS (*Soil Conservation Service*) e o Clark.

3.1.2.3. SSARR

Um dos primeiros modelos conceituais de precipitação-vazão é o chamado SSARR (*Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*), desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers*. Esse modelo possui três módulos: simula o processo precipitação-vazão numa bacia hidrográfica; o escoamento em rios e reservatórios; e a regularização de vazão em reservatórios (Tucci, 1998). O modelo determina a precipitação e a acumulação da neve que atinge a bacia hidrográfica, estabelece a parcela retida pelo solo e o volume que gera escoamento (subsuperficial, superficial e subterrâneo). A vazão resultante corresponde a uma sub-bacia hidrográfica, que contribui para um rio ou reservatório.

A precipitação de entrada para o modelo é a média da bacia hidrográfica, ou seja, o modelo não admite uma discretização espacial dessa variável. Outro aspecto é que o referido modelo não considera uma restrição à retirada de água do solo, na expressão de atualização do estado de umidade do mesmo. De forma geral, o modelo SSARR tem sido utilizado em bacias hidrográficas de grande escala, onde as funções utilizadas dificultam o seu ajuste para o usuário que não conheça, suficientemente, o modelo. A quantidade de parâmetros do modelo é grande, embora apresente uma formulação simples dos processos hidrológicos (Tucci, 1998).

3.1.2.4. Stanford IV

O modelo Stanford IV foi apresentado por Crawford e Linsley em 1966 e gerou uma série de outras versões, sendo considerado como um modelo completo, devido ao número de algoritmos e processos representados (Tucci, 1998). O Stanford IV possui duas estruturas básicas: a) a simulação na bacia (*Land*) e b) a propagação no rio e canal (*channel*). Na primeira estrutura existe um submódulo que considera o degelo. A bacia hidrográfica é subdividida em sub-bacias, delimitadas por uma seção no rio. A escolha dessas seções de controle deve-se a uma ou mais das seguintes razões: existe um posto fluviométrico; deseja-se obter a saída das vazões ou devido a características de trechos e sub-bacias hidrográficas.

Segundo Tucci (1998), o modelo Stanford IV utiliza o parâmetro específico EPXM para representar a capacidade máxima de interceptação da cobertura vegetal de um segmento, onde o volume interceptado é evaporado de acordo com a evapotranspiração potencial. As área impermeáveis são consideradas por meio do parâmetro IMPV, que fornece o percentual da área total que contribui para o escoamento superficial. A infiltração no solo pode ocorrer devido à água que atinge o mesmo, quando existe precipitação (precipitação direta) e a que ocorre em função do armazenamento em depressões (infiltração retardada).

O modelo procura retratar a distribuição espacial da infiltração direta por meio da relação entre a capacidade de infiltração e a percentagem de área com capacidade de infiltração maior ou igual a um valor tabelado. Na infiltração retardada, o volume retido nas depressões do solo é reduzido, no período de chuvas, pela evaporação e infiltração. O modelo utiliza o parâmetro UZSN para representar a capacidade nominal de armazenamento nas depressões do solo, representando um valor médio tabelado em função de características gerais da bacia hidrográfica (Tucci, 1998).

Com referência ao processo de evapotranspiração, Tucci (1998) indicou que o modelo considera que parte da evapotranspiração potencial é atendida pela precipitação e pelos reservatórios de interceptação e depressões do solo, onde existe uma relação linear com o parâmetro K3, o qual é tabelado em função do tipo de cobertura da bacia hidrográfica. O escoamento superficial é estimado com base em uma equação que considera conceitos de onda cinemática e requer valores de: declividade do plano de escoamento, fator de rugosidade da equação de Manning, comprimento do plano de escoamento, armazenamento no tempo *t* e armazenamento máximo no plano, sendo que os dois últimos

parâmetros são dependentes do escoamento superficial calculado. A propagação no canal utiliza o método de Clark por meio do histograma tempo-área e o modelo de Reservatório Linear Simples. Por último, deve-se referenciar também, o intervalo de tempo considerado no modelo, o qual na sua versão original, funciona com intervalo de 15 minutos.

O modelo Stanford IV apresenta os diferentes componentes do ciclo hidrológico, além de um critério para considerar a variabilidade espacial da capacidade de infiltração, o que permite gerar escoamento superficial, mesmo que a capacidade média de infiltração seja superior à precipitação. Com intervalo de tempo de 15 minutos, o modelo exige a determinação da distribuição temporal da precipitação dentro do dia, o que é desfavorável para muitas bacias hidrográficas, onde não existem pluviógrafos ou quando esses estão inadequadamente distribuídos na mesma. A quantidade de parâmetros de entrada para o modelo e os detalhamentos empíricos dificultam o uso do modelo Stanford IV para profissionais que têm pouca experiência com modelos.

3.1.2.5. SCS

O Departamento de Conservação do Solo Norte-Americano (SCS) realizou inúmeros experimentos em bacias hidrográficas de pequeno porte, com o objetivo de estabelecer relações entre a precipitação, o escoamento superficial, o grau de vegetação presente na área e o tipo e a ocupação do solo na bacia hidrográfica (Righetto, 1998). O modelo é simples e expresso por uma equação que relaciona a altura precipitada à altura de lâmina escoada e a um índice de armazenamento de água na bacia hidrográfica. Com a determinação do volume escoado, o hidrograma resultante é especificado, considerando-o triangular, com os tempos ao pico e de base definidos a partir de características geométricas da bacia hidrográfica.

O modelo SCS é aplicado para simular hidrogramas de cheias de projeto de obras hidráulicas, bem como para o estabelecimento do risco de enchente para um determinado local, em bacias hidrográficas dotadas apenas de dados de precipitação. O referido modelo não foi desenvolvido com o compromisso de representar um evento específico, mas para ser utilizado a fim de estimar o hidrograma de projeto para uma determinada bacia hidrográfica (Tucci, 1998).

As perdas iniciais da precipitação são estimadas para condições médias de 20% da capacidade de armazenamento de água no solo, sendo que para determinar-se essa

capacidade, foi estabelecida uma escala para um parâmetro adimensional denominado Curva Número (CN). A tabela que apresenta os diversos valores do parâmetro CN reflete a cobertura vegetal, as condições médias de umidade antecedente, o tipo, a vegetação e a ocupação do solo na bacia hidrográfica em estudo. Por último, o volume gerado pela separação do escoamento é propagado até o rio por meio do hidrograma unitário triangular. É necessário esclarecer, sobretudo, que o modelo SCS foi desenvolvido para simular a bacia hidrográfica de forma concentrada e, inicialmente, proposto para uma pequena bacia hidrográfica rural.

3.1.2.6. IPH

No Brasil, diversos pesquisadores desenvolveram modelos hidrológicos aplicáveis a nossa realidade, ou seja, a carência de dados hidrológicos e de clima tropical.

Os modelos desenvolvidos no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para a transformação da precipitação em vazão em uma bacia hidrográfica, receberam uma numeração de acordo com cada versão, os quais são aplicáveis a diferentes situações. Desse modo, têm-se os modelos IPH II, IPH III, IPH IV e IPHMEN.

O modelo IPH II tem o objetivo de ser aplicado a estudos de planejamento urbano, enfocando os problemas decorrentes do efeito da urbanização na resposta da rede de drenagem. Esse modelo também objetiva servir de ferramenta para estudos gerais no planejamento de recursos hídricos de uma bacia hidrográfica (Júnior e Tucci, 1983).

O referido modelo é utilizado para bacias hidrográficas que não necessitem de propagação no leito do rio ou que esse efeito não seja importante no processo, pois a propagação, levada em conta no modelo, refere-se somente ao escoamento na superfície da bacia hidrográfica.

Júnior e Tucci (1983) descreveram o modelo IPH II, o qual é composto de vários algoritmos, que procuram simular os principais processos hidrológicos em etapas bem definidas. Esses algoritmos são:

- Perdas por evapotranspiração e interceptação;
- Separação dos escoamentos;

- Propagação do escoamento superficial; e
- Propagação subterrânea.

A bacia hidrográfica pode ser dividida em sub-bacias, onde em cada sub-bacia hidrográfica a precipitação é considerada de distribuição homogênea, onde em cada intervalo de tempo, é calculada a chuva efetiva, admitindo-se a evapotranspiração potencial, a interceptação e a infiltração.

Da precipitação que atinge a superfície, uma parcela é perdida por evapotranspiração e outra parte é retida pela interceptação. O total interceptado é representado por um reservatório denominado Rmax. A precipitação restante é a entrada para o algoritmo de separação do escoamento, o qual é fundamentado pelo algoritmo desenvolvido por Berthelot, ou seja, a equação de continuidade em combinação com a equação de Horton e uma função empírica para a percolação. Quando a precipitação não é suficiente para atender à evapotranspiração potencial, essa será parcialmente satisfeita pelo reservatório de perdas na interceptação (cobertura vegetal e depressões) e o restante da evapotranspiração potencial pode ser retirada do solo, de acordo com o seu estado de umidade. A retirada da água do solo é obtida por uma relação linear entre a percentagem da evapotranspiração potencial e a umidade do solo.

A parcela da precipitação resultante pode gerar escoamento superficial ou infiltrar-se no solo, sendo que a existência de áreas impermeáveis proporciona escoamento superficial sem a ocorrência de infiltração. No modelo, é utilizada uma grandeza denominada AINP que caracteriza o percentual de áreas impermeáveis da bacia hidrográfica. Essa, permite definir a área da bacia hidrográfica em que a chuva é transformada completamente em escoamento superficial, o qual é supostamente transferido para o curso d'água.

O volume de escoamento superficial, determinado no algoritmo, anteriormente descrito, é propagado ao longo da sub-bacia hidrográfica pelo método de Clark. Esse método utiliza a teoria do histograma tempo-área para representar o efeito da translação do escoamento e o modelo do Reservatório Linear Simples para o representar o efeito do amortecimento.

O volume percolado para o aqüífero é propagado para o curso d'água por meio do modelo Reservatório Linear Simples.

Tucci (1998) informou que se deve atentar que o modelo IPH II representa um macroprocesso, onde a área envolvida é de vários quilômetros quadrados e os erros envolvidos, tanto na distribuição espacial como na representação dos processos, podem mascarar o resultado final dos parâmetros envolvidos.

As versões IPH III e IPH IV foram descritas por Tucci (1998) e baseiam-se na discretização da bacia hidrográfica em sub-bacias e em trechos de canais. Essas versões utilizam a estrutura do modelo IPH II para simular cada sub-bacia hidrográfica e para trechos de rio, com as seguintes opções:

- Versão IPH III adota o modelo da onda cinemática ou Muskingun-Cunge para o canal e o modelo de Pulz para o reservatório;
- Versão IPH IV utiliza o modelo hidrodinâmico para simular o escoamento nos trechos de rios e reservatórios.

Em virtude da sua estrutura, o modelo IPH III permite a simulação de um sistema fluvial onde, no canal, não existam efeitos devido à maré ou a lagos, que possam provocar remansos ou efeitos de fluxo. Por outro lado, o modelo IPH IV adota um modelo hidrodinâmico, que discretiza as equações de Saint Vénant, utilizando um esquema implícito de diferenças finitas para simular o escoamento no rio e nos reservatórios. Assim, em comparação à versões anteriores, o IPH IV é um modelo que incorpora uma quantidade maior de processos hidrológicos existentes, porém, requer maior quantidade de variáveis e parâmetros de entrada.

A integração entre as estruturas dos modelos IPH III e IPH IV é realizada por meio da equação da continuidade (Tucci, 1998). As sub-bacias hidrográficas são definidas em função das suas características médias mais homogêneas, da distribuição da precipitação e da necessidade de resultados ou avaliações da sub-bacia ou trecho do rio. A contribuição lateral (vazão da sub-bacia hidrográfica) pode ser distribuída ao longo do canal principal do trecho considerado ou concentrada em qualquer ponto do mesmo.

Para simular o processo precipitação-vazão com intervalo de tempo mensal, foi desenvolvido o IPHMEN, proposto com o objetivo de obter resultados rápidos do comportamento chuva-vazão de uma bacia hidrográfica e a extensão da série, com base na precipitação (Tucci, 1998).

Na distribuição dos volumes, o modelo IPHMEN utiliza a equação da continuidade para estabelecer o balanço dos volumes da camada superior do solo, ou seja, o armazenamento na camada superior do mesmo, levando-se em conta a infiltração, a percolação e a evaporação.

Tucci (1998) afirmou que o intervalo mensal distorce a definição dos parâmetros da equação de infiltração, já que esse processo ocorre em minutos ou, no máximo, em horas. No modelo IPHMEN os parâmetros dificilmente guardam relação específica com os experimentos de Horton, mas permitem estabelecer um balanço dos macroprocessos no tempo.

3.1.2.7. SMAP

O modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) foi desenvolvido por Lopes et al. (1982).

O modelo foi originalmente desenvolvido para um intervalo de tempo diário e, posteriormente, apresentado em versão mensal.

Na versão mensal, o modelo possui dois reservatórios matemáticos, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada mês sob a forma de reservatório do solo (zona aerada) e reservatório subterrâneo (zona saturada). Para o cálculo da zona aerada, os elementos envolvidos são: a precipitação, o escoamento superficial, a evapotranspiração real e a recarga subterrânea. Já para a zona saturada, os elementos são: a recarga subterrânea e o escoamento básico.

Para as condições iniciais, ou seja, no início da simulação no modelo, são adotados que o reservatório do solo possui um teor determinado de umidade inicial (adimensional) e que o reservatório subterrâneo tem uma vazão básica inicial multiplicada por uma constante de recessão e dividida pela área de drenagem da bacia hidrográfica.

O modelo SMAP é composto de quatro funções de transferência:

 O escoamento superficial é equivalente à precipitação multiplicada por um fator, o qual é resultante da combinação do reservatório do solo, da capacidade de saturação do solo e de um parâmetro adimensional de escoamento superficial;

- A evapotranspiração real e estimada a partir da evaporação potencial, do reservatório do solo e da capacidade de saturação do solo;
- A recarga subterrânea é calculada a partir do reservatório do solo, de um coeficiente de recarga e da capacidade de saturação do solo;
- O escoamento básico é estimado com base no reservatório subterrâneo e em uma constante de recessão.

No caso de um eventual transbordamento do reservatório do solo, tal valor é transformado em escoamento superficial.

O modelo contém ainda, uma rotina de atualização prévia do teor de umidade, que a cada intervalo de tempo acrescenta uma parcela da precipitação do mês, de forma a utilizar o teor de umidade médio do mês em questão. Essa rotina melhora sensivelmente os resultados, principalmente, em regiões de grande variabilidade no regime pluviométrico.

A vazão total é calculada por meio da soma dos escoamentos superficial e básico e multiplicada pela área de drenagem da bacia hidrográfica considerada.

Os dados básicos do modelo SMAP são a série mensal de precipitação, a média mensal de evaporação potencial do tanque classe A e as vazões médias mensais para o um período mínimo necessário para a calibração desejada.

O SMAP é considerado um modelo concentrado, pois não admite a discretização espacial dos parâmetros e variáveis, como por exemplo, tem-se que a série da precipitação de entrada é a média que ocorre em toda a bacia hidrográfica considerada.

De forma geral, o modelo SMAP utiliza a separação do escoamento baseada nos parâmetros do Método "CN" do *Soil Conservation Service* (SCS), simulando séries contínuas e não apenas a cheia de projeto (Tucci, 1998).

3.1.2.8. MODHAC97

Um modelo matemático bastante utilizado no semi-árido do Nordeste do Brasil e no clima temperado do Sul do País, é o MODHAC (Modelo Hidrológico Auto-Calibrável), o qual Lanna (1999) apresentou a sua estrutura básica na versão 97.

O modelo MODHAC97 calcula o armazenamento e a abstração da água na bacia hidrográfica, a partir de séries das variáveis de precipitação e evapotranspiração potencial. Porém, não considera de forma explícita a variabilidade espacial das características fisiográficas, que condicionam o processo hidrológico, e ainda, pode ter seus parâmetros calibrados, automaticamente.

A concepção geral do modelo estabelece que o armazenamento da água na bacia hidrográfica é simulado por meio de três reservatórios fictícios. O primeiro, representa a água armazenada superficialmente; o segundo, a água armazenada subsuperficialmente, no denominado horizonte vegetal do solo; e, o último, a água armazenada nas camadas inferiores do solo, incluindo o aqüífero subterrâneo. Esses reservatórios são denominados reservatório superficial, subsuperficial e subterrâneo, respectivamente.

O MODHAC97 apresenta 15 parâmetros, sendo que a metodologia de calibração raramente os utiliza simultaneamente, onde os que mais afetam o ajuste do mesmo são:

- RSPX Capacidade máxima do reservatório superficial [L];
- RSSX Capacidade máxima do reservatório subsuperficial [L];
- RSBX Capacidade máxima do reservatório subterrâneo [L];
- IMIN Infiltração mínima [L];
- IDEC Coeficiente de infiltração;
- ASBX Expoente de esvaziamento do reservatório subterrâneo; e
- CHOM Representa a fração da evapotranspiração potencial que é suprida diretamente pela chuva.

A abstração de água na bacia hidrográfica ocorre pela evaporação direta da precipitação, pela evaporação ou evapotranspiração dos reservatórios superficial e subsuperficial, pelo escoamento superficial e pela infiltração profunda. Essa última variável representa a água que sai da bacia hidrográfica e dirige-se a outras de maior ordem ou a aqüíferos subterrâneos profundos. O escoamento da bacia hidrográfica, observado no seu exutório, é formado pelos escoamentos superficial e subterrâneo. O escoamento superficial é formado pelo escoamento direto acrescido do hipodérmico. O escoamento direto é composto pela água pluvial que não é evaporada, ou interceptada pelo reservatório superficial, ou ainda, infiltração", causada pela saturação do reservatório subsuperficial. O escoamento subterrâneo é resultado das percolações dos reservatórios, subsuperficial e subterrâneo. Admite-se, ainda, um tempo de trânsito constante para cada tipo de escoamento,

representando o atraso entre o intervalo de tempo de sua formação e o intervalo em que é observado no exutório da bacia hidrográfica.

De forma geral, o MODHAC97 apresenta uma notável diversidade de aplicações possíveis, em virtude, principalmente, da possibilidade da calibração automática de seus parâmetros e da experiência de aplicações em várias bacias hidrográficas, com ênfase no Nordeste e Sul do país (Rio Pajeú/CE, Rio Grande/BA, Rio dos Sinos/RS, Rio Caí/RS etc.). Entretanto, uma simplificação importante adotada pelo modelo é que o processo de simulação desconsidera a variabilidade espacial dos parâmetros na bacia hidrográfica.

3.1.2.9. AÇUMOD

O AÇUMOD é um modelo distribuído, desenvolvido pela Universidade Federal da Paraíba, sendo uma adaptação do modelo SIMMQE, elaborado pelo antigo DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) e atual ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e é aplicado em bacias hidrográficas de regiões semi-áridas e de baixa densidade de informações.

Paiva *et al.* (1999) apresentaram a estrutura básica do modelo, que efetua o balanço hídrico dos açudes implantados na rede drenagem da bacia hidrográfica, considerando as respectivas regras de operação dos mesmos. O AÇUMOD guarda a mesma estrutura que o modelo SIMMQE, tendo simplificado e adaptado ao microcomputador os seus comandos de leituras, entradas de dados e saídas. Além disso, algumas modificações foram introduzidas para torná-lo mais adaptado às regiões semi-áridas.

O espaço geográfico da bacia hidrográfica é discretizado em uma malha retangular formada por quadrículas. Em cada quadrícula, o ciclo hidrológico é representado por um modelo conceitual. Para cada quadrícula, são indicados parâmetros descritivos do ciclo hidrológico, assim como, atributos para representar o sentido da drenagem e a possível existência de elementos da arquitetura hidráulica da bacia hidrográfica.

Observando as cartas de solo, da vegetação (ou ocupação do solo), da geologia e eventualmente, da topografia, desenha-se na bacia hidrográfica zonas hidrológicas homogêneas. Tais zonas hidrológicas homogêneas são polígonos para os quais, a uma mesma chuva e mesma umidade inicial do solo, corresponde uma idêntica resposta hidrológica, ou seja, apresentam mesma função de produção de água. Superpondo com um

SIG (Sistema de Informações Geográficas) o mapa das zonas hidrológicas homogêneas e o mapa da bacia hidrográfica discretizada, atribui-se a cada quadrícula a percentagem de área de cada zona hidrológica homogênea nela contida.

A cada quadrícula pode ser atribuído, no máximo, um elemento da estrutura hidráulica, que correspondem: aos barramentos (açudes); às captações de água no rio; ao local de recepção eventual de transposição de vazões de outras bacias hidrográficas; aos postos fluviométricos e a outros pontos, onde se requer informações do modelo, como locais de futuros barramentos ou exutórios de sub-bacias hidrográficas.

Os açudes são classificados como sendo de ordem 1 ou 2. Aqueles classificados como de ordem 1 são os açudes pequenos, nos quais há retirada de água significativa e que não têm outro barramento a montante. Os açudes de ordem 2 são, os que não entram na primeira categoria. Para efetuar o balanço hídrico no açude, a cada passo de tempo do modelo é necessário entrar com a curva cota-área-volume do barramento, assim como as cotas do vertedouro e do porão. Além disso, pode existir o caso onde o açude foi construído ou modificado durante o período da simulação, devendo-se informar a data da construção ou das eventuais mudanças, assim como as novas curvas cota-área-volume correspondentes.

As zonas pluviométricas, sobre a bacia hidrográfica, são definidas por meio do polígono de Thiessen. Por conseguinte, em cada quadrícula é associado o posto pluviométrico mais próximo.

As variáveis de entrada do modelo são os valores de precipitação diária em cada posto pluviométrico, utilizado para a definição das zonas pluviométricas e os valores de evapotranspiração potencial nesses mesmos pontos.

Por meio de uma representação conceitual, o modelo simula o ciclo hidrológico em cada zona hidrológica homogênea dentro de cada zona pluviométrica. Os escoamentos de cada quadrícula são, então, encaminhados para todos os açudes, sucessivamente, até o exutório da bacia hidrográfica pelo método das Isócronas (Histograma Tempo-Área).

Para cada zona hidrológica homogênea, os parâmetros do modelo são:

- Crs = coeficiente máximo do escoamento superficial direto;
- Crt = nível correspondente à capacidade média de água no solo [L];
- Dcrt = capacidade de armazenamento de água no solo [L], abaixo da qual não há escoamento;
- QRMax e QIMax = níveis superiores dos reservatórios intermediários de escoamento superficial e de infiltração, respectivamente [L];
- CQR e CQI = coeficientes de descarga dos reservatórios intermediários citados anteriormente; e
- FN = parâmetro de infiltração.

Em cada açude da bacia hidrográfica, é efetuado um balanço hídrico, considerando os volumes de entrada na quadrícula onde se encontra o barramento, os volumes precipitados sobre a sua superfície, as contribuições sobre a área da bacia hidráulica descoberta, as perdas hídricas por evaporação, os volumes retirados nos açudes para abastecimento humano, os volumes restituídos na rede hidrográfica à jusante do açude (volumes ecológicos ou de operação dos reservatórios) e os volumes, eventualmente, vertidos pelo vertedor. O balanço hídrico de todos os açudes é efetuado a cada dia, no sentido de montante para jusante. Foi introduzido no modelo a possibilidade de armazenamento de volumes de água importantes em planícies de inundação ou em depressões para os quais uma perda por evaporação é considerada. Acrescentou-se também a possibilidade de uma perda constante ao longo da rede de drenagem, a fim de tomar conta de abstrações eventuais pelos depósitos aluvionares no leito dos rios.

Para exemplificar a robustez do AÇUMOD a uma região semi-árida, os principais resultados da aplicação do AÇUMOD na bacia hidrográfica do rio Taperoá são apresentados, a seguir.

A bacia hidrográfica do rio Taperoá situa-se na parte central do Estado da Paraíba, especificamente na região do Cariri. O curso d'água principal (rio Taperoá) possui regime intermitente, é afluente do rio Paraíba e drena uma área de 5.667,49 km². Essa bacia hidrográfica foi discretizada em 445 quadrículas, nas quais foram incluídos 28 elementos da estrutura hidráulica (15 açudes de ordem 2, 2 açudes em projeto, 10 exutórios de sub-bacias e 1 posto fluviométrico).

Os parâmetros do modelo foram ajustados com dados mensais do posto fluviométrico e dos níveis dos açudes, por meio do método manual de tentativas e erros.

Os resultados encontrados indicaram que, pelo fato do modelo incorporar dentro do algoritmo de geração de vazão o balanço hídrico dos açudes que estão situados a montante

do ponto de cálculo, o AÇUMOD foi capaz de traduzir a situação real em termo de escoamento, considerando todas as operações feitas nos reservatórios. Além disso, o modelo permitiu que as observações de vazões em postos fluviométricos, influenciados pela presença de açudes a montante, pudessem ser utilizadas nos processos de ajuste, assim como, os dados dos níveis dos barramentos.

O AÇUMOD encontra-se em fase de aperfeiçoamento e apesar de sua elevada relevância de aplicações em regiões semi-áridas, algumas fragilidades encontradas na versão atual são destacadas, a saber:

- a incorporação do método de Thiessen para a definição das zonas pluviométricas, o qual não incorpora as características do relevo no respectivo cálculo;
- ainda não houve a discussão da dimensão ideal para a definição das quadrículas, onde foi abordado somente que a discretização deve ser mais detalhada quando da presença dos elementos de estrutura hidráulica; e
- os dados de entrada de precipitação caracterizam-se apenas como totais diários.

3.1.2.10. TOPMODEL

Dentre os vários modelos hidrológicos físicos-distribuídos, baseados na topografia da bacia hidrográfica, destaca-se o modelo TOPMODEL pela reduzida quantidade de parâmetros e fundamentação física.

O modelo TOPMODEL (*Topography Based Hydrological Model*) utiliza relações físicas para retratar o comportamento da bacia hidrográfica e os processos hidrológicos (Tucci, 1998). Os dados de entrada para o modelo são a precipitação e a evapotranspiração potencial.

A versão 94.01 do TOPMODEL, descrita por Beven *et al.* (1994), apresenta duas hipóteses básicas, que o suportam conceitualmente, isto é:

- a dinâmica da zona saturada pode ser aproximada por sucessivas representações de estados uniformes;
- o gradiente hidráulico da zona saturada pode ser aproximado pela declividade da topografia local, expresso por tanβ (β é o ângulo formado entre o plano da superfície do solo e o plano horizontal).

Essas hipóteses resultam em equações simples relacionando, nos distintos pontos da bacia hidrográfica, o armazenamento de água e o nível do lençol freático, nas quais o principal fator é o índice topográfico $\ln(a/\tan\beta)$, onde *a* representa a área de drenagem por unidade de comprimento da curva de nível cortada pelo escoamento.

O modelo ainda possui uma terceira hipótese, a qual é definida por uma relação:

 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 freático, segundo a seguinte equação:

$$Ti = T_0 \cdot e^{-Si/m}$$
(3.1)

Onde:

Ti = transmissividade lateral no local i na profundidade z_i (L²/T);

 T_0 = transmissividade lateral para o solo saturado (L²/T);

S_i = déficit de armazenamento local (L);

m = parâmetro do modelo (L).

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

A capacidade de interceptação é representada por um reservatório de capacidade máxima potencial Srmáx, resultando em uma precipitação efetiva equivalente à diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial. O valor que excede a capacidade de armazenamento Srmáx vai atingir o solo e é aquele fornecido aos módulos de cálculos subseqüentes.

Partindo-se da segunda hipótese de que o gradiente hidráulico efetivo e o fluxo na zona saturada são paralelos para a declividade do terreno $(tan\beta)$, o fluxo que ocorre na zona saturada por unidade de comprimento do contorno em cada ponto i é expresso por:

Onde:

 $qi = fluxo por unidade de comprimento do contorno (L²/T); \\ Ti = transmissividade no ponto i na profundidade zi (L²/T); \\ \betai = declividade do terreno$

A conceitualização 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. A introdução dos pontos de murcha e capacidade de campo na estruturação do TOPMODEL surgiu da observação de que nas primeiras versões do modelo, a água infiltrada era imediatamente transferida à zona saturada, gerando estimativas exageradas da vazão. Atribuiu-se a tal fato uma subestimativa do valor das perdas resultantes da evapotranspiração.

Na verdade, o modelo necessitava de um retardamento no fluxo vertical da zona não saturada até a zona saturada. Foi introduzido, assim, o conceito de capacidade de campo, significando o valor de umidade que deve ser atingido antes que ocorra fluxo para a zona saturada. Dessa forma, tem-se uma maior retenção da água infiltrada, antes que ela possa entrar na zona saturada, permanecendo disponível ao processo de evapotranspiração. Em assim sendo, tem-se também uma redução dos valores estimados de vazão, especialmente, quando ocorrem precipitações intensas após períodos de estiagem.

A evapotranspiração real é calculada no modelo como uma função da evapotranspiração potencial e da quantidade de água armazenada na zona de raízes.

A versão 94.01 do modelo TOPMODEL é melhor adaptada para bacias hidrográficas de solos rasos, de topografia moderada e que não sejam, excessivamente, caracterizadas por longos períodos de estiagem.

3.1.2.11. DR3M

O modelo DR3M (*Distributed Routing Rainfall – Runoff Model*), em sua versão 2, foi desenvolvido pelo USGS (*United States Geological Survey*), em 1990, e apresentado por Alley e Smith (1990). Os comentários sobre o modelo DR3M, a seguir apresentados, foram

extraídos do trabalho dos respectivos autores, sendo que foi enfatizada a forma de discretização da bacia hidrográfica utilizada pelo mesmo.

A bacia de drenagem é representada por uma série de planos de escoamento, canais e segmentos de reservatórios, com nós que discretizam as características de drenagem da bacia hidrográfica. A teoria da onda cinemática é utilizada para a propagação do escoamento nos planos de drenagem e nos canais.

O modelo fornece uma simulação da máxima vazão de escoamento superficial com duração diária a partir de dados diários de precipitação e evaporação.

O DR3M possui um algoritmo de precipitação excedente, onde os componentes que geram escoamento superficial, incluem a estimativa da umidade do solo e os excedentes da precipitação em áreas permeáveis e impermeáveis.

O componente de estimativa da umidade no solo determina o efeito das condições antecedentes de infiltração. A umidade do solo é modelada como um sistema dual de reservação, sendo que um, representa o armazenamento da umidade antecedente e o outro, reproduz o armazenamento na camada superior do solo, a partir da infiltração. O armazenamento de água na camada superior do solo é baseado na equação de infiltração de Green e Ampt.

A evapotranspiração potencial é suprida pelos reservatórios no solo e obtida pela evaporação multiplicada por um coeficiente do modelo.

No cálculo do excedente da precipitação, em áreas permeáveis, atribuiu-se um parâmetro denominado potencial local de infiltração, fundamentado numa variação da equação de Green e Ampt, designando a infiltração em depressões no solo. Esse parâmetro é dependente da condutividade hidráulica, da carga de sucção média e da umidade do solo, antes e após a saturação.

O excedente da precipitação em áreas impermeáveis é obtido por meio de duas metodologias. A primeira, denomina superfícies de impermeabilização efetiva para as áreas impermeáveis que se interligam diretamente com o sistema de drenagem. As tubulações de drenagem, as vias de acesso e as áreas de estacionamentos pavimentados, são exemplos de superfícies de impermeabilização efetiva. A segunda, classifica como superfícies

impermeáveis não-efetivas as áreas impermeáveis que drenam para áreas permeáveis. Um exemplo de área impermeável não-efetiva é a calha de drenagem de um telhado de residência que segue para um gramado.

A única abstração da precipitação na área impermeável efetiva é a retenção. Um terço da precipitação, incidente na área impermeável efetiva, é armazenada como retenção impermeável até que a capacidade do respectivo reservatório seja totalmente atendido. Já a precipitação incidente, nas áreas impermeáveis não-efetivas, é admitida escoando totalmente para a área permeável adjacente. O modelo assume que esse fato ocorre, instantaneamente, e que o volume do escoamento superficial é uniformemente distribuído sobre a área permeável.

O DR3M aproxima a topografia e a geometria da bacia hidrográfica por meio de uma série de segmentos, os quais possuem nós que descrevem a superfície de drenagem. Os segmentos existentes no modelo são:

- segmentos de fluxo superficial recebem, uniformemente, a distribuição lateral do fluxo advindo do excesso da precipitação. Eles representam um plano retangular de um comprimento definido, com declividade média, coeficiente de rugosidade da superfície e percentual de impermeabilização;
- segmentos de canal são utilizados para representar canais naturais ou construídos pelo homem, ou seja, um canal a céu aberto e as tubulações de esgotos pluviais. Segmentos de canal podem receber contribuições dos outros tipos de segmentos, como os, de reservatórios, os nodais e até mesmo de outros segmentos de canal;
- segmentos de reservatório podem ser empregados para descrever uma detenção hidráulica de um reservatório, baseando-se na equação da continuidade e no método do Reservatório Linear Simples. Alternativamente, podem ser usados para simular o efeito de armazenamento na entrada de canais de drenagem, que possuem fluxos, preferencialmente, em uma única direção e de efeito de remanso desprezível;
- segmentos nodais são utilizados quando mais de três segmentos contribuem para o final de um canal ou segmento de reservatório ou para representarem pontos em que o usuário necessite indicar descargas específicas.

De forma geral, os elementos utilizados pelo modelo DR3M incluem a área total de drenagem da bacia hidrográfica, a estimativa da umidade do solo, a determinação dos parâmetros da infiltração (fundamentado no modelo de Green e Ampt) e a definição dos

tipos de segmentos. Dessa maneira, o DR3M pode ser classificado como subdividido por sub-bacias hidrográficas, pois o usuário tem a flexibilidade de dividir a bacia hidrográfica em segmentos computacionais de escoamento.

O modelo DR3M pode ser útil para uma grande variedade de aplicações, onde os segmentos computacionais podem representar uma simples ou complexa rede de drenagem. Ele é indicado para ser aplicado em bacias de drenagem, com poucos hectares até vários quilômetros quadrados. Entretanto, não é recomendável a sua utilização em bacias de drenagem acima de 26 Km². O modelo não possui um componente do fluxo subsuperficial, portanto deve ser aplicado, preferencialmente, em áreas urbanas e pode ser calibrado para simular eventos isolados ou séries contínuas de precipitação.

3.1.2.12. HEC-HMS

O modelo HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*) versão 2.0 foi desenvolvido pelo *United States Army Corps of Engineers* e é o sucessor do programa HEC-1, cuja bacia hidrográfica é discretizada em sub-bacias.

Os comentários expostos, a seguir, foram compilados a partir de USACE (2000a) e USACE (2000b).

O HEC-HMS versão 2.0 utiliza modelos separados para cada componente do processo de transformação da chuva em vazão na bacia hidrográfica, abrangendo a maioria das etapas do ciclo hidrológico previstas nesse processo. Ele foi elaborado para ser aplicado em uma grande variedade de áreas geográficas. A interface gráfica existente permite uma integração "amigável" com o usuário, estando presente nas diferentes partes do programa e, principalmente, nas etapas de representação esquemática da bacia hidrográfica, na entrada de dados e na visualização dos resultados.

A figura 3.4 indica uma representação típica do processo de transformação da chuva em vazão no HEC-HMS. É importante destacar que o HEC-HMS não possui um modelo detalhado para o fluxo no aqüífero subterrâneo, mas somente a representação de uma descarga como escoamento de base.





Figura 3.1 - Representação Típica do Escoamento Superficial da Bacia Hidrográfica no **HEC-HMS**

Os modelos que representam cada componente da formação do escoamento superficial no HEC-HMS são:

- Modelos que computam o volume que gera escoamento direto; •
- Modelos de escoamento direto (superficial e subsuperficial);
- Modelos de escoamento subterrâneo; e •
- Modelos de escoamento em rios e reservatórios. •

Os modelos de cada componente da formação do escoamento direto no HEC-HMS são descritos, a seguir, além disso, são abordados: caracterização do funcionamento; tipos de informações necessárias; elementos de entrada e algumas considerações sobre a utilização dos modelos.

 a) Modelos que computam o volume que gera escoamento direto – aqueles que calculam o volume de água da precipitação excedente.

Ö Taxa constante de perdas

É um modelo do tipo discreto, concentrado e empírico, onde a variável de entrada é a precipitação média sobre a bacia hidrográfica.

A condição inicial do modelo é a perda inicial *la*, representando as perdas por interceptação, acumulação em depressões no terreno e infiltração (modelo SCS/CN).

O parâmetro *"fc"* (taxa constante de perda), que é o fator potencial máximo de perda de volume de precipitação durante um evento, pode ser visualizado como a capacidade final de infiltração dos solos.

Algumas vantagens desse modelo são: já foi utilizado com sucesso em estudos nos E.U.A.; é de fácil configuração, utilização e é econômico, pois inclui poucos parâmetros necessários para explicar a variação do volume de escoamento superficial.

As desvantagens do modelo podem ser citadas como de difícil aplicação em áreas sem estações hidrométricas, em virtude da ausência de uma relação física direta entre os parâmetros e as características da bacia hidrográfica e pode ser muito simples para prever as perdas em um evento de uma bacia hidrográfica heterogênea, embora realize bem a previsão das perdas totais.

Ö Curva Número (CN) do SCS

É um modelo do tipo discreto, concentrado e empírico, onde estima a precipitação efetiva como uma função da precipitação acumulada, cobertura do solo, uso do solo e umidade antecedente.

A variável de entrada é a precipitação acumulada na bacia hidrográfica no tempo *t*. A condição inicial é a perda inicial *la*, representando as perdas por interceptação, acumulação de água em depressões no terreno e infiltração, correspondendo a 20% do parâmetro "*S*".

Tais formulações são expressas pela seguinte equação:

$$Pe = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{(P + 0.8 \times S)}$$
(3.3)

28

Onde:

Pe = Precipitação efetiva no tempo t;

P = Precipitação acumulada no tempo t;

S = Potencial Máximo de Retenção.

O parâmetro "S" (potencial máximo de retenção) é estimado pelo valor do CN indicado por tabelas elaboradas pelo SCS, no qual o índice do CN de uma bacia hidrográfica é dado em função do uso, tipo e cobertura do solo e umidade antecedente.

Assim, tem-se a seguinte expressão:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$
 (3.4)

Algumas vantagens na utilização desse modelo: é um método simples, previsível e estável; conta apenas com um parâmetro que varia em função do grupo do solo, tratamento e uso do solo, condições da superfície e condição da umidade antecedente; as características são bem compreendidas e representam, razoavelmente bem, as entradas de modificações ambientais na bacia hidrográfica e é um método bem estabelecido e amplamente aceito para ser utilizado nos E.U.A. e em outros países.

As principais desvantagens do modelo da curva número do SCS podem ser descritas como: a abstração inicial (0,2xS), definida a priori, não depende das características e da distribuição temporal da precipitação e foi desenvolvido somente com dados de bacias hidrográficas rurais no Centro-Oeste dos E.U.A. (USACE, 2000a).

Ö Curva Número (CN) do SCS em módulos

É um modelo do tipo discreto, distribuído e empírico.

A estrutura desse modelo é semelhante ao anteriormente descrito, contudo, a variável e os parâmetros são definidos para cada módulo, o qual exige especificação de localização, distância de viagem até a seção de saída da bacia hidrográfica, tamanho e número de CN.

O HEC-HMS calcula a precipitação efetiva para cada módulo, independentemente, e propaga até a seção de saída da bacia hidrográfica pelo modelo de Clark. As vantagens e desvantagens desse modelo são análogas ao, anteriormente, descrito.

Ö Green e Ampt

É um modelo do tipo discreto, distribuído e com modelagem de teoria aproximada (Rawls *et al.* ,1993), onde a variável de entrada é a precipitação média sobre a bacia hidrográfica.

O modelo de Green e Ampt no HEC-HMS recebeu a implementação de uma perda inicial (*Ia*), sendo a condição inicial representada pela acumulação em depressões do terreno, cuja a sua determinação é análoga ao SCS/CN.

Os parâmetros são: i) a condutividade hidráulica, a qual é função da textura do solo e pode ser obtida por tabelas; ii) a tensão de sucção na frente úmida, uma função da distribuição do tamanho dos poros e correlacionada com a textura do solo, onde a sua estimativa encontra-se tabelada; e iii) o déficit de umidade, que é a porosidade do solo subtraída da quantidade de água inicial e também está correlacionada com a textura do solo.

O fato de os parâmetros do modelo poderem ser estimados para bacias hidrográficas sem estações hidrológicas, a partir de informações relativas ao solo, representa uma das maiores vantagens da sua utilização.

Como o modelo de Green e Ampt não é largamente utilizado, não há muitas experiências no meio profissional, sendo, assim, um aspecto negativo (USACE, 2000a).

Ö Taxa de déficit constante

É um modelo do tipo contínuo, concentrado e empírico.

Esse, é caracterizado como sendo quase contínuo de perdas da precipitação, semelhante ao modelo da taxa constante de perdas, porém, a perda inicial *la* pode recuperar-se após um período prolongado sem precipitações.

A variável de entrada é a precipitação média sobre a bacia hidrográfica.

Os parâmetros são: i) a taxa constante de perda "fc", que é o fator potencial máximo de perda de volume de precipitação durante um evento e ii) a taxa de recuperação da perda inicial.

As vantagens e desvantagens da utilização desse modelo são análogas ao modelo da taxa inicial constante. **Ö** Modelo de computação da umidade relativa do solo (*SMA- Continuos Soil-Moisture Accounting*)

É um modelo do tipo contínuo, concentrado e empírico, onde simula o movimento da água através da vegetação, da superfície do solo, do perfil do solo e em camadas subterrâneas.

As variáveis de entrada são: i) a precipitação média sobre a bacia hidrográfica e ii) o potencial de evapotranspiração.

Ö Modelo SMA modular

É um modelo do tipo contínuo, distribuído e empírico.

O modelo SMA modular é semelhante ao anteriormente descrito, contudo, a caracterização é realizada em cada módulo, que deve estar definido quanto à localização, distância de viagem até a seção de saída da bacia hidrográfica e tamanho.

Os modelos das taxas constante de perdas e de déficit constante são de difícil aplicação em áreas sem estações hidrométricas e são muito simples para representar um evento em uma bacia hidrográfica heterogênea. O modelo de Green e Ampt demanda a determinação de parâmetros, os quais não são totalmente mensuráveis em qualquer bacia hidrográfica. Por sua vez, o modelo da curva número do SCS é simples, previsível, estável, possui um parâmetro que varia em função do grupo de solo, tratamento e uso do solo, condições da superfície e de umidade antecedente e, principalmente, é um método estabelecido e amplamente aceito.

Assim, adotou-se o modelo da curva número do SCS para computar o volume que gera escoamento direto na bacia hidrográfica Corumbá, objeto de estudo.

b) Modelos de escoamento direto (superficial e subsuperficial): descrevem como a água, que não evaporou, infiltrou ou armazenou nas depressões da bacia hidrográfica, move-se superficial ou subsuperficialmente na bacia hidrográfica. Os modelos que simulam o processo de escoamento direto na bacia hidrográfica, a partir do excesso precipitado, esbarram em limitações, como a grande variabilidade do relevo, a disponibilidade de informações e os aspectos numéricos de solução das equações (Tucci, 1997).

Ö Hidrograma Unitário especificado pelo usuário

É um modelo do tipo discreto, concentrado e empírico.

Dessa forma, todas as ordenadas do Hidrograma Unitário (HU) podem ser inseridas e especificadas diretamente no HEC-HMS, as quais devem estar disponíveis.

Ö Hidrograma Unitário de Snyder

É um modelo do tipo discreto, concentrado e empírico.

Ele permite a obtenção dos parâmetros do Hidrograma Unitário a partir das características da bacia hidrográfica.

Os parâmetros são o tempo de pico "*tp*", que é a diferença do tempo entre o centro de gravidade da chuva e o pico do Hidrograma Unitário, e o coeficiente de pico *"Cp*", sendo que ambos podem ser ajustados.

Ö Hidrograma Unitário do SCS

O Hidrograma Unitário do SCS é um modelo do tipo discreto, concentrado e empírico.

Esse HU é proposto pelo SCS e baseia-se em médias de HU derivados de dados observados de vazão e chuva em bacias hidrográficas rurais dos E.U.A.

O parâmetro é o tempo de pico '*tp*", que pode ser estimado com dados observados das estações fluviométricas ou correlacionado com o tempo de concentração da bacia hidrográfica. Nesse caso, o coeficiente de pico "*Cp*" é fixado em 0,75.

Ö Hidrograma Unitário de Clark

É um modelo do tipo discreto, concentrado e empírico.

Esse modelo deriva o Hidrograma Unitário de uma bacia hidrográfica, representando dois processos críticos na composição do volume do escoamento, isto é, a translação e a atenuação. O processo de translação está associado à propagação do volume de água precipitada, descontada as perdas da sua origem, pela bacia hidrográfica até a sua saída. A atenuação refere à redução da magnitude da vazão, como uma parcela da chuva excedente que fica, temporariamente, retida na bacia hidrográfica e que chegará à seção de controle com certo atraso.

Os parâmetros são: as propriedades do histograma de tempo-área (calculado no HEC-HMS entrando-se com o tempo de concentração da bacia hidrográfica – "*tc*")

e o coeficiente de armazenamento "R", estimado por calibração, caso dados de precipitação e vazão estejam disponíveis.

Ö Modelo de Clark Modificado (ModClark)

É um modelo do tipo discreto, distribuído e empírico.

Semelhante ao Hidrograma Unitário de Clark, o cálculo do escoamento superficial na bacia hidrográfica é realizado incorporando os efeitos de translação e atenuação. A modificação inserida nesse modelo é a discretização espacial da bacia hidrográfica.

Nesse sentido, a bacia hidrográfica é discretizada em módulos e, para cada um deles, é definido o tempo e a distância de viagem até a seção de saída, a área e a precipitação média.

Os elementos de entrada são: i) o tempo de concentração e ii) a distância de viagem do módulo computacional mais distante da seção de saída da bacia hidrográfica.

Ö Modelo da Onda Cinemática

A Onda Cinemática é um modelo do tipo concentrado e conceitual.

Esse modelo representa a bacia hidrográfica como um canal aberto, bem largo e com volume de entrada no canal igual ao da precipitação efetiva. O modelo da Onda Cinemática reproduz, assim, o comportamento do fluxo d'água sobre a superfície da bacia hidrográfica em diversos planos, podendo também simular o fluxo em canais.

As superfícies e os canais da bacia hidrográfica são descritos por valores representativos de inclinação, comprimentos, formatos e áreas contribuintes. O documento USACE (1979, *apud* USACE, 2000a) apresenta um guia de uso e exemplos de aplicação do modelo da Onda Cinemática em bacias hidrográficas. Os coeficientes de rugosidade, que são estimados em função do uso e da cobertura do solo podem ser encontrados em Chow *et. al* (1988).

Nas aplicações e recomendações dos modelos de escoamento direto, USACE (2000a) indicou:

 Quanto a disponibilidade de informações para a calibração e estimativa de parâmetros: o uso dos modelos de Hidrograma Unitário paramétricos exigem a especificação dos seus parâmetros, mas a melhor opção é a sua calibração. Se os dados necessários para essa calibração, não estiverem disponíveis, o modelo da Onda Cinemática pode ser uma opção. Isso se deve ao fato de que o modelo da Onda Cinemática possui parâmetros e informações de entrada relacionados com propriedades mensuráveis ou observáveis na bacia hidrográfica;

- Propriedades inerentes ao modelo: cada modelo é baseado em algumas considerações básicas, que devem ser respeitadas para o seu uso adequado.
 Por exemplo, o modelo da Onda Cinemática não é aplicado universalmente, ele possui limitações, como a utilização em bacias hidrográficas pequenas da ordem de 2,5 Km²;
- Experiência e preferência do usuário: a escolha dos modelos deve ser direcionada pela combinação da experiência e preferência do profissional. Em assim sendo, deve-se ter cautela na utilização de um dado parâmetro somente porque é o padrão na prática.

Com relação ao presente estudo, a adoção de um hidrograma definido pelo usuário não é possível para ser aplicado em todas as sub-bacias hidrográficas, inseridas na bacia do Corumbá, pois existe uma carência de dados hidrológicos na mesma, possuindo apenas quatro estações fluviométricas. Da mesma forma, a definição do modelo de Clark exigiria a determinação do histograma tempo-área, que somente poderia ser obtido mediante a existência de informações de vazões nas bacias hidrográficas. O Hidrograma Unitário do SCS possui apenas o tempo ao pico como parâmetro de calibração, oferecendo reduzida flexibilidade de utilização.

O HU de Snyder é determinado a partir da definição do tempo de pico, do coeficiente de armazenamento e da vazão de pico. Nesse sentido, como esse modelo possui parâmetros calibráveis compatíveis com a disponibilidade de dados para a bacia hidrográfica em estudo, adotou-se esse modelo de escoamento direto.

O HU de Snyder padronizado (Chow *et.* al, 1988) é definido como aquele que representa a relação da equação 3.5. Nesse hidrograma, a relação entre a vazão de pico, a área, o coeficiente de armazenamento e o tempo de pico é dada pela equação 3.6. Para determinar os tempos de pico para outras durações de precipitação, o modelo utiliza a relação da equação 3.7.

$$tp = 5,5.tr$$
 (3.5)

34

$$\frac{Qp}{A} = 2,75 \frac{Cp}{tp} \tag{3.6}$$

$$t_{PR} = tp - \frac{tr - t_R}{4} \tag{3.7}$$

Onde:

tp = tempo de pico (horas); tr = duração da precipitação (horas); Qp = vazão de pico (m³/s); A = área de bacia hidrográfica (km²); Cp = coeficiente de armazenamento (adimensional); t_{PR} = tempo de pico do hidrograma requerido (horas); t_R = duração do hidrograma requerido (horas).

O valor do coeficiente *Cp* é melhor obtido por meio de calibração (USACE, 2000a), contudo, Bedient e Huber (1992, *apud* USACE, 2000a) verificaram que o *Cp* pode variar no intervalo de 0,4 a 0,8.

Como o foco nessa dissertação não é a análise pormenorizada da melhor maneira de obtenção do valor do coeficiente *Cp* e sim a sua determinação para o cálculo do Hidrograma Unitário, foi adotado o intervalo preconizado por Bedient e Huber (1992, *apud* USACE, 2000a), a fim de ser incorporado àfaixa de variação do mesmo no HEC-HMS.

Uma alternativa para estimar o valor do tempo de pico padrão (*tp*) pode ser obtida por meio da proposta do Distrito de Los Angeles (USACE, 1944 *apud* USACE, 2000a), apresentado pela equação 3.8, a saber:

$$tp = 0.75.Ct. \left[\frac{L.L_{CG}}{\sqrt{S'}} \right]^{0.33}$$
 (3.8)

Onde:

L = comprimento do rio principal (km), desde as nascentes até a seção de controle;

 L_{CG} = distância da seção principal ao ponto do rio mais próximo ao centro de gravidade da bacia hidrográfica (km);

S' = declividade média do rio principal ao longo do comprimento L;

Ct = coeficiente da bacia hidrográfica (adimensional).

O valor do coeficiente *Ct* é melhor obtido por calibração (USACE, 2000a), entretanto, Bedient e Huber (1992, *apud* USACE, 2000a) verificaram que o *Ct* varia geralmente no intervalo de 1,8 a 2,2.

De maneira análoga ao coeficiente *Cp*, não é objeto da presente dissertação discutir a melhor forma de obtenção do valor do coeficiente *Ct* e a sua influência na estimativa do tempo de pico padrão - *tp*, porém, a sua determinação para viabilizar o cálculo do *tp* e, assim, alcançar a solução numérica do HU de Snyder. Dessa forma, foi adotado um valor médio de *Ct* no intervalo determinado por Bedient e Huber (1992, *apud* USACE, 2000a), correspondendo a 2,0.

- c) Modelos de escoamento subterrâneo: simulam a drenagem subsuperficial da água do sistema para os canais (rios e reservatórios).
 - Ö Modelo Mensal

É um modelo do tipo concentrado e empírico.

É o mais simples modelo no HEC-HMS para escoamento subterrâneo, com variação mensal e estimado a partir de dados de vazão.

Ö Modelo de Recessão Exponencial

O modelo de Recessão Exponencial é do tipo concentrado e empírico. É um modelo que define a relação da vazão subterrânea em qualquer tempo a um valor inicial, onde a condição inicial é a vazão subterrânea no tempo zero.

Essa relação é expressa por:

$$Q_t = Q_0 \times K^t \tag{3.9}$$

Onde:

 Q_t = Vazão subterrânea no tempo *t* (m³/s); Q_0 = Vazão inicial (m³/s); K = Constante de decaimento exponencial.

Os parâmetros do modelo são: i) o coeficiente de decaimento, estimado com dados fluviométricos e ii) o ponto de inflexão – ponto no hidrograma onde existe uma contribuição maior do escoamento subterrâneo, após o pico do escoamento direto, sendo especificado como uma vazão ou uma razão da descarga de pico.

Nesse modelo de escoamento subterrâneo ocorre um decaimento exponencial da vazão com o tempo até um determinado valor limite, coincidindo com o pico do escoamento direto. A partir desse ponto, a vazão de base passa a ser computada como uma descarga ou como uma razão da descarga de pico calculada, ocorrendo novamente o decaimento exponencial.

Ö Modelo do Reservatório Linear

É um modelo do tipo concentrado e empírico.

Esse modelo é utilizado em conjunto com o SMA (Modelo Contínuo de Umidade do Solo) e simula o armazenamento e o movimento do escoamento subterrâneo como um armazenamento e movimento da água através de reservatórios.

O modelo Constante Mensal, juntamente com o método Contínuo de Umidade do Solo (SMA) são aplicáveis para eventos contínuos e superiores a um mês.

O modelo de Recessão Exponencial é o mais sofisticado dentre os disponíveis no HEC-HMS e é compatível com os demais modelos, anteriormente, adotados. Dessa forma, adotou-se tal modelo para caracterizar o escoamento subterrâneo na bacia hidrográfica em tela.

 d) Modelos de escoamento em rios e reservatórios: simulam o escoamento em rios (canal aberto unidirecional) e em reservatórios.

Ö Modelo da Onda Cinemática

É um modelo do tipo concentrado e conceitual.

O modelo da Onda Cinemática baseia-se na aproximação por diferenças finitas da equação da continuidade e na simplificação da equação de movimento.

Os parâmetros a serem especificados são: i) a forma da seção transversal; ii) as dimensões principais da seção; iii) o comprimento do trecho; iv) o coeficiente de

Manning; v) a inclinação da seção trapezoidal e vi) a curva da linha do perfil de energia.

Ö Modelo de Retardamento (*Lag*)

O modelo de Retardamento (Lag) é do tipo concentrado e empírico.

É o modelo mais simples no HEC-HMS para o escoamento em canais, onde o hidrograma de saída da bacia hidrográfica é igual ao de entrada, porém com as coordenadas defasadas por uma duração específica.

O parâmetro do tempo de retardamento pode ser estimado com dados de hidrogramas disponíveis.

Ö Modelo de Pulz

É um modelo do tipo concentrado e empírico.

Para a aplicação desse modelo é necessária uma relação entre o armazenamento e a vazão de saída, que pode ser determinada em programas do tipo HEC-RAS com dados observados ou por calibração.

Ö Modelo de Muskingun

energia.

O modelo de Muskingun é do tipo concentrado e empírico.

Os parâmetros do modelo são: i) o tempo de viagem da onda de cheia (K) e ii) o peso adimensional (X), calibrado com dados observados ou estimados (a partir de características do canal).

Ö Modelo de Muskingun - Cunge – Seção Padrão

É um modelo do tipo concentrado e quase-conceitual.

Os parâmetros são: i) a descrição da seção transversal e extensão do canal; ii) o coeficiente de rugosidade; e iii) a declividade da linha de energia, estimada a partir da declividade do fundo do canal.

Modelo de Muskingun-Cunge – Seção de Oito Pontos
 É um modelo do tipo concentrado e quase-conceitual.
 Ele utiliza oito pares de ordenadas para descrever a seção transversal do canal.
 Os parâmetros do modelo são: i) o coeficiente de rugosidade e ii) o grau de

Ö Modelo de Confluência

É um modelo do tipo contínuo e conceitual.

Na aplicação desse modelo, nenhum parâmetro é requerido, somente a configuração do sistema de fluxo, que pode ser especificada por meio da interface gráfica do usuário.

Entretanto, o modelo da Confluência não é válido se ocorrer condições de remanso no ponto da convergência.

Ö Modelo de Bifurcação

É um modelo do tipo contínuo e conceitual.

Para a utilização desse modelo é necessária a especificação da vazão do segundo canal como uma função da descarga de montante do ponto da bifurcação. Essa relação pode ser estimada com dados observados, modelos físicos de laboratório ou modelo matemático de hidráulica de canais.

A aplicação desse modelo está condicionada ao conhecimento da relação entre a vazão do canal principal e do secundário, que, normalmente, é difícil de obter-se.

Cada modelo de escoamento em rios e reservatórios no HEC-HMS resolve as equações de continuidade e quantidade de movimento, entretanto, cada um omite ou simplifica determinados termos das equações para alcançar a solução desejada. Dessa forma, a escolha do modelo deve considerar as hipóteses e as limitações intrínsecas a cada um, onde algumas características importantes nessa definição são:

- Efeitos de remanso: as flutuações de maré, a convergência significativa de tributários, os reservatórios, as pontes e a redução da seção transversal do canal podem causar efeitos de remanso. Os modelos da Onda Cinemática e Muskingum não incorporam tais efeitos, pois se apóiam na hipótese de escoamento unidimensional;
- Armazenamento na Área de Inundação: nas situações de elevada descarga nos cursos d'água, as suas calhas naturais podem não suportar a vazão e ocorrer um escoamento pelas áreas de inundação. Nesses cenários, é comum modelos que consideram escoamento unidimensional alcançarem a solução por meio de cálculos das propriedades hidráulicas do canal principal e das áreas de inundação, separadamente, e depois combiná-las para computar um

padrão único. Esse procedimento não é aplicável aos modelos da Onda Cinemática e Muskingum;

- o Interação da Declividade do Canal e Características do Hidrograma: alguns modelos possuem determinados termos da equação de movimento os quais foram omitidos e são muito importantes na avaliação de um canal com reduzida declividade. Assim, a simplificação da Onda Cinemática é apropriada somente para canais com declividade superior a 0,002 m/m. O modelo Muskingum-Cunge não deve ser utilizado para simular hidrogramas com velocidades crescentes, pois é omitido o termo da aceleração da equação de quantidade de movimento, sendo significativo nesse caso;
- o Configuração da Rede de Drenagem: em uma rede de drenagem dentrítica (caracterizada por uma ramificação onde os afluentes confluem com o curso d'água principal formando ângulos agudos), se a descarga de um tributário ou do canal principal não causa significativo efeito de remanso na confluência de dois cursos d'água, qualquer um dos métodos de escoamento em canais pode ser utilizado. Entretanto, caso o efeito de remanso seja importante na convergência de cursos d'água, modelos que consideram tal processo devem ser aplicados, como o modelo de Pulz;
- o Ocorrência de Escoamento Subcrítico e Supercrítico: durante uma enchente, o escoamento pode variar entre os regimes subcrítico e supercrítico. No caso do fluxo supercrítico ser reduzido no tempo, essa mudança não deverá ter significativo impacto na descarga do hidrograma. Contudo, se o fluxo supercrítico é longo no tempo, ele deve ser identificado e tratado de forma separada. No caso de existir mudanças de fluxo freqüentes e imprevisíveis, então nenhum dos modelos, anteriormente discutidos, são apropriados;
- o Disponibilidade de Dados para Calibração: geralmente, se não estiverem disponíveis dados observados, os modelos de base física proporcionarão maior facilidade de calibração e aplicação com certa confiança. Os modelos empíricos deverão ser evitados, nos casos da bacia hidrográfica e do canal principal não possuírem informações fluviométricas. Nesse cenário de carência de informações, modelos como a Onda Cinemática e o Muskingum-Cunge podem ser aplicados.

Avaliando o panorama da presente dissertação, o modelo de Pulz, em qualquer rio, implicaria na definição de uma relação entre o armazenamento e a vazão, que não está disponível para todas as sub-bacias existentes na bacia hidrográfica em estudo. O modelo da Onda Cinemática aplicaria-se aos trechos de rio com declividade superior a 0,0020 m/m, contudo, observa-se que a declividade média da bacia hidrográfica em tela é de 0,0015 m/m, ou seja, inferior ao indicado, onde ainda poderá haver a ocorrência de declividades inferiores, quando da discretização espacial da bacia.

O retardamento (*Lag*) é o modelo mais simples presente no HEC-HMS e computa o hidrograma de saída igual ao de entrada, mas com as ordenadas defasadas por uma duração específica. Logo, descartou-se a adoção desse modelo em função da sua simplicidade.

Devido à carência de dados fluviométricos na bacia hidrográfica de interesse, existe a dificuldade na calibração dos parâmetros inerentes ao modelo Muskingum, como o tempo médio de deslocamento da onda de cheia e o peso adimensional (integração da vazão no espaço).

Assim, foi adotado o modelo Muskingum-Cunge (seção-padrão) para todos os trechos de rios presentes na bacia hidrográfica em estudo, pois se aplica a calhas com declividades inferiores e superiores a 0,002 m/m e é compatível aos dados disponíveis.

Como as declividades dos rios da bacia hidrográfica em questão são, geralmente, inferiores a 0,002 m/m, espera-se que a parcela referente à força de pressão seja importante na propagação do escoamento, sendo recomendável a incorporação do efeito de difusão, como realiza o modelo Muskingum-Cunge. É importante destacar que tal modelo não considera o efeito de jusante, devido à forma como resolve as condições de contorno da equação diferencial de Saint Vénant.

Nesse contexto, as seções transversais dos rios da área de interesse foram consideradas retangulares e constantes ao longo de todas as suas extensões, embora tenham sido classificadas em quatro grupos diferentes, conforme o porte hidráulico do rio analisado. Tais parâmetros serão apresentados, posteriormente, quando da discretização espacial da bacia hidrográfica.

Apesar da grande aplicabilidade do HEC-HMS, tanto em diferentes tipos de bacias hidrográficas, como em distintos problemas a serem avaliados, o mesmo possui diversas

incorreções. Algumas dessas distorções foram sanadas na versão 2.0, ou seja, a correção de 178 itens, conforme relatou USACE (2000b).

Contudo, o mesmo documento aborda que a versão 2.0 ainda possui incorreções, as quais não foram resolvidas, tais como: a dificuldade na impressão de gráficos quando o sistema operacional é *Microsoft Windows* 95 ou 98; o impedimento no armazenamento de arquivos em disquetes; o fato do programa finalizar a operação quando a janela de "*Parameter Summary*" está aberta e o usuário deseja realizar a otimização de parâmetros; e o HEC-HMS finaliza a sua operação quando se está utilizando, ao mesmo tempo, o gerenciador de Otimização de Parâmetros com o gerenciador de Controle de Especificações ou Discretização da Bacia Hidrográfica.

Desde o lançamento da versão 2.0, o HEC-HMS sofreu três atualizações, cujo foco principal tem sido a identificação e a solução de defeitos operacionais. Nesse sentido, foram solucionados um total de 173 incorreções, conforme apresentaram USACE (2000c), USACE (2001a) e USACE (2001b). Em contrapartida, a partir de fevereiro de 2001, o suporte para os usuários que era gratuito passou a ser pago, limitando o seu domínio público.

Como aplicação do modelo em questão pode ser citado o trabalho de Dugger *et al.* (1997), onde os autores realizaram uma investigação da viabilidade da ligação entre o SIG (Sistema de Informações Geográficas) e o modelo hidrológico HEC-HMS, aplicado a uma tormenta ocorrida no verão de 1993 em nove estados do Meio-Oeste dos E.U.A. Assim, foi escolhida a bacia hidrográfica superior do rio Cedar (12.000 km² de área de drenagem), com dados totais diários de precipitação determinados pelo método de Thiessen e possuindo uma calibração do modelo com as informações pluviométricas e fluviométricas do mês de julho de 1993 e a simulação com o período de julho a outubro de 1993.

Os modelos selecionados no HEC-HMS para cada fase do ciclo hidrológico foram:

- Volume que gera Escoamento Direto: a Curva Número do SCS;
- Escoamento Direto: o Hidrograma Unitário do SCS;
- Escoamento Subterrâneo: ausente;
- Escoamento em Rios: Muskingum.

Os valores dos parâmetros requeridos para os modelos de Volume que gera Escoamento Direto e o próprio Escoamento Direto foram considerados médios para toda a bacia hidrográfica considerada. Por outro lado, os valores dos parâmetros necessários ao modelo de Escoamento em Canais (Muskingum) foram obtidos por correlação com os dados disponíveis nas estações fluviométricas e nos resultados da operação do SIG.

Os referidos autores realizaram uma avaliação de sensibilidade do HEC-HMS, cujos aspectos mais relevantes foram:

- A variação dos parâmetros do modelo Curva Número do SCS influem, enormemente, nos picos dos hidrogramas de saída na bacia hidrográfica, isto é, quando são reduzidos os patamares do índice CN, há uma diminuição dos picos dos hidrogramas, assim como, quando existe uma elevação da perda inicial e um abaixamento da percentagem de superfície impermeável na bacia hidrográfica; e
- Os efeitos nas mudanças dos atributos do modelo de Escoamento em Canais são mais sutis, deslocando de forma pouco significativa, o pico do hidrograma para um tempo maior ou menor.

Os principais resultados encontrados por Dugger et al. (1997) foram:

- A maior discrepância observada entre os resultados do HEC-HMS e os dados medidos foram associados aos valores iniciais de descarga no hidrograma de saída, nas quais as informações obtidas de vazão apresentavam patamares bem superiores aos dados simulados. Os autores concluíram que a maneira como o HEC-HMS realizava o cálculo da vazão, ou seja, assumindo que o escoamento subterrâneo era nulo até o início do evento de precipitação, foi responsável por tal diferença nos resultados;
- A influência dos parâmetros do modelo de Escoamento em Canais foi sentido nos picos dos hidrogramas, sendo atribuído ao seu fator de amortecimento; e
- A precisão na determinação dos parâmetros do HEC-HMS deve ser refinada, a fim de produzir resultados mais acurados.

3.1.3. Considerações sobre Modelos

Os modelos hidrológicos precipitação-vazão, anteriormente descritos, exprimem a extensa variedade de tipos, desde os que demandam poucas variáveis de entrada, como os concentrados e empíricos, até os mais sofisticados, como os físicos-distribuídos.

Conforme exprimiu Tucci (1998), há dificuldades na comparação dos modelos hidrológicos precipitação-vazão, em virtude do grande número de fatores hidrológicos que envolvem a

transformação da precipitação em vazão na bacia hidrográfica. Contudo, diversos autores têm dedicado-se a estudar tal linha de pesquisa.

Refsgaard e Knudsen (1996) realizaram um estudo de verificação e intercomparação de três modelos hidrológicos distintos aplicados em três bacias hidrográficas do Zimbábue, isto é, as bacias hidrológicas de Ngezi-South, Lundi e Ngezi-North, as quais possuem áreas de drenagem de 1.090 km², 254 km² e 1.040 km², respectivamente.

Os modelos, utilizados no estudo, referem-se às classes de conceitual-concentrado, semidistribuído (sub-bacias hidrográficas) e distribuído com base física, sendo representados por NAM (Nielsen e Hansen, 1973 *apud* Refsgaard e Knudsen, 1996), WATBAL (Knudsen *et al.*, 1986 *apud* Refsgaard e Knudsen, 1996) e MIKE SHE (Abbott *et al., 1986 apud* Refsgaard e Knudsen, 1996), respectivamente.

As informações de entrada foram séries diárias de precipitação, mensais de evaporação e diárias de descargas nos cursos d'água. Já o período de dados variou de acordo com a bacia hidrográfica considerada, ou seja, 1971 a 1979; 1971 a 1976 e 1981 a 1984 e, por último, 1977 a 1984, correspondendo, respectivamente, à áreas de drenagem de Ngezi-South, Lundi e Ngezi-North.

Nesse trabalho, destacaram-se duas estruturas de testes dos modelos selecionados. Na primeira, os modelos eram calibrados com um período de dados e, posteriormente, verificados com dados de um período subseqüente; na segunda, os modelos tinham os valores de seus parâmetros determinados com base nas características da bacia hidrográfica, sem fase de calibração e, em seguida, eram verificados.

Assim, os principais resultados obtidos foram:

- Na primeira estrutura de testes, os resultados encontrados foram bastante satisfatórios e indicaram que os três modelos obtiveram um desempenho muito semelhante, em termos do balanço hídrico anual para a verificação com quatro anos de dados; e
- Na segunda, esperava-se que o modelo de base física apresentasse melhores resultados que os outros. Contudo, esses não suportaram tal hipótese, pois os três modelos apresentaram bons resultados, onde o melhor desempenho foi atribuído para o WATBAL (Knudsen *et al.*, 1986 *apud* Refsgaard e Knudsen, 1996).

Nesse sentido, os autores concluíram que:

- No cenário de carência de dados medidos de vazão, um modelo concentrado seria uma ferramenta apropriada do ponto de vista técnico e econômico; e
- Para bacias hidrográficas sem dados fluviométricos, os modelos distribuídos parecem proporcionar resultados um pouco melhores que um modelo concentrado, desde que as informações fisiográficas da bacia hidrográfica estejam disponíveis ou possam ser obtidas.

Perrin e Michel (2000) realizaram uma extensiva confrontação do desempenho de 19 estruturas de modelos conceituais e empíricos, aplicados a 429 bacias hidrográficas existentes na Austrália, Brasil, Costa do Marfim, França e Estados Unidos da América.

Em virtude da grande quantidade de bacias hidrográficas nas quais os modelos foram aplicados, é minimizado o aspecto de que as conclusões obtidas nesse tipo de trabalho sempre são dependentes das características físicas e climáticas das bacias hidrográficas. Nesse estudo, a área das bacias hidrográficas variou desde 0,1 km² até 50.600 km² e incluiu uma extensa diversidade de condições de geologia, pedologia, topografia e cobertura do solo.

Para cada bacia hidrográfica, os dados de séries temporais foram divididos entre dois e seis subperíodos independentes, variando em função do comprimento da série. A extensão do período variou de um a oito anos, mas, normalmente, de quatro a seis anos. No total, 1.284 períodos de teste foram identificados na amostra das 429 bacias hidrográficas.

Em cada bacia hidrográfica, os modelos selecionados foram sucessivamente calibrados em cada período e, posteriormente, testados no modo de verificação em todos os períodos restantes. Por exemplo, para uma bacia hidrográfica com seis períodos de teste, foram realizadas seis calibrações e 30 verificações.

Os principais resultados obtidos pelos autores, são distintos dos encontrados por Refsgaard e Knudsen (1996), pois demonstraram que os modelos de estrutura muito simples podem alcançar um nível de desempenho equivalente aos modelos com a quantidade de parâmetros elevada. Outro aspecto observado é que a menor estabilidade dos modelos mais complexos, na passagem da fase de calibração para a verificação, pode ter origem nos problemas de excesso de parametrização.

Nesse sentido, Perrin e Michel (2000) concluíram que a complexidade dos modelos poderia ser restrita a somente três a cinco parâmetros, de acordo com o nível de informação contida na série temporal hidrológica avaliada para a identificação dos parâmetros.

Franchini e Pacciani (1991) realizaram um estudo comparativo do desempenho de sete modelos hidrológicos conceituais aplicados na bacia hidrográfica do rio Sieve de 822,79 km² de área, tributário do rio Arno, situado na Itália.

No referido estudo a atenção foi convergida para modelos que possuíam uma estrutura distribuída, ou seja, STANFORD IV (Crawford e Linsley, 1966 *apud* Franchini e Pacciani, 1991), SACRAMENTO (WMO, 1977 *apud* Franchini e Pacciani, 1991), TANK (Suguwara *et al.*, 1983 *apud* Franchini e Pacciani, 1991), APIC (Sittner *et al.*, 1969 *apud* Franchini e Pacciani, 1991), SSARR (Rockwood *et al.*, 1972 *apud* Franchini e Pacciani, 1991), XINANJIANG (Zhao, 1977 *apud* Franchini e Pacciani, 1991) e ARNO (Franchini e Todini, 1987 *apud* Franchini e Pacciani, 1991).

As informações de entrada foram a precipitação, a temperatura e a vazão (medições horárias), correspondendo ao período de 01 de dezembro de 1959 a 31 de março de 1960. Na etapa de calibração dos modelos, foram usados os dados referentes ao mês de dezembro, e para a fase de verificação, os, dos outros três meses.

As principais conclusões apontadas por esse trabalho foram:

- O grau de complexidade estrutural do modelo tem um aspecto importante na fase de calibração, pois as dificuldades encontradas nessa etapa eram atribuídas à quantidade de parâmetros de cada modelo, e a maior ou menor facilidade de visualização do significado físico desses parâmetros. Assim, os modelos significativamente distintos, produzem resultados basicamente equivalentes, com tempos de calibração, geralmente, proporcionais à complexidade estrutural do modelo, estando assim, em acordo com as colocações de Perrin e Michel (2000);
- Um modelo conceitual deve considerar duas demandas contrastantes: por um lado, precisa representar uma grande simplicidade estrutural e, por outro, continuar a respeitar a física do problema, tornando viável utilizar o conhecimento prévio da

natureza geomorfológica da bacia hidrográfica na calibração dos parâmetros. Esse último aspecto é de fundamental importância para a regionalização de parâmetros, isto é, quando bacias hidrográficas que não possuem dados medidos de vazão são estudadas; e

 Na avaliação entre os processos de calibração automática e manual dos parâmetros, é preferível o segundo processo, pois se pode extrair vantagens do conhecimento das características naturais da bacia hidrográfica.

Assim, é difícil ser encontrado um procedimento específico, que possa auxiliar na escolha de um determinado modelo hidrológico. Porém, pode-se fundamentar, principalmente, nos objetivos esperados do estudo, na disponibilidade de dados existentes sobre a bacia hidrográfica e na sensibilidade do usuário.

Dessa forma, aparece o seguinte questionamento: quais as necessidades que justificariam a utilização de um modelo concentrado de forma distribuída para melhor representar a variabilidade espacial de uma bacia hidrográfica, tentando englobar os aspectos positivos da variabilidade espacial de parâmetros (distribuído), mas sem elevar, demasiadamente, os dados de entrada?

A resposta é difícil de ser definida de maneira completa; entretanto, o estudo da representação dos processos hidrológicos, em diferentes escalas, pode ser um caminho possível, o qual é apresentado no item a seguir.

3.1.4. Escala Espacial Hidrológica

O estudo da resolução espacial utilizada nos modelos é de extrema importância, já que os processos hidrológicos apresentam comportamentos distintos de acordo com a escala do sistema. Esse item aborda tal assunto, apresentando considerações obtidas de diversos autores.

Preliminarmente, é importante apresentar a escala dos processos hidrológicos. Mendiondo e Tucci (1997) classificaram as escalas dos processos hidrológicos em microescala, mesoescala e macroescala para a análise da hidrologia superficial, que são apresentadas na Tabela 3.1.

Tipo de Escala	Escala Espacial (km)	Áreas e Assuntos	
	10 ⁵	Escala Global	
Macroescala	10 ⁴	Escala Continental	
	10 ³	Escala Regional	
	10 ²	Camada Limite para Fotografias Aéreas	
Mesoescala	10	Bacia Hidrográfica	
	1	Paisagens	
	10 ⁻¹	Escala de Parcela	
	10 ⁻²		
Microescala	10 ⁻³	Escala Pontual	
	10 ⁻⁴		
	10 ⁻⁵	Escala de Laboratório	

Tabela 3.1.	– Tipos	de Escalas	Hidrológicas.

Fonte: Adaptado de Mendiondo e Tucci (1997).

O problema da escala hidrológica reside em conhecer como variáveis e parâmetros são representados em escalas diferentes e como estabelecer as funções de transferência entre essas escalas. Por exemplo, a equação de infiltração, obtida por meio de um experimento de campo para uma área de poucos cm², não tem os mesmos parâmetros, quando utilizada para uma área de muitos m² ou km². Então como, medir esse processo para que essa equação ou transformações da mesma possam ser utilizadas nessas escalas (Mendiondo e Tucci, 1997)?

Essa complexidade na integração dos processos tem incentivado a discussão da escala hidrológica (Sivapalan *et al.*, 1987, Wood *et al.*, 1988, Grayson *et al.*, 1993; Beven, 1989; Beven, 1993 e Beven *et al.*, 1994), sendo que o principal objetivo nesse contexto é o de determinar qual é a área representativa apropriada de uma variável hidrológica, que identifique a escala do processo natural. Mendiondo e Tucci (1997) esclareceram que a representação dos processos hidrológicos em diferentes escalas, tem esbarrado, principalmente, nos seguintes aspectos:

 a heterogeneidade espacial dos sistemas hídricos e a incerteza com a qual os parâmetros e os processos são medidos em diferentes escalas;

- a dificuldade de representar os processos caracterizados e analisados na microescala para outras escalas da bacia hidrográfica; e
- a falta de relação entre os parâmetros de modelos matemáticos com as diferentes configurações espaciais encontradas na natureza.

Nesse cenário, um dos principais objetivos da modelagem precipitação-vazão é encontrar métodos para estimar seqüências de vazões, a partir de dados observados de precipitação, para bacias hidrográficas que possuam carência em dados fluviométricos. Uma abordagem para esse problema é tentar formular um modelo baseado, fundamentalmente, em considerações puramente físicas, no qual todos os parâmetros são extraídos em trabalhos de campo. No entanto, isso é de difícil obtenção, pois características físicas, como a condutividade hidráulica não saturada dos solos, podem variar de maneira acentuada em distâncias muito pequenas (Varella, 1998). Tal fato pode ocorrer mesmo em solos aparentemente uniformes, sendo assim, os modelos de base física deveriam utilizar elementos de área em que os parâmetros da bacia hidrográfica podem ser assumidos como constantes.

Beven (1989) comentou que os modelos de base física possuem um conjunto de hipóteses as quais mostram o funcionamento do sistema hidrológico. Entretanto, mesmo que as equações baseadas nessas hipóteses sejam de base física, não se garante que elas descrevam, de forma adequada, a realidade no meio natural. A razão dessa afirmação é que, o sistema físico, no qual tais equações são fundamentadas, é de pequena escala e homogêneo. Por conseguinte, nas aplicações em grande escala, os modelos de base física trabalham de maneira semelhante aos, concentrados, assumindo valores únicos para os parâmetros do modelo em cada elemento do módulo computacional.

Grayson *et al.* (1993), discutindo sobre o problema da escala hidrológica, questionaram as diferenças que ocorrem com os parâmetros de entrada para um modelo quando o tamanho de um elemento de área cresce da ordem de centenas de metros quadrados para a ordem de quilômetros quadrados. Dessa forma, para elementos de centenas de metros quadrados, os referidos autores sugeriram a utilização de modelos com o objetivo de obter dados para pesquisas e, para elementos da ordem de quilômetros quadrados, para casos de aplicação a problemas de planejamento em bacias hidrográficas.

À medida que se eleva a área de estudo, cada vez mais é questionada a suposição que o valor medido de um determinado parâmetro (por exemplo a condutividade hidráulica

saturada) é representativo quanto ao valor de todos os elementos pertencentes a uma dada escala. Isso ocorre porque a variabilidade espacial do parâmetro é demasiadamente grande para ser representada por um simples valor. Pode-se medir muitos pontos para determinar a distribuição dos parâmetros, porém isso se torna inviável, devido aos custos associados (Mendiondo e Tucci, 1997).

Dessa forma, pode-se considerar que os valores dos parâmetros são "valores efetivos" (Grayson *et al.*, 1993), que resultam da relação de entrada-saída de um sistema particular, mas que não representam, necessariamente, o resultado de uma quantidade fisicamente mensurável. Nesse contexto, os autores enfatizaram que, no presente momento, a metodologia para estimar parâmetros efetivos é incompleta, sendo estão necessária uma perfeita calibração do modelo.

Um problema que surge, quando a escala de um módulo computacional atinge um valor extenso, é que a hipótese de continuidade pode tornar-se inconsistente. Isso ocorre quando, dentro do elemento, apresentam-se mudanças no limiar da resposta do escoamento, por exemplo, quando o escoamento superficial é gerado a partir de áreas saturadas dentro do próprio elemento (Grayson *et al.*, 1993).

Investigando a influência da escala na avaliação dos processos hidrológicos, Wood *et al.* (1988) utilizando o modelo TOPMODEL, sugeriram que a diferença na resposta entre distintas áreas heterogêneas para uma mesma escala pode tornar-se menos importante quando a escala é da ordem de 1 km² (particularmente para precipitação, solo e topografia). Eles propuseram também que tal escala seja definida como "Área Representativa Elementar", a fim de prever a resposta da bacia hidrográfica. Nessa escala, ainda, pode ser necessário levar em conta a heterogeneidade na construção das predições, mas não é pertinente considerar o detalhamento dessa heterogeneidade.

Por outro lado, Beven *et al.* (1994) comentaram que, para a versão 94.01 do modelo TOPMODEL, um refinamento elevado da grade pode introduzir distorções nas direções dos fluxos, e os ângulos de declividade podem não refletir a superfície do lençol freático. Os referidos autores indicaram que a apropriada resolução dependerá da escala das características topográficas, mas lados de 50 m ou mais são, normalmente, sugeridos.

Nesse panorama, é interessante explicitar a experiência realizada por Figueiredo *et al.* (1999), que estudando a calibração e a verificação em quatro procedimentos distintos na

bacia hidrográfica do rio Piancó-PB/Brasil (4.550 km²), por meio do modelo NAVMO (conceitual, diário e estruturado em sub-bacias hidrográficas), concluíram que a resposta do modelo à variação do número de sub-bacias hidrográficas não é significativa, demonstrando que uma subdivisão menor também levaria a bons resultados.

Seybert (1996) buscou avaliar o efeito da variação da resolução espacial de dados (elevação, uso e ocupação e tipo de solo) nos resultados produzidos por um modelo hidrológico fundamentado somente no escoamento superficial. Assim, foi utilizada a bacia hidrográfica WE38, com área de 7,3 km², a qual está inserida na área de drenagem do riacho Mahantango em Pennsylvania nos E.U.A. O SIG ARC/INFO foi utilizado para a manipulação e apresentação dos dados espaciais e, ainda, a fim de criar arquivos de textos com parâmetros hidrológicos estimados para a entrada no modelo hidrológico. O modelo utilizado no trabalho foi o PSRM-QUAL (*Penn State Runoff Quality Model*) que possui a relação da Onda Cinemática para computar o escoamento superficial e discretiza a bacia hidrográfica em sub-bacias.

Nesse sentido, após cada definição da resolução espacial dos dados de entrada na bacia hidrográfica WE38 (intervalo de 5 a 500 m), a mesma foi subdividida em sub-bacias hidrográficas nas classes de 4, 10, 20, 40 e 80 sub-bacias, proporcionando um total de 32 pares de análise resolução espacial/número de sub-bacias. Assim, por exemplo, depois da definição da resolução espacial de 5 m, para a obtenção dos dados de entrada para o modelo hidrológico, foram definidas as sub-divisões da bacia hidrográfica em 4, 10, 20, 40 e 80 sub-bacias.

O modelo PSRM-QUAL foi calibrado na referida bacia hidrográfica em dois níveis de discretizações espaciais (resolução espacial de 5 m e 80 sub-bacias hidrográficas e resolução de 5 m e 20 sub-bacias) e para oito eventos máximos de precipitação identificados na área.

As principais conclusões encontradas por Seybert (1996) foram:

 Uma elevada resolução espacial para os dados produz melhores resultados de vazões de pico computadas, se comparadas com o volume escoado superficialmente, utilizando o modelo da Onda Cinemática;

- Os resultados da variação do tamanho das sub-bacias hidrográficas indicaram que ao elevar a discretização espacial, o modelo, baseado na Onda Cinemática, produziu volumes estimados e vazões de picos maiores;
- A discretização elevada da bacia hidrográfica considerada não se apresentou como necessária para produzir bons resultados pelo modelo PSRM-QUAL.

A breve discussão sobre a escala espacial hidrológica demonstrou as incertezas existentes na definição da resolução espacial para modelos hidrológicos. Ficou claro que irá depender do tipo de resposta esperada do modelo, porém mesmo assim, não se tem uma metodologia consagrada, que esclareça a mínima e a máxima resolução aplicável para cada tipo de problema hidrológico existente.

Nesse cenário, o presente trabalho vem buscar mais subsídios, que possam ampliar o grau de entendimento sobre a escala espacial hidrológica e, principalmente, na interface entre a utilização dos modelos concentrados e distribuídos.

Contudo, é importante destacar que a carência de informações espacializadas nas bacias hidrográficas é uma dificuldade para a utilização de modelos hidrológicos distribuídos. Assim, a importância da integração do geoprocessamento com o uso dos modelos hidrológicos será abordada no próximo item.

3.2. Geoprocessamento

Este item apresenta alguns aspectos relevantes sobre as técnicas de geoprocessamento, como definições e aplicações em recursos hídricos.

O termo geoprocessamento denota uma disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas. Essa tecnologia tem influenciado, de maneira crescente, diversas áreas, como: a Cartografia, a Análise de Recursos Naturais, os Transportes, as Comunicações e o Planejamento Urbano e Regional. Nos países de grande dimensão e com carência de informações, como o Brasil, o Geoprocessamento apresenta enorme potencial, principalmente, fundamentado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento é adquirido localmente (Câmara e Medeiros, 1998).

Nesse grupo de técnicas, destacam-se a aquisição de informações e o processamento digital de imagens orbitais de Sensoriamento Remoto e a manipulação dessas informações nos Sistemas de Informações Geográficas – SIG (Torres, 1997).

O sensoriamento remoto foi definido por Lillesand e Kiefer (1994) como:

"...a ciência e arte de obtenção de informações sobre um objeto, área ou fenômeno por meio de análises dos dados adquiridos, por um dispositivo que não entra em contato com o objeto, área ou fenômeno sobre investigação."

Em contrapartida, os SIG's são instrumentos computacionais do geoprocessamento, que permitem realizar análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados (Câmara e Medeiros, 1998).

Câmara *et al.* (1998) esclareceram que as distinções existentes entre um SIG e outros tipos de sistemas de informação correspondem à funções que realizam análises espaciais. Essas utilizam os atributos espaciais e não-espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados espaciais e buscam fazer simulações (modelos) sobre os fenômenos do mundo real, seus aspectos ou parâmetros.

Nesse sentido, a diferença básica entre um sistema Projeto Auxiliado por Computador (CAD) e o SIG é que o primeiro, caracteriza-se como uma ferramenta hábil para capturar desenhos em algum formato legível por uma máquina, nos quais os modelos tratam os dados como desenhos eletrônicos em coordenadas do papel; o outro, por sua vez, possui uma capacidade fundamental de tratar as relações espaciais entre objetos geográficos georreferenciados, classificando os dados em atributos. Assim, o SIG proporciona meios de consultar, atualizar e manusear um banco de dados espaciais (Câmara e Medeiros, 1998).

Enfatizando o sensoriamento remoto como um sistema de aquisição de informações, esse pode ser subdividido em dois grupos, isto é, o primeiro engloba a coleta de dados e, o segundo, a análise de dados (Moraes Novo, 1992).

Os sistemas mais utilizados na atualidade para o sensoriamento remoto orbital são o LANDSAT, o SPOT e os meteorológicos.

O sistema LANDSAT foi desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e é composto por uma série de satélites, lançados a partir de 1972, representando a fonte de dados de sensoriamento remoto com maior potencial de continuidade ao longo do tempo. Os dados do sistema LANDSAT são recebidos no Brasil desde 1973, o qual possui toda uma infra-estrutura para a sua recepção, processamento e distribuição, por meio do Instituto de Pesquisas Espaciais.

Já o sistema SPOT (*Système Pour l'Observation de la Terre*) é um programa espacial francês, que compreende, basicamente, de um satélite. O SPOT pode ser modificado para acomodar diferentes "cargas úteis", tais como: sistemas sensores, concebidos para certos objetivos e sistemas terrestres de aquisição, processamento e disseminação de dados.

A escolha do tipo de imagens a utilizar é de fundamental importância para o sensoriamento remoto, em virtude de características gerais como: o custo, a resolução espectral, a resolução espacial, os objetivos do trabalho e os prazos de entrega. Chavez e Bowell (1988) e Giansante e Branco (1997) apresentaram, em seus trabalhos, discussões sobre as aplicabilidades e as limitações dos dois sistemas de sensoriamento remoto orbital descritos, anteriormente.

Conforme comentaram Rango e Shalaby (1998), a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto na hidrologia tem crescido em importância, principalmente, devido a uma série de aspectos, destacando-se:

- a capacidade de adquirir dados distribuídos no espaço, em oposição a observações pontuais; e
- o potencial em obter dados sobre o estado da superfície terrestre para áreas extensas.

Rango e Shalaby (1998) discutiram diversas abordagens para tornar operacional a aquisição de dados e informações hidrológicas, por meio do sensoriamento remoto, sobressaindo-se a determinação da precipitação e da umidade do solo, a prospecção da água subterrânea, a evapotranspiração, a neve que gera escoamento superficial, a água superficial e as características da bacia hidrográfica.

Os mesmos autores esclareceram que as dificuldades da aplicação do sensoriamento remoto na hidrologia são de natureza financeira e organizacional e não, propriamente,

técnica e, ainda, que o aumento da utilização de SIG's, juntamente com o sensoriamento remoto, podem promover novos produtos e aplicações na área de modelagem hidrológica.

Eid e Campana (1999) comentaram que a manipulação do modelo digital de elevações (MDE), com a habilidade de extrair características fisiográficas e representativas do fluxo de descargas na bacia hidrográfica, caracteriza, parcialmente, a enorme funcionalidade que os Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) podem representar para o avanço dessa ciência.

Dessa forma, diversos autores têm destacado a crescente utilização do MDE para determinar a direção dos escoamentos, os limites das bacias hidrográficas e outras aplicações em recursos hídricos, como pode ser encontrado nos trabalhos de Garrote e Bras (1995), Maison *et al.* (1997), Oliveira *et al.* (1998) e Rubert *et al.* (1999).

As formas de integração dos SIG's com os modelos hidrológicos são condensadas por Kopp (1996) como:

- modelagem hidrológica fundamentada no próprio SIG, ou seja, apoiada somente nas funções presentes no SIG são gerados os resultados do modelo. Esse é o mais simples enfoque, que no atual estágio de desenvolvimento dos *software's* de SIG's, permite modelar apenas processos simplificados;
- implementação de pré e pós-processadores que permitem realizar a integração entre os modelos hidrológicos e os SIG's, sendo, atualmente, o procedimento mais comum;
- a inserção no código fonte de um programa o código do outro. Essa forma de integração é a mais poderosa e a que requer mais recursos de programação.

Como exemplo para a primeira forma de integração dos SIG's com os modelos hidrológicos tem-se o trabalho realizado por Baptista (1997), onde foi gerado o mapa de erosão do solo do Distrito Federal aplicando-se a fórmula universal de perdas de solo –USLE, por meio do processador de modelo digital de elevações, da interpretação de produtos de sensores remotos e da álgebra entre os mapas.

Para a segunda forma de integração, Eid e Campana (1999) destacaram o desenvolvimento do pré-processador CRWR-PrePro v. 2.0 (Oliveira *et al.*, 1998), constituído por uma série de
rotinas e controles implementadas no SIG Arc View da ESRI (*Environmental Systems Research Institute*).

Como exemplo para a terceira maneira de integração SIG's e modelos hidrológicos, referenciada por Kopp (1996), Eid e Campana (1999) citaram o *software* MIKE BASIN, do Instituto Dinamarquês de Hidráulica (DHI, 2001). Tal programa foi integrado ao SIG Arc View, por meio de uma interface gráfica com o usuário, com a devida inserção dos códigos fonte do *software* de gerenciamento dos recursos hídricos. Dessa forma, foram preservadas as habilidades do SIG e acrescentadas às funcionalidades requeridas para realizar o gerenciamento.

Os modelos integrados em código fonte (SIG's e modelo hidrológico) são preferíveis para solucionar problemas específicos, mas não representam a solução desejada para permitir a integração requerida por um usuário genérico, o qual possui ou detêm o conhecimento de um dado conjunto de programas (Eid e Campana, 1999).

4. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Corumbá até a seção definida como Corumbá IV foi selecionada para ser estudada, pois se caracteriza como uma área de drenagem com carência de dados hidrológicos, principalmente, fluviométricos e encontra-se em fase de projetos, a fim de abrigar uma futura barragem de regularização de vazão (Corumbá IV).

A figura 4.1 apresenta a área de estudo, ou seja, a bacia hidrográfica Corumbá até o eixo da barragem.

Inicialmente, na barragem Corumbá IV é previsto o aproveitamento hidrelétrico, a irrigação de áreas agricultáveis e o abastecimento de água para pequenos municípios do Estado de Goiás. Contudo, o Governo do Distrito Federal tem indicado, por meio da realização de estudos ambientais e pelos meios de comunicação de massa, que pretende utilizar a reservação de água na referida bacia hidráulica como manancial abastecedor para todo o Distrito Federal.

O rio Corumbá integra a bacia hidrográfica do rio Paraná e suas nascentes estão localizadas na serra dos Pirineus, que constitui o divisor de águas entre as bacias hidrográficas dos rios Paraná e Araguaia, e seu desenvolvimento se faz através do Estado de Goiás.

Conforme informações da CTE (1999), a área de estudo, parte alta da bacia do rio Corumbá, localiza-se entre as coordenadas 15°35' e 16°53' de latitude Sul e 47°52' e 49°04' de longitude Oeste, abrangendo uma área de drenagem de 6.993,7 km², localizada principalmente, no Estado de Goiás (5.944,9 km²) e uma menor parte do Distrito Federal (1.048,8 km²).

Integram a bacia do Alto Corumbá, além do Distrito Federal, parte dos territórios dos seguintes municípios goianos: Abadiânia, Alexânia, Cocalzinho de Goiás, Corumbá de Goiás, Santo Antônio do Descoberto, Luziânia, Anápolis e Silvânia.

Os principais cursos d'água dessa bacia hidrográfica, além do rio Corumbá, são: rio Capivari e rio das Antas, seus mais importantes afluentes pela margem direita e os tributários da margem esquerda, rios do Ouro, Sapezal, Areias, Descoberto, Alagado e Palmital.



Figura 4.1 – Área de Estudo (Bacia Hidrográfica Corumbá até Barragem) Fonte: Grolier Enciclopédia e Cartas IBGE 1:100.000

O clima da região destaca-se pela estabilidade, com tempo quente e úmido no verão e seco e de temperaturas amenas no inverno. Entretanto, eventualmente, ocorrem mudanças bruscas provocadas pela chegada de correntes de ar frio vindas do Sul. A temperatura anual média na região é de 20°C a 22°C. A precipitação média situa-se em torno 1.650mm/ano. No período de estiagem, a umidade relativa do ar é baixa, podendo atingir níveis inferiores a 20%. Já os ventos são calmos durante a maior parte do ano, passando a moderados em julho e agosto (CTE, 1999).

De forma geral, observa-se na bacia hidrográfica do Corumbá até a barragem a predominância de Latossolos Vermelho – Amarelo e Vermelho-Escuro. Em menor porção têm-se Cambissolo e solos Litólicos (CAESB, 2000).

A vegetação original predominante em toda a bacia hidrográfica é de Savana Arbórea Aberta. Entretanto, essa fisionomia está muito modificada pela atividade antrópica, na qual há a substituição por pastagens (CAESB, 2000).

Com relação ao uso e a ocupação atual da região de interesse, a principal atividade econômica é a agropecuária. Contudo, alguns municípios apresentam o processo de industrialização, como é o caso de Anápolis e Alexânia. Já a unidade de Cocalzinho de Goiás apresenta uma situação diferenciada dos demais municípios goianos, pois surgiu a partir da atividade industrial, isto é, uma fábrica de cimento que se instalou no local e, até hoje, é a maior fonte de arrecadação fiscal do município. O Distrito Federal caracteriza-se, fortemente, pelas atividades do setor terciário.

Os núcleos urbanos presentes na área de drenagem em estudo são: Abadiânia, Águas Lindas, Alexânia, Cocalzinho de Goiás, Corumbá de Goiás, Santo Antônio do Descoberto, Anápolis e Luziânia, pertencentes ao Estado de Goiás e o Distrito Federal. No Distrito Federal, estão inseridos na bacia hidrográfica em tela os seguintes núcleos urbanos: Brazlândia, Gama, Taguatinga, Ceilândia, Samambaia, Recanto das Emas, Santa Maria e Águas Claras.

5. METODOLOGIA

Este capítulo traz as etapas desenvolvidas no presente trabalho e uma descrição sucinta de todos os procedimentos realizados.

5.1. Estrutura Geral do Trabalho

O esquema geral das atividades desenvolvidas neste trabalho é apresentado na figura 5.1.

As atividades preliminares objetivaram a busca de informações sobre a bacia hidrográfica Corumbá até o eixo da barragem Corumbá IV, onde a partir de dados digitalizados da bacia hidrográfica (Guimarães e Eid, 2001), já inseridos no programa Arc View, foi elaborado um Modelo Digital de Elevações (MDE) com resolução espacial de 100x100 m.

Para a escolha da dimensão da célula de trabalho, percebeu-se que dimensões de 50x50 m excediam a quantidade de dados existentes e, de 200x200 m perdiam um grande número de informações. Assim, ao analisar os MDE's obtidos, identificou-se a célula de 100x100 m como aquela que melhor representava os dados existentes.

A fim de elaborar distintas discretizações espaciais na bacia hidrográfica em estudo, foram delineadas três níveis de discretização espacial, com o auxílio do pré-processador HEC-PrePro (Oliveira *et al.*, 1998). As discretizações espaciais foram de 23 sub-bacias, 8 subbacias e uma única bacia hidrográfica.

Os dados digitalizados e as informações da literatura foram utilizados para estimar as características das sub-bacias hidrográficas, inseridas na bacia hidrográfica Corumbá, e necessárias como dados de entrada para os modelos selecionados no HEC-HMS. As características foram: informações de uso e ocupação do solo para determinar os valores da Curva Número (CN); a área e a declividade média de cada sub-bacia hidrográfica; o comprimento, a distância da seção principal ao ponto do rio mais próximo ao centro de gravidade da sub-bacia e a declividade média do rio; as seções transversais e profundidades médias dos trechos dos rios e o tempo de pico do hidrograma unitário nas sub-bacias hidrográficas.



Figura 5.1 – Estrutura Geral do Trabalho

Os valores de precipitação para as simulações no modelo hidrológico foram provenientes de doze estações pluviométricas operadas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e CAESB (Companhia de Saneamento do Distrito Federal), localizadas dentro da bacia hidrográfica Corumbá até o eixo da barragem e nas suas adjacências. Nesse cenário, foram selecionados três eventos máximos de precipitação, sendo os períodos de 01 a 27 de janeiro de 1979 (Evento 1), 01 a 28 de fevereiro de 1983 (Evento 2) e 07 a 31 de dezembro de 1989 (Evento 3).

É importante destacar que, para a determinação do Evento 3, uma das estações pluviométricas possuía falhas em suas séries de dados, sendo então necessário um processo de preenchimento de falhas. O processo utilizado foi da média ponderada com pesos determinados a partir dos coeficientes de correlação linear entre as estações vizinhas e o posto com falhas. Nesse caso, foi utilizada mais uma estação pluviométrica (mais distante da área em estudo), denominada de apoio, pois o posto com falhas situa-se nas proximidades da bacia hidrográfica em tela.

Os dados pontuais de precipitação foram espacializados pela técnica da *"Krigagem"*, onde a precipitação média foi determinada em cada sub-bacia hidrográfica, delineada nas três distintas discretizações espaciais. Para a determinação da distribuição temporal da precipitação dentro do intervalo do dia foram obtidos dados de uma estação telemétrica em fase experimental de operação, situada nos limites da bacia hidrográfica em estudo. A análise das informações disponíveis permitiu identificar que, com o aumento do período analisado, houve uma tendência aproximadamente linear da distribuição temporal adimensional das chuvas. Nesse sentido, foi adotado uma distribuição temporal linear para a precipitação acumulada no intervalo do dia para cada sub-bacia hidrográfica delineada nos três níveis de discretização espacial.

Todas as informações foram organizadas, formando um banco de dados, permitindo a execução do HEC-HMS para o cálculo da vazão na bacia hidrográfica Corumbá até o eixo da barragem nas três discretizações espaciais. O intervalo de tempo de simulação adotado no HEC-HMS foi de uma hora, em virtude do tempo de concentração das sub-bacias hidrográficas delineadas nas discretizações espaciais.

Na aplicação do HEC-HMS, a primeira atividade foi a calibração do mesmo, com três subbacias hidrográficas, onde havia dados fluviométricos disponíveis (estações operadas pela ANEEL e CAESB) para os Eventos 1 e 2. Para a otimização dos parâmetros, foi utilizada uma função objetivo inserida no HEC-HMS. Os resultados obtidos na calibração foram utilizados para a fase de verificação no HEC-HMS, onde foram utilizados os dados do Evento 3.

Com o HEC-HMS verificado foi iniciado a fase de aplicação para as distintas discretizações espaciais da bacia hidrográfica Corumbá nos três eventos máximos de precipitação.

5.2. Justificativa do Modelo Selecionado

Ao iniciar a descrição dos procedimentos realizados para o alcance dos objetivos propostos neste trabalho, é importante esclarecer os principais motivos que levaram àescolha do modelo hidrológico HEC-HMS versão 2.0.

Os modelos hidrológicos existentes possuem concepções dos mais diversos tipos; desde os mais simples, como os modelos empíricos e concentrados, até os mais sofisticados; como os modelos distribuídos.

O desenvolvimento dos diversos modelos hidrológicos buscou representar, melhor, o processo de transformação de precipitação em vazão, incorporando a ampliação do conhecimento dos processos hidrológicos e o aprimoramento das técnicas matemáticas e computacionais.

Nesse contexto, a revisão bibliográfica desenvolvida levantou a necessidade da definição de algumas características determinantes para o modelo a ser utilizado, como: parcimônia; possuir parâmetros com relação física com os processos que representam e facilidade na representação espacial das sub-bacias hidrográficas.

O HEC-HMS possui modelos separados para cada componente do processo de transformação chuva-deflúvio, ou seja, os que computam o volume que gera escoamento direto, os de escoamento subterrâneo e de escoamento em canais (rios e reservatórios). Em cada componente do processo de escoamento, o HEC-HMS possui diversos modelos, partindo de formulações matemáticas, que vão desde as simples, até as mais complexas, permitindo ao usuário a liberdade de compor a melhor estrutura capaz de atingir os objetivos propostos.

5.3. Discretização Espacial

O modelo chuva-deflúvio concentrado não considera a heterogeneidade da distribuição espacial de variáveis e parâmetros da bacia hidrográfica, como é o caso do HEC-HMS.

Dessa forma, para a sua melhor aplicação foi necessária a discretização da bacia hidrográfica em sub-bacias.

Um critério importante para a divisão das sub-bacias hidrográficas é a incorporação das estações fluviométricas existentes e em operação, a fim de que os respectivos dados disponíveis possam ser aproveitados na calibração do modelo.

As informações de interesse da bacia hidrográfica em estudo, foram obtidas de Guimarães e Eid (2001), caracterizadas como curvas de nível, hidrografia e limite da bacia hidrográfica, inseridas no Arc View (versão 3.0a) da ESRI (Environmental Systems Research Institute).

Tais dados foram disponibilizados a partir da digitalização de cartas do IBGE, com curvas de nível de 40 em 40 m e na escala 1:100.000.

A figura 5.2 apresenta o MDE da bacia hidrográfica Corumbá até a Barragem.

A partir da definição do MDE para a bacia hidrográfica em estudo, a geração das sub-bacias foi realizado pelo algoritmo HEC-PrePro (Oliveira *et al.*, 1998), desenvolvido no *Center for Research in Water Resources at the University of Texas at Austin* nos Estados Unidos da América.

Esse algoritmo é um pré-processador para o Arc View e extrai informações de dados digitais de maneira a serem utilizados para outros programas.

O primeiro passo do algoritmo HEC-PrePro (Oliveira et al., 1998) foi sobrepor a rede hidrográfica ao MDE e realizar a operação para ajustar, uniformemente, o relevo da bacia hidrográfica, fixando apenas os *pixels* coincidentes com a rede hidrográfica. Esse procedimento corrigiu possíveis distorções do MDE e melhorou, significativamente, o delineamento das sub-bacias.

O segundo procedimento consistiu em mais uma correção do MDE, a fim de preencher as depressões, pois quando uma depressão não corresponde a um lago, mas sim ao resultado do processo de interpolação que gerou o MDE, é necessário que essa depressão seja preenchida de maneira a permitir a continuidade do fluxo para jusante.

Com o MDE corrigido realizou-se os cálculos das grades de direção de fluxo, de fluxo acumulado e delineamento das sub-bacias.

O algoritmo delineou as sub-bacias com base no relevo representado pelo MDE, onde foi necessário também a definição da localização espacial das estações fluviométricas em operação.

Apesar dos resultados, dos procedimentos com o algoritmo, terem combinado bem com os dados digitalizados (bacia e rede hidrográfica), observou-se a presença de pequenas bacias hidrográficas delineadas longe dos rios principais. Esse fato ocorreu porque o algoritmo processa, automaticamente, uma bacia hidrográfica na qual existe qualquer segmento da rede hidrográfica. Nesse contexto, algumas bacias hidrográficas foram agrupadas, utilizando-se o próprio HEC-PrePro (Oliveira *et al.*, 1998), obtendo um total de 23 sub-bacias hidrográficas a montante da barragem.

A figura 5.3 apresenta a discretização espacial da bacia hidrográfica Corumbá até o eixo da barragem com 23 sub-bacias, delineadas a partir do relevo representado pelo MDE corrigido e com a numeração fornecida pelo HEC-PrePro (Oliveira *et al.*, 1998).

Como um dos propósitos principais do presente trabalho, é a avaliação da resposta do modelo hidrológico concentrado HEC-HMS, frente a distintas discretizações espaciais, a partir da discretização inicial com 23 sub-bacias hidrográficas, as mesmas foram agrupadas formando duas outras configurações; uma com 8 sub-bacias e outra correspondendo à bacia hidrográfica como um todo. As figuras 5.4 e 5.5 apresentam as discretizações espaciais com 8 sub-bacias e com uma única bacia hidrográfica, respectivamente.

Figura 5.2 – MDE da Bacia Hidrográfica Corumbá até a Barragem (Altimetria)

Figura 5.3 – Discretização Espacial com 23 Sub-Bacias Hidrográficas

Figura 5.4 – Discretização Espacial com 08 Sub-Bacias Hidrográficas

Figura 5.5 – Discretização Espacial com Bacia Hidrográfica Única

5.4. Características da Bacia Hidrográfica

O conhecimento da bacia hidrográfica é primordial para uma perfeita modelagem hidrológica, tendo-se a identificação de características como: área, cursos d'água e densidade de drenagem, declividade do curso principal, declividade da bacia, geologia da bacia, uso e cobertura do solo, existência de obras hidráulicas etc.

Entretanto, no presente estudo, as informações obtidas para a bacia hidrográfica, agrupadas nas três distintas discretizações espaciais elaboradas, são específicas como dados de entrada para os modelos selecionados no HEC-HMS (volume que gera escoamento direto e escoamentos superficial direto, subterrâneo e em canais). Assim, têm-se os dados de curva número, área, declividade média da bacia, comprimento do rio principal, distância da seção principal ao ponto do rio mais próximo ao centro de gravidade da bacia, tempo de pico e declividade, largura e profundidade dos rios.

a) Curva Número (CN)

Para a determinação do valor da curva número (CN) são necessárias algumas definições, as quais serão apresentadas a seguir.

Conforme indicou a revisão bibliográfica, de forma geral, observa-se a predominância de Latossolos e Cambissolos na bacia hidrográfica em estudo. Dessa maneira, adotou-se a classificação no Modelo SCS dos solos Tipo A e B, respectivamente.

Considerando-se que as condições de umidade antecedente eram medianas para a época de cheias, com a precipitação característica nos últimos 5 dias, adotou-se a classe AMC II.

Quanto àestimativa de área impermeabilizada (dado neces sário para o modelo de volume de escoamento no HEC-HMS), tem-se que os valores tabelados pelo SCS indicam que: 85% das áreas comerciais são impermeáveis; 72% são para distritos industriais e o máximo de 65% para áreas residenciais. Nesse sentido, considerou-se que 65% das áreas urbanas presentes na bacia hidrográfica em estudo são impermeáveis.

A perda inicial (*inicial loss*), exigida pelo modelo SCS, é computada como sendo 20% da capacidade de armazenamento do solo e estimada a partir do valor de CN, encontrado para cada sub-bacia hidrográfica.

CTE (1999) classificou o uso e a ocupação do solo na bacia hidrográfica Corumbá até o eixo da barragem em seis tipos diferentes. Nesse contexto, foi incluído o tipo referente a lago, que possui uma transformação distinta de precipitação em escoamento superficial, referente a bacia hidráulica da barragem do Descoberto. Assim, para cada classe de uso e ocupação do solo foi atribuído um valor de CN, tanto para o tipo de solo A quanto para o tipo B.

Nesse cenário, foi elaborado um mapa da bacia hidrográfica em estudo, com a discretização espacial de 23 sub-bacias e com escala compatível ao mapa do uso e ocupação do solo de Corumbá, digitalizado e existente em CTE (1999).

Com as definições espaciais de uso e ocupação do solo e as poligonais das 23 sub-bacias hidrográficas, foram calculadas as porcentagens de áreas referentes a cada classe de uso e ocupação do solo por sub-bacia hidrográfica.

A partir das informações das porcentagens de classe de uso e ocupação do solo para cada uma das 23 sub-bacias hidrográficas e dos valores definidos de CN (solos A e B), calculouse a média ponderada para todas as sub-bacias.

Com base na porcentagem especificada para áreas urbanizadas em cada sub-bacia hidrográfica, calculou-se a porcentagem de áreas impermeáveis, valendo-se da consideração de que 65% das áreas urbanas, presentes na bacia hidrográfica em estudo, seriam impermeáveis.

Para a segunda discretização espacial da bacia hidrográfica em 8 sub-bacias, os respectivos valores de CN foram obtidos pelo seguinte procedimento.

Com base nos resultados de CN para a primeira discretização espacial em 23 sub-bacias hidrográficas, verificaram-se quais sub-bacias estavam inseridas em cada uma das 8 sub-bacias delineadas para a segunda discretização espacial. Logo, as 23 sub-bacias da primeira discretização espacial foram agrupadas em apenas 8 sub-bacias, passando-se, posteriormente, para a estimativa dos novos valores de CN.

Tal procedimento foi repetido para obter-se o valor do CN para a bacia hidrográfica como um todo. A tabela 5.1 apresenta o valor de CN para cada sub-bacia hidrográfica delineada com base no tipo de solo encontrado.

b) Área da Bacia Hidrográfica

Para o cálculo das áreas de cada sub-bacia hidrográfica nas três discretizações espaciais elaboradas foi utilizada a extensão CRWR-Vector do Arc View, onde as características pertinentes foram obtidas de Guimarães e Eid (2001).

O procedimento para a obtenção das áreas das sub-bacias hidrográficas na referida extensão é simples, onde se associam os valores calculados com as tabelas de atributos no Arc View.

c) Declividade Média da Bacia Hidrográfica

De forma análoga ao item anterior, a declividade média de cada sub-bacia hidrográfica nas três distintas discretizações espaciais foram obtidas por meio da extensão CRWR-Vector e denominada como *lb*.

d) Comprimento do Rio Principal

Os comprimentos dos rios principais em cada sub-bacia hidrográfica nas três diferentes discretizações espaciais foram obtidos diretamente no Arc View, cujos mapas gerados no mesmo têm uma resolução espacial de 100 m.

 e) Distância da Seção Principal ao Ponto do Rio Mais Próximo ao Centro de Gravidade da Bacia Hidrográfica

O procedimento utilizado para a obtenção da distância da seção principal ao ponto do rio mais próximo ao centro de gravidade das sub-bacias hidrográficas foi idêntico para as três discretizações espaciais elaboradas, sendo que será exposto, apenas o processo para a discretização espacial com 23 sub-bacias.

Nesse sentido, para uma sub-bacia hidrográfica delineada foi gerado um tema no Arc View, sendo atribuído o tipo polígono. Ativou-se esse tema específico e, por meio da extensão CRWR-Vector, foram inseridas, na respectiva tabela de atributos, as coordenadas geográficas referentes ao centro de gravidade dessa sub-bacia (a referida extensão fornece as coordenadas do centro de gravidade). Essa nova tabela foi adicionada a *view* do Arc View e como o mapa gerado também estava em coordenadas geográficas, o centro de gravidade da sub-bacia hidrográfica pôde ser visualizado espacialmente. Para finalizar, a distância do rio mais próximo ao centro de gravidade a seção principal foi obtida diretamente no Arc View.

Dessa forma, esse procedimento foi utilizado para calcular as respectivas distâncias da seção principal ao ponto do rio mais próximo ao centro de gravidade das demais sub-bacias hidrográficas.

f) Declividade Média do Rio

Fundamentado nos mapas topográficos da bacia hidrográfica em análise, que deram origem aos dados digitalizados no Arc View, os rios principais foram divididos em vários trechos, onde cada um era a distância entre duas curvas de nível existentes. Com as coordenadas geográficas desses pontos, foram calculadas as extensões de cada trecho, diretamente, no mapa no Arc View.

Nesse contexto, de posse das extensões e do conhecimento da altimetria (valores das curvas de nível) foram determinadas as declividades equivalentes constantes dos rios, por meio da equação 5.1, apresentada a seguir.

$$Ic = \left[\frac{\sum Li}{\sum \frac{Li}{\sqrt{Ii}}}\right]^2$$

(5.1)

Onde:

Ic = declividade equivalente constante do rio;

Li = comprimento do trecho i;

li = declividade total do trecho i.

Nesse procedimento, adotou-se que as características da seção transversal do rio permanecem constantes, e que o tempo com que uma massa d'água percorre o rio, com as declividades naturais, é o mesmo se a declividade fosse constante.

g) Seções Transversais e Profundidades Médias dos Trechos de Rios

As seções transversais dos rios foram consideradas retangulares por trechos e constantes ao longo de todas as suas extensões.

Como não estavam disponíveis as informações sistematizadas das seções transversais dos cursos d'água presentes na bacia hidrográfica em estudo, as referidas seções transversais médias foram obtidas por meio das características hidráulicas apresentadas em CAESB (2000) (que fundamentou-se em medições de descargas disponíveis em estações situadas na bacia hidrográfica), como também em visitas de campo e contatos realizados com moradores locais. Tal procedimento também foi utilizado para estimar as profundidades médias dos trechos dos rios.

É importante explicitar que em CAESB (2000), os dados analisados abrangeram o período de 1997 a 1999, não coincidindo com os períodos utilizados para as fases de ajuste e simulação do presente estudo.

A tabela 5.2 apresenta os quatro grupos de rios e as respectivas larguras e profundidades médias.

Grupo	Rio Típico	Largura Média (m)	Profundidade Média (m)
1	Descoberto, Areias e Antas (jusante da estação fluviométrica até confluência com o Corumbá)	18	1,6
2	Corumbá – trecho 1 (jusante da confluência com o rio Capivari até montante com o Antas)	46	1,8
3	Corumbá – trecho 2 – (jusante da confluência com o Antas)	58	2,5
4	Alagado e os demais trechos não citados	12	1,0

Tabela 5.2 – Larguras e Profundidades Médias dos Rios

h) Tempo de Pico nas Sub-Bacias Hidrográficas

Os tempos de pico padrão para cada sub-bacia hidrográfica foram estimados pela equação 4.8 (Página 35), a partir dos valores encontrados dos elementos de entrada e de todas as considerações, anteriormente, descritas.

A tabela 5.3 apresenta as características pertinentes à sub -bacias hidrográficas em estudo, como dados de entrada para os modelos selecionados no HEC-HMS, nas três discretizações espaciais elaboradas. É importante ressaltar, sobretudo, que a numeração designada para cada sub-bacia hidrográfica é a mesma atribuída pelo algoritmo HEC-PrePro (Oliveira *et al.*, 1998).

5.5. Dados Hidrológicos

Esse item aborda as informações de precipitação, descargas nos cursos d'água e evapotranspiração avaliadas no presente estudo.

a) Séries Históricas de Precipitação

A área total de drenagem da bacia hidrográfica de Corumbá até a barragem possui estações de medição da precipitação, monitoradas pela ANEEL e pela CAESB. Os dados disponíveis de longo período correspondem aos totais diários.

Dentro da poligonal da bacia hidrográfica em análise, há cinco estações pluviométricas em funcionamento, sendo quatro operadas pela CAESB e uma pela ANEEL. Fora da área de drenagem, mas nas proximidades da mesma, existem oito estações pluviométricas operadas pela ANEEL, contudo, apenas sete estão em funcionamento e possuem dados históricos das últimas décadas.

A tabela 5.4 apresenta as estações pluviométricas em operação, suas identificações, localizações e coordenadas.

Parâmetros das 23 Sub-bacias (Discretização 1)					Características dos Rios			
Sub-bacia	Área (km2)	lb (m/m)	L (m)	Lcg (m)	tp (horas)	lc (m/m)	Larg.(m)	Prof.(m)
1	436,9	0,0185	32553	10035	7,6	0,00291	18,0	1,6
2	690,9	0,0138	46912	17815	11,4	0,00174	18,0	1,6
3	439,2	0,0153	23384	14951	8,6	0,00158	18,0	1,6
4	652,0	0,0142	41585	21984	9,2	0,00726	18,0	1,6
5	481,1	0,0192	36491	19679	9,5	0,00368	12,0	1,0
6	717,6	0,0094	63054	29226	13,5	0,00302	12,0	1,0
7	42,2	0,0310	10026	5745	4,5	0,00230	46,0	1,8
8	157,1	0,0157	31833	22466	9,4	0,00388	12,0	1,0
9	145,7	0,0136	37562	19216	8,8	0,00606	12,0	1,0
10	23,1	0,0296	7162	4233	4,4	0,00069	46,0	1,8
11	169,1	0,0132	18845	17864	7,2	0,00448	46,0	1,8
12	768,1	0,0093	33667	24542	10,6	0,00258	12,0	1,0
13	55,4	0,0154	12295	7580	6,4	0,00067	46,0	1,8
14	462,1	0,0089	38722	25997	14,7	0,00053	18,0	1,6
15	607,3	0,0154	48023	29757	12,7	0,00260	12,0	1,0
16	282,8	0,0102	43855	29628	11,9	0,00320	18,0	1,6
17	199,2	0,0133	34182	21292	12,1	0,00091	18,0	1,6
18	16,0	0,0379	7421	2129	3,5	0,00082	58,0	2,5
19	138,1	0,0198	15884	10847	7,8	0,00072	58,0	2,5
20	133,2	0,0118	25315	13535	9,7	0,00074	18,0	1,6
21	150,0	0,0147	21885	15224	6,6	0,00729	12,0	1,0
22	127,3	0,0170	15112	10895	7,8	0,00065	58,0	2,5
23	99,3	0,0168	23126	12134	6,5	0,00589	12,0	1,0
Dor	âmatraa daa () Sub basiss (F	Viceretizeeő			Coroctorísti	aa daa Diaa	
Parametros das 8 Sub-bacias (Discretização 2)) Z)		Caracteristic	Cas dos Rios	j -
Sub-bacia	Área (km2)	L (m)	Lcg (m)	tp (horas)	lc (m/m)	Larg	g.(m)	Prof.(m)
Α	607,3	48023	29757	12,7	0,00260	12	2,0	1,0
В	934,8	85440	40588	15,7	0,00417	18,0		1,6
С	1329,3	104478	44685	20,9	0,00135	18,0		1,6
D	2559,4	111382	65156	23,2	0,00174	46,0		1,8
E	844,6	85922	49395	21,5	0,00094	18,0		1,5
F	127,3	15112	10895	7,8	0,00065	58,0		2,5
G	138,1	15884	10847	7,8	0,00072	58,0		2,5
Н	16,0	7421	1545	3,1	0,00086	58,0		2,5
I	436,9	32553	10035	7,6	0,00291	0,00291 18,0		1,6
Parâmetros da Bacia Única (Discretização 3) Características do Rio								
Sub-bacia	Area (km2)	L (m)	LCg (m)	tp (horas)		IC (m/m)		
Unica	6993,7	149998	/551/	27,5	0,00154			

Tabela 5.3 - Características das Sub-bacias Hidrográficas

Tabela 5.4 -	Estacões	Pluviométricas	em O	peração

Código	Estação	Localização	Coordenadas Geográficas	
			Latitude	Longitude
1548007	Brazlândia	Distrito Federal	15º 41'00"	48º 13'13"
1548009	Jatobazinho	Distrito Federal	15º 43'00"	48º 06'06"
1548008	Descoberto	Distrito Federal	15º 47'00"	48º 14'14"
1548006	Taguatinga	Distrito Federal	15º 47'00"	48º 08'08"
1648001	Ponte Anápolis-Brasília	Alexânia – GO	16º 05'00"	48º 30'30"
1647003	Mingone	Luziânia - GO	16º 09'21"	47º 56'56"
1648000	Estrada GO-56	Luziânia - GO	16º 21'47"	48º 05'05"
1649004	Goianápolis	Goianápolis	16º 30'59"	49º 01'01"
1649009	Ouro Verde de Goiás	Ouro Verde de Goiás - GO	16º 13'41"	49º 08'08"
1548003	Pirenópolis	Pirenópolis - GO	15º 51'00"	48º 57'57"
1548011	Padre Bernardo	Padre Bernardo - GO	15º 33'11"	48º 34'34"
1648002	Vianópolis	Vianópolis - GO	16º 44'47"	48º 31'31"
1647001	Ponte Sº Bartolomeu	Cristalina - GO	16º 32'16"	47º 48'48"
	(Apoio)			

Para a determinação da distribuição temporal da precipitação dentro do intervalo do dia foram obtidos dados da estação telemétrica 60445000, de mesma localização do posto pluviométrico 1648000, a qual encontra-se em fase experimental. Os dados disponíveis correspondem aos totais precipitados a cada hora durante os anos de 1996, 1997, 1998 e 2000.

A análise dos dados disponíveis permitiu a identificação de chuvas críticas, caracterizadas com durações de 4, 5, 6 e 9 horas, sendo verificados um total de 33, 22, 16 e 13 eventos para cada duração, respectivamente. A observação da distribuição temporal adimensional das respectivas chuvas indicou uma tendência aproximadamente linear, com o aumento do período analisado.

O critério adotado para definir a chuva crítica foi aquela onde a intensidade era maior na primeira metade da duração.

Assim, adotou-se uma distribuição temporal linear para a precipitação acumulada no intervalo do dia.

O Apêndice A apresenta as curvas adimensionais para as chuvas identificadas de 4, 5, 6 e 9 horas.

b) Séries Históricas de Descargas nos Rios

As informações históricas de descargas nos rios são necessárias à etapa de ajuste do modelo hidrológico.

A bacia hidrográfica em questão possui quatro estações fluviométricas e apenas uma fluviográfica. A estação fluviográfica situa-se a montante da barragem de regularização do Descoberto e apresenta somente dois períodos de curta duração (um mês), devido a inconsistências e/ou mau funcionamento do posto. Nesse sentido, em contatos realizados com a CAESB (operadora da estação), foi sugerida a obtenção de dados fluviográficos por outras fontes.

Como existe uma estação fluviométrica, imediatamente, a jusante da barragem do Descoberto, além da estação fluviográfica possuir dados inconsistentes, optou-se por adotar unicamente as informações existentes nas estações fluviométricas.

É importante explicitar que como não existem outros reservatórios de acumulação na bacia hidrográfica estudada e como há uma estação fluviométrica a jusante da barragem do Descoberto, adotou-se que a descarga registrada nessa estação corresponde àpropagação de cheia no respectivo reservatório, bem como as abstrações de água (retiradas de água do reservatório para abastecimento público e perdas por evaporação direta).

Recentemente, foi implantada a estação telemétrica 60445000 (mesma localização do posto pluviométrico 1648000), a qual encontra-se em fase experimental. Entretanto, os dados são escassos.

A tabela 5.5 apresenta as estações fluviométricas em operação, suas identificações, localizações e coordenadas.

Código	Estação	Localização	Coordenadas Geográficas	
			Latitude	Longitude
60436000	Descoberto - Jusante	Distrito Federal	15º 46'46"	48º 14'14"
60443000	Santo Antônio	Santo Antônio do	16º 05'05"	48º 18'18"
	do Descoberto	Descoberto - GO		
60430000	Ponte Anápolis-Brasília	Anápolis - GO	16º 08'45"	48º 36'36"
60432000	Rio das Antas	Anápolis - GO	16º 17'53"	48º 48'48"

As estações de Descoberto – Jusante e Santo Antônio do Descoberto estão localizadas no rio Descoberto, a jusante da barragem; a estação Ponte Anápolis – Brasília no rio Corumbá e, por último, a estação do Rio das Antas no próprio rio das Antas, situada imediatamente a montante da confluência com o rio da Extrema.

A estação Descoberto – Jusante é operada pela CAESB e os dados são fornecidos na forma de descargas médias diárias. Por outro lado, as demais estações fluviométricas são operadas pela ANEEL, fornecendo dados em cotas diárias e as respectivas curvas-chave para a conversão de cota em vazão.

A figura 5.6 apresenta a localização espacial das estações pluviométricas e fluviométricas na bacia hidrográfica em estudo, bem como, a rede de drenagem principal e o limite estadual entre Goiás e o Distrito Federal.

c) Evapotranspiração

A definição da precipitação de projeto, a seguir apresentada, buscou avaliar os eventos máximos registrados na bacia hidrográfica, tentando abranger um período com chuva em todos os dias.

Como a evapotranspiração é significativamente inferior aos eventos máximos de precipitação e sua influência nos resultados desse trabalho é reduzida, essa variável foi desconsiderada no modelo hidrológico HEC-HMS.

Figura 5.6 – Localização das Estações Pluviométricas e Fluviométricas Analisadas

5.6. Tratamento dos Dados Históricos

A metodologia para a determinação do evento de precipitação, a ser utilizado como dado de entrada para o modelo HEC-HMS, necessita de uma abordagem sistêmica, a qual é apresentada a seguir.

a) Seleção dos Eventos

Quando os objetivos da utilização de um modelo hidrológico são a previsão e o controle de cheias em uma bacia hidrográfica qualquer, a avaliação de eventos críticos de enchentes é necessária, com precipitações com duração da ordem do tempo de concentração da bacia.

Por outro lado, quando se deseja examinar a disponibilidade hídrica natural de um curso d'água para o atendimento da demanda para o abastecimento de água, por exemplo, a avaliação de eventos extremos de estiagem deve ser enfatizada, examinando a variação dos valores com duração correspondente àcondição mais crítica para a bacia hidrográfica em estudo.

No caso do presente trabalho, tem-se a avaliação da resposta do modelo hidrológico HEC-HMS, frente a diferentes discretizações espaciais da bacia hidrográfica, assim, a preocupação essencial foi manter uma estreita relação com os dados pluviométricos e fluviométricos existentes na aplicação do modelo.

Inicialmente, os dados diários registrados de todas as estações pluviométricas selecionadas foram impressos e analisados detalhadamente, observando-se a presença de falhas e em que datas possuíam as maiores alturas precipitadas.

Posteriormente, para os dados registrados de cada estação pluviométrica, inserida na bacia hidrográfica em estudo (no total de cinco estações), foram selecionados os períodos com as maiores alturas precipitadas e catalogados em planilha eletrônica. Para tais períodos identificados foram registrados os totais precipitados em todas as referidas estações pluviométricas.

Dessa forma, foi analisado em quais períodos havia um total precipitado mais elevado, indicando eventos extremos, perfeitamente, identificados e registrados. Dentre os períodos selecionados, um deles necessitou de se realizar o preenchimento de falhas em um posto

pluviométrico. O processo utilizado foi da média ponderada com pesos determinados a partir dos coeficientes de correlação linear entre as estações vizinhas e o posto com falhas. Nesse caso, foi utilizada mais uma estação pluviométrica (mais distante da área em estudo).

Assim, foram selecionados três eventos máximos de precipitação, sendo os períodos de 01 a 27 de janeiro de 1979 (Evento 1), 01 a 28 de fevereiro de 1983 (Evento 2) e 07 a 31 de dezembro de 1989 (Evento 3).

Como ainda faltava uma estimativa do tempo de concentração da bacia hidrográfica em estudo para comparar com a duração dos eventos selecionados, foram calculados os tempos de concentração pelo método Cinemático, auxiliado pela expressão de Manning, para os trechos do talvegue principal (rio Corumbá), definidos a partir dos parâmetros físicos determinados anteriormente.

Dessa forma, a tabela 5.6 apresenta os resultados alcançados, onde o tempo de concentração final estimado foi de 1,75 dias.

Sub-	L (m)	lc (m/m)	Larg. (m)	Prof. (m)	Rh (m)	V (m/s)	Tc (dia)
bacia							
6	63.054	0,00302	12	1,00	0,86	0,99	0,74
8	10.026	0,00230	46	1,67	1,67	1,35	0,09
7	2.437	0,00249	46	1,67	1,67	1,41	0,02
12	18.845	0,00448	46	1,67	1,67	1,88	0,12
11	7.162	0,00069	46	1,67	1,67	0,74	0,11
14	12.295	0,00067	46	1,67	1,67	0,73	0,20
27	15.112	0,00065	58	2,30	2,30	0,89	0,20
24	15.884	0,00072	58	2,30	2,30	0,94	0,20
22	2.963	0,00078	58	2,30	2,30	0,98	0,04
23	4.458	0,00086	58	2,30	2,30	1,02	0,05
					Som	atório	1,75

Tabela 5.6 - Tempo de Concentração na Bacia Hidrográfica - Método Cinemático

b) Espacialização da Precipitação

O modelo HEC-HMS admite uma precipitação uniformemente distribuída na bacia ou subbacia hidrográfica. Assim, quando há mais de uma estação dentro dessa poligonal ou nos limites da mesma, é necessária a determinação de uma precipitação média sobre a área.

Dentro dos possíveis métodos para a determinação da precipitação média, adotou-se a técnica de interpolação da "*Krigagem*".

Em virtude da disponibilidade de utilização e do conhecimento prévio, foi selecionado o programa Surfer for *Windows* versão 6 para determinar a precipitação média em cada subbacia hidrográfica nas três discretizações espaciais elaboradas, a qual a técnica de interpolação foi a "*krigagem*". Esse programa possui uma interface ágil e simples com o usuário.

Como o presente trabalho não tem por fim avaliar, com exatidão, os dados de precipitação coletados da bacia hidrográfica em tela, optou-se por utilizar o procedimento padrão do Surfer, em que os valores inseridos são ajustados automaticamente pelo modelo do variograma linear.

O procedimento de obtenção dos respectivos valores da precipitação média de cada subbacia hidrográfica foi idêntico para as três distintas discretizações espaciais.

Os gráficos das isoietas durante o Evento 3 são apresentados no Apêndice B.

5.7. Calibração do Modelo

Na calibração do HEC-HMS foram utilizados os Eventos 1 e 2, abrangendo os períodos de 01 a 27 de janeiro de 1979 (Evento 1) e 01 a 28 de fevereiro de 1983 (Evento 2).

A calibração dos modelos de escoamentos direto e subterrâneo no HEC-HMS somente foi possível nas sub-bacias hidrográficas que possuíam estações fluviométricas, isto é, nas estações Rio Antas, Ponte Anápolis-Brasília e Santo Antônio do Descoberto. Como discutido anteriormente, a estação Descoberto-Jusante foi utilizada somente para fornecer um hidrograma de entrada no rio Descoberto, pois se encontra a jusante da barragem existente de regularização de vazão (barragem Descoberto).

Na discretização espacial delineada com 23 sub-bacias hidrográficas (figura 5.3), a estação fluviométrica Rio Antas corresponde a sub-bacia nº 21; a estação Ponte Anápolis Brasília a conjunção das sub-bacias nº 05 a 07 e 12 e Santo Antônio do Descoberto pela sub-bacia nº 04.

O trecho do rio Descoberto, compreendido entre as estações Descoberto-Jusante e Santo Antônio do Descoberto (sub-bacia nº 04), foi utilizado para a calibração do modelo de escoamento em rios (canais).

O modelo que computa o volume que gera escoamento direto no HEC-HMS não foi calibrado, porque os dados de entrada são fixos e conhecidos, ou seja, o valor de CN, a porcentagem de área impermeabilizada e o valor da perda inicial.

O intervalo de simulação escolhido foi de 01 (uma) hora, em função do tempo de concentração das sub-bacias hidrográficas delineadas e dos dados de chuva discretizados temporalmente.

Os parâmetros dos modelos do Hidrograma Unitário de Snyder, Recessão Exponencial e Muskingum-Cunge foram otimizados automaticamente, respeitando-se os limites de variação possível para cada um deles e a coerência do valor adotado.

Os algoritmos inseridos no HEC-HMS que executam o ajuste entre os hidrogramas calculado e observado são denominados de funções objetivo, onde podem ser escolhidos os métodos de Nelder Mead ou Gradiente Univariado. No presente estudo, foi adotado o método de Nelder Meade e escolhida a função objetivo da soma dos resíduos ao quadrado, a qual realiza uma comparação da magnitude dos picos, volumes e tempos de pico dos dois hidrogramas, sendo apresentada na equação 5.2.

$$Z = \Sigma [q_0(t) - q_s(t)]^2$$
(5.2)

Em que:

Z = Função objetivo; q₀(t) = Vazões observadas; q_s(t) = Vazões calculadas. Em assim sendo, os parâmetros calibrados no HEC-HMS foram:

- Modelo de Escoamento Superficial Direto: os parâmetros "tp" e "Cp", isto é, o tempo de pico na sub-bacia hidrográfica e o coeficiente de armazenamento;
- Modelo de Escoamento Subterrâneo: os parâmetros "K" e "Qf", correspondendo ao coeficiente de decaimento e a razão da vazão de pico do ponto de inflexão (local no hidrograma onde existe uma contribuição maior do escoamento subterrâneo, após o pico do escoamento direto, sendo especificado como uma vazão ou uma razão da descarga de pico), respectivamente;
- Modelo de Escoamento em Rios (Canais): o parâmetro "n", referente ao coeficiente de Manning para o leito do talvegue.

O processo de calibração dos parâmetros para cada uma da três sub-bacias hidrográficas (Ponte Anápolis-Brasília, Rio Antas e Santo Antônio do Descoberto) para os Eventos 1 e 2 foi:

- Preliminarmente, foram fornecidos os valores iniciais para os seguintes parâmetros:

 "tp" pela tabela 5.3; o coeficiente "Cp", conforme a equação 3.6 (Página 35); a vazão subterrânea inicial "Q" como sendo o valor observado na respectiva estação fluviométrica no início do evento em análise; o coeficiente de decaimento "K" como 0,9; a razão da vazão de pico "Qf" equivalente 0,5 e o coeficiente de Manning "n" igual a 0,07;
- Os valores de "tp", "Cp", "K", "Qf" e "n" são alterados automaticamente no HEC-HMS, buscando-se os valores que mais aproximavam o hidrograma calculado do observado; e
- O conjunto de parâmetros que melhor proporcionou a combinação dos hidrogramas calculado e observado para cada sub-bacia hidrográfica é submetido a um ajuste mais detalhado, tentando-se alcançar um melhor resultado.

Portanto, a adoção de tal procedimento implicou que qualquer alteração nos valores dos parâmetros de um conjunto determinado, produziria perda na qualidade do ajuste entre os hidrogramas calculados e observados. Assim, os referidos conjuntos de parâmetros são designados como os mais adequados para cada sub-bacia hidrográfica, partindo-se, então, para a fase de verificação.

5.8. Verificação do Modelo

Na verificação do HEC-HMS foi utilizado o Evento 3, abrangendo o período de 07 a 31 de dezembro de 1989.

Em virtude da baixa qualidade nos resultados da calibração da estação Rio Antas, os valores encontrados foram descartados para a etapa de verificação. Assim, somente as calibrações realizadas nas estações Santo Antônio do Descoberto e Ponte Anápolis – Brasília para os Eventos 1 e 2 foram utilizadas para a fase de verificação.

Dessa forma, foram obtidos valores médios a partir dos resultados verificados na calibração para os seguintes parâmetros:

- Vazão inicial: foi determinado a vazão específica média para as sub-bacias hidrográficas calibradas, a partir dos dados observados;
- Parâmetro "Cp": foi determinado a vazão específica máxima para as sub-bacias hidrográficas calibradas, a partir dos dados observados e, posteriormente, calculado o valor de "Cp" pela equação 3.6 (Página 35);
- Parâmetros "K" e "Qf": foram admitidos como sendo a média aritmética dos valores encontrados nas sub-bacias hidrográficas calibradas;
- Número de Manning "n": determinado como o valor médio dos resultados encontrados nas sub-bacias hidrográficas calibradas;
- Demais parâmetros: já determinados, como os valores da Curva Número (CN) e tempo de pico.

5.9. Aplicação do Modelo para as Discretizações Espaciais

As considerações realizadas para a fase de verificação foram estendidas para a etapa de aplicação do modelo para as distintas discretizações espaciais nos três eventos, isto é, os períodos de 01 a 27 de janeiro de 1979 (Evento 1), 01 a 28 de fevereiro de 1983 (Evento 2) e 07 a 31 de dezembro de 1989 (Evento 3).

6. RESULTADOS

Os resultados obtidos na aplicação do modelo hidrológico HEC-HMS são apresentados neste capítulo.

6.1. Resultados da Etapa de Calibração

No processo de calibração do HEC-HMS utilizou-se dados de entrada de precipitação e descarga nos cursos d'água referentes aos períodos de 01 a 27 de janeiro de 1979 (Evento 1) e 01 a 28 de fevereiro de 1983 (Evento 2) nas sub-bacias hidrográficas Ponte Anápolis-Brasília, S^{to} Antônio do Descoberto e Rio Antas, conforme a localização das respectivas estações fluviométricas em funcionamento.

As representações esquemáticas das sub-bacias hidrográficas calibradas para ambos os eventos, associadas à estações fluviométricas, são mostradas nas figuras 6.1 a 6.3.



Figura 6.1 – Representação Esquemática da Estação Fluviométrica Ponte Anápolis-Brasília (2.009 km²)



Figura 6.2 – Representação Esquemática da Estação Fluviométrica S^{to} Antônio do Descoberto (1.089 km²)



Figura 6.3 – Representação Esquemática da Estação Fluviométrica Rio Antas (150 km²)

Os valores dos parâmetros, inicialmente, estimados e os calibrados para os modelos de escoamentos superficial direto, subterrâneo e em canais nas sub-bacias hidrográficas calibradas são apresentados na tabela 6.1.
Estação	Modelo de Escoamento	Parâmetro	Inicial	Otimizado
Rio Antas	Superficial Direto	tp (h)	6,6	6,7
Evento 1		Ср	0,40	0,40
	Subterrâneo	Qinicial (m ³ /s)	7,0	-
		К	0,90	0,83
		Razão - Qpico	0,5	0,04
Rio Antas	Superficial Direto	tp (h)	6,6	6,8
Evento2		Ср	0,80	0,78
	Subterrâneo	Qinicial (m ³ /s)	50,7	-
		К	0,90	1,0
		Razão - Qpico	0,5	0,1
Ponte Anáp-Bsb	Superficial Direto	tp (h)	18,0	18,1
Evento 1		Ср	0,49	0,40
	Subterrâneo	Qinicial (m ³ /s)	41,8	-
		К	0,90	0,86
		Razão - Qpico	0,5	0,22
Ponte Anáp-Bsb	Superficial Direto	tp (h)	18,0	18,2
Evento 2		Ср	0,80	0,70
	Subterrâneo	Qinicial (m ³ /s)	96,5	-
		К	0,90	0,87
		Razão - Qpico	0,5	0,22
S ^{to} Antônio do	Superficial Direto	tp (h)	9,2	9,1
Descoberto		Ср	0,40	0,54
Evento 1	Subterrâneo	Qinicial (m ³ /s)	30,6	-
		К	0.90	0,81
		Razão - Qpico	0,5	0,07
	Em canais	nº de Manning	0,070	0,053
S ^{to} Antônio do	Superficial Direto	tp (h)	9,2	9,0
Descoberto		Ср	0,74	0,69
Evento 2	Subterrâneo	Qinicial (m ³ /s)	36,7	-
		К	0.90	0,70
		Razão - Qpico	0,5	0,31
	Em canais	nº de Manning	0,070	0,051
	Subterrâneo	Qinicial (m ³ /s)	12	12,4

Tabela 6.1 – Parâmetros Estimados e Calibrados

Os resultados dos hidrogramas calculados e também os observados podem ser visualizados nas figuras 6.4 a 6.9, onde são apresentados os respectivos hietogramas de projeto (total precipitado – cor laranja), as perdas por infiltração (cor azul) e as respectivas vazões.



Figura 6.4 - Calibração na Sub-bacia Hidrográfica Rio Antas para o Evento 1



Figura 6.5 – Calibração na Sub-bacia Hidrográfica Rio Antas para o Evento 2



Figura 6.6 – Calibração na Sub-bacia Hidrográfica Ponte Anápolis-Brasília para o Evento 1



Figura 6.7 - Calibração na Sub-bacia Hidrográfica Ponte Anápolis-Brasília para o Evento 2



Figura 6.8 – Calibração na Sub-bacia Hidrográfica Sto Antônio do Descoberto para Evento 1



Figura 6.9 – Calibração na Sub-bacia Hidrográfica Sto Antônio do Descoberto para Evento 2

A tabela 6.2 resume os principais resultados obtidos na etapa de calibração das sub-bacias hidrográficas de Ponte Anápolis-Brasília, S^{to} Antônio do Descoberto e Rio Antas.

Sub-	Vazão de Pico		Data e Hora da		Volume Total Escoado			Erro no
bacia	(m	³/s)	Vazão	de Pico	(10 ³ x m ³)		Vol. Esc.	
	Calcul.	Observ	Calcul.	Observ.	Calcul.	Observ.	Diferença	(%)
		•						
Rio Antas	27,1	18,9	12/01/79	17/01/79	24.090	23.008	1.082	4,7
Evento 1			14:00	10:00				
Rio Antas	75,7	63,6	11/02/83	09/02/83	97.409	102.180	-4.771	-4,7
Evento 2			12:00	12:00				
Ponte A-B	236,2	160,0	20/01/79	20/01/79	193.220	183.006	10.214	5,6
Evento 1			00:00	10:00				
Ponte A-B	367,2	285,0	11/02/83	11/02/83	188.911	290.922	-102.011	-35,1
Evento 2			22:00	12:00				
S.A.Desc.	198,2	111,0	19/01/79	11/01/79	151.990	135.352	16.638	12,3
Evento 1			16:00	14:00				
S.A.Desc.	355,5	295,0	11/02/83	11/02/83	151.029	149.243	1.786	1,2
Evento 2			14:00	12:00				

Tabela 6.2 - Resumo dos Principais Resultados da Etapa de Calibração

6.2. Resultados da Etapa de Verificação

No processo de verificação do HEC-HMS utilizou-se dados de entrada de precipitação e descarga nos cursos d'água referente ao período de 07 a 31 de janeiro de 1989 (Evento 3) nas sub-bacias hidrográficas Ponte Anápolis-Brasília e S^{to} Antônio do Descoberto.

Os resultados dos hidrogramas calculados e também os observados podem ser visualizados nas figuras 6.10 a 6.11, onde são apresentados os respectivos hietogramas de projeto (*total precipitation* – cor laranja), as perdas por infiltração (*loss* – cor azul) e as respectivas vazões (*flow*).



Figura 6.10 – Verificação na Sub-bacia Hidrográfica Ponte Anápolis-Brasília para o Evento 3



Figura 6.11 – Verificação na Sub-bacia Hidrográfica Sto Antônio Descoberto para Evento 3

A tabela 6.3 resume os principais resultados obtidos na etapa de verificação das sub-bacias hidrográficas de Ponte Anápolis-Brasília e S^{to} Antônio do Descoberto.

Sub-	Vazão de Pico		Data e Hora da		Volume Total Escoado		Erro no	
bacia	(m³/s)		Vazão de Pico		(10 ³ x m ³)			Vol. Esc.
	Calcul.	Observ	Calcul.	Observ.	Calcul.	Observ.	Diferença	(%)
Ponte A-B	306,6	290,0	20/12/89	20/12/89	155.715	183.284	-27.569	-15,0
Evento 3			20:00	14:00				
S.A.Desc.	155,6	117,9	20/12/89	21/12/89	110.168	100.562	9.606	9,6
Evento 3			18:00	12:00				

Tabela 6.3 - Resumo dos Principais Resultados da Etapa de Verificação

6.3. Resultados da Etapa de Aplicação nas Discretizações Espaciais

Na aplicação do modelo hidrológico HEC-HMS ao evento de projeto nas três distintas discretizações espaciais (23 sub-bacias hidrográficas, 08 sub-bacias e bacia hidrográfica única) foram gerados hidrogramas no eixo da barragem Corumbá IV.

a) Discretização Espacial

A aplicação do modelo HEC-HMS aos três eventos de projeto nas discretizações espaciais com 23 sub-bacias, 08 sub-bacias hidrográficas e a bacia hidrográfica única produziram hidrogramas nas seções de saídas das respectivas sub-bacias. Esses hidrogramas foram propagados nos cursos d'água e, adicionados em cada junção, resultando no hidrograma de projeto no eixo da barragem.

Os esquemas das discretizações espaciais com 23 sub-bacias, 08 sub-bacias hidrográficas e bacia hidrográfica única no HEC-HMS estão apresentados nas figuras 6.12 a 6.14, onde "P" significa o trecho com propagação e "J" a junção.



Figura 6.12 - Representação Esquemática das 23 Sub-bacias Hidrográficas no HEC-HMS



Figura 6.13 - Representação Esquemática das 08 Sub-bacias Hidrográficas no HEC-HMS



Figura 6.14 - Representação Esquemática da Bacia Hidrográfica Única no HEC-HMS

b) Resultados

Os resultados encontrados para as aplicações dos três eventos à distintas discretizações espaciais definidas são apresentadas nas figuras 6.15 a 6.17, onde os gráficos apresentam, por evento, os valores para 23 sub-bacias, 08 sub-bacias hidrográficas e bacia hidrográfica única, respectivamente.



Figura 6.15 – Hidrogramas de Projeto para as Discretizações Espaciais para o Evento 1



Figura 6.16 – Hidrogramas de Projeto para as Discretizações Espaciais para o Evento 2



Figura 6.17 - Hidrogramas de Projeto para as Discretizações Espaciais para o Evento 3

A tabela 6.4 resume os principais resultados obtidos na etapa de aplicação para as distintas discretizações espaciais nos três eventos.

		-		
Evento	Discretização	Qp (m³/s)	Data/Hora da Qp	Volume Total
				(10 ³ m ³)
01	23 Sub-bacia	1.453,3	19/01/79 – 20:00	1.135.906
	08 Sub-bacia	1.421,4	20/01/79 - 00:00	1.195.370
	Bacia Única	1.417,0	20/01/79 - 04:00	1.175.290
02	23 Sub-bacia	2.135,9	11/02/83 – 20:00	922.115
	08 Sub-bacia	2.126,0	11/02/83 – 20:00	957.081
	Bacia Única	2.122,6	11/02/83 – 24:00	965.042
03	23 Sub-bacia	862,9	20/12/89 - 22:00	737.857
	08 Sub-bacia	857,0	21/12/89 - 02:00	769.639
	Bacia Única	841,5	21/12/89 - 06:00	700.769

Tabela 6.4 - Resumo dos Principais Resultados da Etapa de Aplicação das Discretizações

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados encontrados são analisados neste capítulo, apresentando também uma discussão das possíveis interferências ocorridas.

7.1. Análise dos Resultados da Etapa de Calibração

Na etapa de calibração no HEC-HMS nas sub-bacias Ponte Anápolis-Brasília, S^{to} Antônio do Descoberto e Rio Antas, foram observados os seguintes aspectos mais relevantes:

Os principais resultados compilados na etapa de calibração são relativos a vazão de pico, data e hora da vazão de pico e volume total escoado.

Os hidrogramas encontrados para a sub-bacia hidrográfica Rio Antas para os Eventos 1 e 2 indicaram vazões de pico calculadas sempre superiores aos dados observados. Para o Evento 1 a data e a hora da vazão de pico computada foi anterior ao valor observado em 116 h. Já o volume total escoado calculado foi superior ao observado em apenas 4,7%.

Para o Evento 2 na sub-bacia hidrográfica Rio Antas a data e hora da vazão de pico computada foi posterior ao dado observado em 48 h. O volume total escoado calculado foi inferior ao valor observado em 4,7%.

De forma geral, os resultados encontrados para essa sub-bacia hidrográfica não foram considerados satisfatórios. Tal fato pode estar associado ao reduzido tempo de pico, estimado em somente seis horas, implicando em perda do registro real do pico da descarga na área (medição diária). A defasagem observada nos picos de vazões observados e calculados indicaram estar associados a carência de dados pluviográficos e, principalmente, fluviográficos disponíveis na área.

Dessa forma, os resultados obtidos na sub-bacia hidrográfica Rio Antas foram desconsiderados para as etapas de verificação e aplicação para as distintas discretizações espaciais.

Os hidrogramas calculados e observados para a sub-bacia hidrográfica Ponte Anápolis-Brasília tiveram comportamentos semelhantes, tanto para o Evento 1, quanto para o Evento 2 (excetuando-se o volume total escoado). Especificamente ao Evento 1, a vazão de pico

computada foi superior ao dado observado em 47,6%, assim como o volume total escoado calculado, superior ao valor observado em 5,6%. A data e hora da vazão de pico computada foi anterior ao medido em campo, com uma diferença de 10 h.

Para o Evento 2, os resultados encontrados indicaram uma vazão de pico calculada maior que a observada em 28,8%. O volume total escoado computado foi menor que o valor observado em campo, com uma diferença de 35,1%. O tempo e hora da vazão de pico calculada foi posterior ao medido em campo em 10 h.

Para a sub-bacia hidrográfica S^{to} Antônio do Descoberto, os hidrogramas resultantes apresentaram um comportamento semelhante nos dois eventos, pois os valores de vazão de pico, volume total escoado e data e hora da vazão máxima computados foram sempre superiores aos dados observados. Assim, para o Evento 1 houve uma vazão de pico, volume total escoado e data e hora da vazão máxima calculados com uma diferença de 78,6%, 12,3% e 194 h, respectivamente.

Para o Evento 2, os valores calculados com relação aos observados indicaram uma diferença de 20,5% para a vazão de pico, 1,2% para o volume total escoado e 2 h para o data e hora da descarga máxima.

7.2. Análise dos Resultados da Etapa de Verificação

Os principais resultados compilados na etapa de verificação são referentes **à** sub -bacias hidrográficas de Ponte Anápolis-Brasília e S^{to} Antônio do Descoberto para o Evento 3.

Nesse contexto, os comportamentos dos hidrogramas calculados foram compatíveis com os observados para ambas as sub-bacias hidrográficas, sendo que os valores compilados das vazões de pico foram superiores aos dados observados.

Na sub-bacia Ponte Anápolis-Brasília a vazão de pico calculada foi maior que o valor observado em campo em 5,7%. Por outro lado, o volume total escoado computado foi menor que o observado, com uma diferença de 15,0%. A data e hora da vazão máxima calculada foi posterior ao observado em 6 h.

Na sub-bacia hidrográfica S¹⁰ Antônio do Descoberto a vazão de pico calculada foi superior ao valor observado em 32,0%. Esse comportamento foi semelhante ao volume total escoado

compilado, pois indicou ser superior ao dado observado em 9,6%. A data e hora da descarga máxima calculada foi anterior ao observado em 18 h.

Os resultados encontrados foram melhores na fase de verificação do que na calibração, quando comparados nos aspectos de vazão de pico, data e hora da descarga máxima e volume total escoado. Tal fato indica estar associado ao período utilizado para a determinação dos valores de CN em cada bacia hidrográfica. Assim, tem-se que o evento utilizado para a verificação foi mais próximo da data de determinação dos valores de CN do que a etapa de calibração. Nesse sentido, existe uma processo de modificação sócio-econômica (ocupação urbana, desmatamento, etc.) maior da fase de calibração de que da verificação.

7.3. Análise dos Resultados da Etapa de Aplicação nas Distintas Discretizações Espaciais

Na etapa de aplicação para as distintas discretizações espaciais delineadas para os três eventos foram observados os seguintes aspectos relevantes:

A variação da discretização espacial na bacia hidrográfica Corumbá até a seção da barragem Corumbá IV para os eventos selecionados não apresentou grandes influências nos resultados encontrados.

Entretanto, àmedida que a discretização espacial reduzia de 23 sub -bacias hidrográficas para uma única bacia hidrográfica houve uma perda de detalhes nos hidrogramas, como pequenas variações de descargas calculadas nas fases de ascenção e recessão dos mesmos. Tal fato é mais notório no Evento 3, onde houve perda de minúcias no primeiro pico de vazão.

À proporção que a discretização espacial reduziu para os eventos selecionados (23 subbacias para bacia única) foram observados os seguintes aspectos:

- A vazão de pico computada apresentou uma pequena tendência de diminuição do seu valor, existindo uma redução para os Eventos 1, 2 e 3 de 2,5%, 0,6% e 2,5%, respectivamente;
- A data e hora da vazão máxima calculada apresentou uma pequena tendência de elevação, mais significativa no Evento 1 e menos relevante no Evento 2;

 Não foi verificado uma tendência definida para o volume total escoado calculado nos eventos selecionados, sendo que para o Evento 2 houve uma elevação nos valores computados e nos Eventos 1 e 3 valores máximos na discretização espacial intermediária (08 sub-bacias hidrográficas).

À medida que se reduziu a discretização espacial (23 sub-bacias para bacia única) existiu uma decrescente representação física da área em estudo e uma crescente influência do efeito de amortecimento no cálculo da descarga.

Assim, tal efeito parece estar associado com a diminuição da vazão de pico, pois com uma discretização espacial elevada há maior influência do modelo de escoamento em rios (propagação nos rios) e menor do modelo de escoamento direto (propagação na bacia).

Para a data e hora da descarga máxima computada, o efeito de amortecimento indica também ter influência, porque um nível de discretização elevado proporciona uma transformação da precipitação em vazão mais rápida que uma discretização reduzida.

A dificuldade na identificação de uma tendência do volume total escoado computado indica estar associado ao comportamento dos extremos dos hidrogramas resultantes frente à diferentes discretizações espaciais, pois a alteração do tempo de pico provocou uma modificação da forma do hidrograma calculado dentro do intervalo de tempo definido em cada evento, sendo mais notável no Evento 1.

Pelo exposto, acredita-se que uma discretização espacial mediana é mais adequada para a bacia hidrográfica Corumbá, pois evita a influência preponderante de um modelo matemático (escoamento direto ou em rios) e não eleva demasiadamente a quantidade de dados de entrada.

Particularmente ao modelo de escoamento superficial direto selecionado no HEC-HMS, isto é, o Hidrograma Unitário de Snyder, encontra-se uma dificuldade no fato da determinação dos valores dos parâmetros *Cp* e *Ct*, que é uma avaliação ainda não realizada a contento, em virtude do obstáculo de estimá-los mais fidedignamente, conforme destacou Giansante (1999).

Não foi possível a comparação do comportamento dos hidrogramas na seção da barragem Corumbá IV com a estação fluviométrica Estrada GO-56 (código nº 60445000 na ANNEL), que se encontra a jusante da mesma, pois os dados da estação estavam disponibilizados somente com vazões máximas e mínimas para os períodos dos eventos selecionados.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho avaliou o efeito da variação da discretização espacial da bacia hidrográfica Corumbá até a seção da barragem Corumbá IV sobre os resultados produzidos pelo modelo concentrado HEC-HMS versão 2.0. Para tanto, foram estabelecidas três diferentes configurações espaciais na referida bacia hidrográfica que, conjuntamente, com dados digitalizados e informações da literatura, foi possível estimar as características fisiográficas pertinentes para compor a estrutura de dados de entrada para o HEC-HMS. Os valores de precipitação foram provenientes de estações pluviométricas, situadas dentro e nas adjacências da bacia hidrográfica em estudo, sendo determinado três eventos máximos (Evento 1 – 01 a 27 de janeiro de 1979, Evento 2 – 01 a 28 de fevereiro de 1983 e Evento 3 - 07 a 31 de dezembro de 1989). A partir de uma estação telemétrica em operação experimental na bacia hidrográfica em tela foi verificada a distribuição temporal adimensional da precipitação dentro do intervalo do dia. Os dados pontuais foram espacializados pela técnica da "Krigagem" e calculada a precipitação média em cada subbacia hidrográfica delineada. A partir dessas informações, o modelo foi calibrado em três estações fluviométricas e para os Eventos 1 e 2, cujos parâmetros foram otimizados por um algoritmo inserido no HEC-HMS. Posteriormente, com base nas duas melhores estações calibradas, o HEC-HMS foi verificado para o Evento 3. Em seguida, o modelo foi aplicado para as discretizações espaciais de 23 sub-bacias, 08 sub-bacias e bacia hidrográfica única.

A calibração na sub-bacia hidrográfica onde está inserida a estação fluviométrica Rio Antas não foi considerada satisfatória, sendo que a comparação dos hidrogramas calculados e observados indicou diferenças expressivas. Não se pode deixar de destacar a reduzida área de drenagem dessa sub-bacia hidrográfica, implicando em baixo tempo de concentração. Assim, tem-se a possível perda do registro real do pico da vazão máxima na área, pois a estimativa das descargas foi feita a partir de dados diários de cota.

As calibrações nas sub-bacias hidrográficas Ponte Anápolis-Brasília e S^{to} Antônio do Descoberto apresentaram resultados satisfatórios, onde as vazões de pico calculadas foram superiores aos dados observados. Nesse contexto, a calibração na estação S^{to} Antônio do Descoberto teve um comportamento semelhante para os Eventos 1 e 2, pois os resultados de vazão de pico, volume total escoado e data e hora da descarga máxima computados, em comparação aos valores observados, indicaram as mesmas tendências.

A etapa de verificação do modelo nas sub-bacias Ponte Anápolis-Brasília e S^{to} Antônio do Descoberto também apresentaram resultados satisfatórios e com vazões de pico calculadas superiores aos valores observados. Os resultados das datas e horas da vazão de pico e dos volumes totais escoados computados, em comparação aos dados observados, indicaram tendências contrárias nas duas sub-bacias hidrográficas.

A variação do nível da discretização espacial na bacia hidrográfica Corumbá até a seção da barragem Corumbá IV para os Eventos 1, 2 e 3 não apresentou grandes influências nos resultados encontrados. Contudo, àproporção que a discretização espacial reduziu de 23 sub-bacias hidrográficas para uma única bacia hidrográfica, a vazão de pico computada indicou uma pequena tendência de diminuição e a data e hora da descarga máxima uma leve tendência de elevação de seus valores. Não foi verificado uma tendência definida para o volume total escoado calculado para os eventos selecionados.

Os resultados alcançados permitem inferir que:

- A variação da discretização espacial na bacia hidrográfica considerada não produziu grandes modificações nos resultados do modelo HEC-HMS;
- A medida que a discretização espacial reduziu na bacia hidrográfica Corumbá houve uma perda de detalhes nos hidrogramas, como pequenas variações de descargas calculadas;
- Os resultados da variação do tamanho das sub-bacias hidrográficas indicaram que ao elevar a discretização espacial, o modelo HEC-HMS produziu vazões de pico um pouco maiores e tempos de pico levemente menores;
- A influência dos modelos de Escoamentos Direto e em Rios (Canais) no HEC-HMS foi sentida nos picos dos hidrogramas, sendo atribuído à influência do fator de amortecimento; e
- A aplicabilidade do HEC-HMS na bacia hidrográfica Corumbá até a seção da barragem Corumbá IV é exeqüível, embora apresente vazões de pico computadas superiores aos dados observados.

Algumas observações foram apontadas para serem encaradas como recomendações para próximas pesquisas e aplicações do modelo hidrológico, tais como:

- Melhorar a estimativa dos valores dos coeficientes Cp e Ct do Hidrograma Unitário de Snyder, pois existe a dificuldade nas suas estimativas e não foi averiguado a sua importância nos resultados produzidos; e
- Aplicar a metodologia proposta neste estudo para outras bacias hidrográficas, com áreas de drenagens inferiores e superiores a bacia hidrográfica do Corumbá, a fim de analisar e comparar os resultados a serem produzidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, M. B.; Bathurst, J. C.; Cunge, J. A.; O'Connel, P. E. e Rasmussen, J. (1986). "An introduction to the european hydrological system - Systeme Hydrologique European." *Journal of Hydrology.* 87 45 – 59.
- Alley, W. M. e Smith, P. E. (1990). *Distributed Routing Rainfall Runoff Model Version II*. United States of Geological Survey. User's Manual.
- Baptista, G. M. M. (1997). Diagnóstico Ambiental da Perda Laminar de Solos, no Distrito Federal, por meio do Geoprocessamento. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF.
- Bedient, P. B. e Huber, W. C. (1992). *Hydrologic and floodplain analysis*. Addison-Wesley, New York, EUA.
- Beven, K. (1989). "Changing ideas in hydrology the case of physically-based models." *Journal of Hydrology.* **105**, 157-172.
- Beven, K. (1993). "Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling." Advances in Water Resources. 16, 41-51.
- Beven, K; Lamb, R.; Quinn, P.; Romanowiciz, R.; Freer, J. e Fisher, J. (1994). "Topmodel." In: V. P. Singh (ed). Computer Model of Watershed Hydrology. Water Resources Publication. Fort Collins.
- Burnash, R. J. C.; Ferrel, R. L. e McGuire, R. A. (1973). "A general streamflow simulation system – conceptual modeling for digital computers." *Join Federal State River Forecasting Center Report.* Sacramento, CA, EUA.
- CAESB (2000). Estudos de Reavaliação do Sistema de Esgotamento Sanitário do Distrito Federal – Diagnóstico do Setor Oeste. Companhia de Saneamento de Brasília. Relatório Final, Versão Preliminar, Fevereiro de 2000.
- Câmara, G.; Barbosa, C.; Cordeiro, J. P.; Lopes, E.; Freitas, U. M. e Lucena, I. (1998). "Operações de Análise Geográfica." In: *Geoprocessamento para Projetos Ambientais*. 2^a Ed., INPE, São José dos Campos, São Paulo, Brasil. Obtido no endereço http://www.dpi.inpe.br, em dezembro de 1999.
- Câmara, G. e Medeiros, J. S. (1998). "Princípios Básicos em Geoprocessamento." In: Sistema de Informações Geográficas. Aplicações na Agricultura. 2ª Ed., Embrapa-SPI, Brasília, Brasil.
- Chavez Jr., P. S. e Bowell, J. A. (1988). "Comparison of the spectral information content of landsat thematic mapper and spot for three different sites in the Phoenix, Arizona region." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. EUA, **54** (12), 1699-1708.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. 1^a Ed. Editora Mc Graw-Hill.
- Clarke, R. T. (1973). "A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use." *Journal of Hydrology*. **19**, 1-20.

- Crawford, N. H. e Linsley, R. K. (1966). "Digital simulation in hydrology, stanford watershed model IV." Tech. Rep. – Civil Department. Stanford University, Stanford, CA, EUA. 39.
- CTE (1999). Estudo de Impacto Ambiental para o Aproveitamento Hidrelétrico Corumbá IV. Centro Tecnológico de Engenharia Ltda. Goiás. 1999.
- DHI DANISH HYDRALIC INSTITUTE. (2001). MIKE BASIN A Tool River Basin Planning and Management. In: <u>http://www.dhisoftware.com/mikebasin/index.htm</u>, em julho de 2001.
- Dugger, A. L.; Holley, E. R. e Maidment, D. R. (1997). Linking GIS with the Hydrologic Modeling System: An Investigation of the Midwest Flood of 1993. Master of Science in Engineering. The University of Texas at Austin, E.U.A. Obtido no endereço <u>http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment</u>, em maio de 2001.
- Eid, N. J. e Campana, N. A. (1999). "Avaliação do estágio da integração geoprocessamentorecursos hídricos". XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte. Anais em CD-ROM.
- Franchini, M. e Pacciani, M. (1991). "Comparative analysis of several conceptual rainfallrunoff models." *Journal of Hydrology*, 122, 161-219.
- Franchini, M. e Todini, E. (1987). "Modello xinanjiang per il calcolo dell'assorbimento superficiale." *VIII Corso di Aggiornamento in Tecniche per la difesa dall'inquinamento.* Univer. Della Calabria, Cosenza. Itália.
- Garrote, L. e Bras, R. L. (1995). "A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models." *Journal of Hydrology*, 167, 279-306.
- Giansante, A. E. e Branco, F. C. (1997). "A utilização dos sistemas de informação geográfica na gestão do saneamento ambiental". XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória, Brasil, 6p. Anais em CD-ROM.
- Giansante, A. E. (1999). "Determinação da vazão máxima de uma bacia hidrográfica uma comparação entre os métodos sintéticos e suas aplicabilidades". XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, Brasil, 12p. Anais em CD-ROM.
- Grayson, R.B.; Blöschl, G.; Barling, R.D. e Moore, I.D. (1993). "Process, scale and constraints to hydrological modeling in GIS." *HydroGis 93. Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources.* IAHS. **211**, 83-92.
- Guimarães, M. B. e Eid, N. J. (2001). Obtenção de Indicadores Espaciais Representativos do Impacto da Ocupação Atual sobre os Recursos Hídricos na Bacia do Rio Corumbá. Universidade de Brasília, Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Relatório Final.
- Knudsen, J.; Thomsen, A. e Refsgaard, J. C. (1986). "Watbal: a semidistributed, physically based hydrological modeling system." *Nordic Hydrology.* **17**, 347 362.
- Kopp, S. M. (1996). "Linking GIS and hydrological models: where we have been, where we are going?." HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management. IAHS. 235, 133-139.

- Lanna, A. E. (1999). "MODHAC97: modelo hidrológico auto-calibrável." *Cópia encaminhada pelo autor*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.
- Lillesand, T. M. e Kiefer, R. W. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3^a Ed., Editora John Wiley & Sons, Inc., EUA.
- Lopes, J. E.; Braga, B. F. F. e Conejo, J. L. (1982). "SMAP A simplified hydrologic model in applied modeling in catchment hydrology." In: Singh, V. P. Water Resources Publication.
- Maison, P.; Pinheiro, A. e Caussade, B. (1997). "Modelização hidrológica de base física e o uso do SIG". Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória, Brasil.
- Mendiondo, E. M. e Tucci, C. E. M. (1997). "Escalas hidrológicas I: conceitos." Revista Brasileira de Recursos Hídricos / Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre/RS, 02 (01), 59-79.
- Moraes Novo, E. M. L. M. (1992). Sensoriamento Remoto: Princípio e Aplicações. 2ª Ed. Editora Edgard Blücher, São Paulo, Brasil.
- Mota, J. C. J. e Tucci, C. E. M. (1983). "Avaliação do efeito da urbanização no escoamento através de modelo hidrológico". *Recursos Hídricos Publicação* 6. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.
- Nielsen, S. A. e Hansen, E. (1973). "Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis." *Nordic Hydrology*. **04**, 171 190.
- Oliveira, F.; Reed, S. e Maidment, D. R. (1998), "HEC-PrePro v. 2.0: Na ArcView Pré-Processor for HEC's Hydrologic Modeling System." ESRI User's Conference. 25 a 31 de julho. San Diego, Califórnia, EUA.
- Paiva, A. E. D. B.; Silans, A. P.; Albuquerque, D. J. S. e Almeida, C. N. (1999). "Aplicação do modelo hidrológico distribuído açumod àbacia hidrográfica do rio taperoá – estado da paraíba". XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte. Anais em CD-ROM.
- Perrin, C. e Michel, C. (2000). "Links between performance and complexity of hydrological models through in extensive comparative assessment of simple model structures on 429 catchments." Comunicação pessoal.
- Rango, A. e Shalaby, A. I. (1998). "Operational applications of remote sensing in hydrology: success, prospects and problems." *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques.* **43**, 947-968.
- Refsgaard, J.C. e Knudsen, J. (1996). "Operational validation and intercomparison of hydrological models." *Water Resources Research*, 32(7), 2189-2202.
- Righetto, A. M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. 1^a Ed. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- Rockwood, D. M.; Davis, E. D. e Anderson, J. A. (1972). User Manual for COSSARR Model. U. S. Army Engineering Division. North Pacific, Portland, OR. EUA.

- Rubert, O. A. V.; Ribeiro, C. A. A. S. e Chaves, M. A. (1999). "Um novo divisor de águas na geração de modelos digitais de elevação hidrologicamente consistente". Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, Brasil.
- Seybert, T. A. (1996). *Effective Partitioning of Spatial Data for Use in a Distributed Runoff Model.* Tese de Doutorado, Universidade de Pensilvânia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pensilvânia, E.U.A.
- Sittner, T. W.; Schauss. E. C. e Monro, J. C. (1969). "Continuos hydrograph synthesis with na API type hydrological model." *Water Resources Research.* **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 Resources Research, 23, (12), 2266-2278.
- Sugawara, M.; Wanabe, I.; Ozaki, E. e Katsuyame, Y. (1983). *Reference Manual for the TANK Model*. National Research Center for Disaster Prevention. Tóquio, Japão.
- Todini, E. (1988). "Rainfall-runoff modeling past, present and future." *Journal of Hydrology*. **100**, 341-352.
- Torres, E. P. (1997). Estudo da Expansão Urbana na Bacia do Lago Descoberto Através de Geoprocessamento. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF.
- Tucci, C. E. M. (1997). "Escoamento Superficial." In: Tucci, C. E. M. (org.) Hidrologia: ciência e aplicação. 2ª Ed., Editora da Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 391-441.
- Tucci, C. E. M. (1998). Modelos Hidrológicos. 1^a Ed., Editora da Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil.
- USACE (1944). Hydrology, San Gabriel River and the Rio Hondo above Whittier Narrows flood control basin. US Army Engineer District, Los Angeles, California, EUA.
- USACE (1979). Introduction and application of kinematic wave routing techniques using HEC-1, Training Document 10. Hydrologic Engineering Center, Davis, E.U.A.
- USACE (2000a). HEC-HMS Hydrologic Modeling System. Technical Reference Manual. Version 2.0. Obtido no endereço <u>www.usace.army.mil</u>, em setembro de 2000.
- USACE (2000b). *HEC-HMS Hydrologic Modeling System. Release Notes. Version 2.0. Obtido no endereço <u>www.usace.army.mil</u>, em setembro de 2000.*
- USACE (2000c). HEC-HMS Hydrologic Modeling System. Release Notes. Version 2.0.3. Obtido no endereço <u>www.usace.army.mil</u>, em agosto de 2000.
- USACE (2001a). HEC-HMS Hydrologic Modeling System. Release Notes. Version 2.1.1. Obtido no endereço <u>www.usace.army.mil</u>, em agosto de 2001.
- USACE (2001b). HEC-HMS Hydrologic Modeling System. Release Notes. Version 2.1.2. Obtido no endereço <u>www.usace.army.mil</u>, em agosto de 2001.

- Varella, R. F. (1998). Simulação Matemática do Processo de Transformação Chuva em Vazão: Estudo do Modelo TOPMODEL. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF.
- WMO. (1977). Hydrologic Model of the Upper Nile Basin. Vol. 2A. WMO. Geneva.
- Wood, E. F.; Sivapalan, M.; Beven, K. e Band, L. (1988). "Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling." *Journal of Hydrology.* **102**, 29-47.
- Zhao, R. J. (1977). *Flood forecasting method for humid regions of China*. East China College of Hydraulic Engineering, Nanking. China.

APÊNDICE A

Curvas de Chuvas Adimensionais



Figura A.1 - Curvas Adimensionais

APÊNDICE B

Isoietas do Evento 3 para a Bacia Hidrográfica Corumbá até a Seção da Barragem

Todos os dados de Precipitação estão em mm (milímetros) e coordenadas planas em m (metros)



Figura B.1 – Isoietas para o Evento 3



Figura B.1 – Isoietas para o Evento 3 (cont.)



Figura B.1 – Isoietas para o Evento 3 (cont.)



Figura B.1 – Isoietas para o Evento 3 (cont.)


Figura B.1 – Isoietas para o Evento 3 (cont.)

127

Livros Grátis

(<u>http://www.livrosgratis.com.br</u>)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração Baixar livros de Agronomia Baixar livros de Arquitetura Baixar livros de Artes Baixar livros de Astronomia Baixar livros de Biologia Geral Baixar livros de Ciência da Computação Baixar livros de Ciência da Informação Baixar livros de Ciência Política Baixar livros de Ciências da Saúde Baixar livros de Comunicação Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE Baixar livros de Defesa civil Baixar livros de Direito Baixar livros de Direitos humanos Baixar livros de Economia Baixar livros de Economia Doméstica Baixar livros de Educação Baixar livros de Educação - Trânsito Baixar livros de Educação Física Baixar livros de Engenharia Aeroespacial Baixar livros de Farmácia Baixar livros de Filosofia Baixar livros de Física Baixar livros de Geociências Baixar livros de Geografia Baixar livros de História Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura Baixar livros de Literatura de Cordel Baixar livros de Literatura Infantil Baixar livros de Matemática Baixar livros de Medicina Baixar livros de Medicina Veterinária Baixar livros de Meio Ambiente Baixar livros de Meteorologia Baixar Monografias e TCC Baixar livros Multidisciplinar Baixar livros de Música Baixar livros de Psicologia Baixar livros de Química Baixar livros de Saúde Coletiva Baixar livros de Servico Social Baixar livros de Sociologia Baixar livros de Teologia Baixar livros de Trabalho Baixar livros de Turismo