

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DO MEIO
AMBIENTE**

CLÁUDIO RODRIGUES DA SILVA

O EFEITO DA ESCALA ESPACIAL NO MODELAMENTO HIDROLÓGICO

**Goiânia
2009**

CLÁUDIO RODRIGUES DA SILVA

O EFEITO DA ESCALA ESPACIAL NO MODELAMENTO HIDROLÓGICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga.

**Goiânia
2009**

Ficha Catalográfica

S586e

Silva, Cláudio Rodrigues da.

O efeito da escala espacial no modelamento hidrológico. / por Cláudio Rodrigues da Silva. -- 2009.

95 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia, 2009.

“Orientação: Professor Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga.”

Bibliografia.

Possui figuras.

1. Modelagem hidrológica – bacias hidrográficas. I. Silva, Cláudio Rodrigues da. II. Universidade Federal de Goiás. III. Título.

CDU: 556.18:628

Catálogo Biblioteca do Centro Universitário de Goiás

CLÁUDIO RODRIGUES DA SILVA

O EFEITO DA ESCALA ESPACIAL NO MODELAMENTO HIDROLÓGICO

Dissertação defendida no Curso de Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do grau de Mestre, aprovada em 28 de agosto de 2009, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga – UFG
Presidente da Banca

Prof. Dr. Nestor Aldo Campagna - UnB

Prof. Dr. Leonardo Barra Santana de Souza - UFG

Dedico à minha família.

AGRADECIMENTOS

À família por compreender a falta de tempo.

Ao professor orientador Klebber Teodomiro Martins Formiga, pela oportunidade e ensinamentos.

Aos professores das disciplinas cursadas e pelas sugestões, Eduardo, Lilian, José Vicente, Edgar, Leonardo e Orlene.

Aos colegas de mestrado, em especial Clarisse e Roberta, pela maior convivência e amizade.

À Deuzélia pelas “orientações” sobre os procedimentos administrativos.

Aos demais professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente (PPGEMA), que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos colegas da Superintendência de Geologia e Mineração, em especial, à Maria Luiza Osório Moreira e Levindo Cardoso Medeiros pelo apoio.

RESUMO

Este estudo apresenta os resultados da análise do efeito da escala espacial na modelagem hidrológica. Para isto foram delimitadas bacias hidrográficas em três diferentes escalas espaciais: pequena (Bacia do Córrego Capão da Onça), média (Bacia do Rio Areias) e grande (Bacia do Rio Corrente), em Goiás e no Distrito Federal. As características fisiográficas, área, comprimento do rio principal e desnível do rio foram obtidas a partir de bases cartográficas digitais nas três escalas disponíveis, 1:1.000.000, 1:250.000 e 1:100.000, utilizando-se ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas. Os dados físicos das bacias foram utilizados como dados de entrada no modelo hidrológico – HEC HMS versão 3.3 - desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center of the U.S. Army Corps of Engineers*, projetado para simular o processo chuva-vazão em bacias hidrográficas. Após os procedimentos de simulação e de calibração do modelo, o estudo mostra que dados obtidos a partir de diferentes escalas cartográficas pouco influenciam o resultado final da modelagem nas três escalas espaciais analisadas. Foi evidenciado, também, que a modelagem apresentou melhores resultados na média escala com um melhor ajuste entre as hidrógrafas observadas e calculadas.

Palavras – chave: modelagem hidrológica, escalas cartográficas, bacias hidrográficas.

ABSTRACT

This study presents the results of the analysis of the effect of the spatial scale in the hydrologic modeling. Nine watersheds were delimited in three different spatial scales: small (Capão da Onça River Basin), middle (Areias River Basin) and large (Corrente River Basin). The physiographic characteristics, area, length of the main river and slope of the river were obtained from digital cartographic maps in the three available scales for Goiás, 1:1.000.000, 1:250.000 and 1:100.000, using tools of Geographic Information Systems. The physical data of the basins were used as input in the hydrologic model - HEC HMS version 3.3 - developed by Hydrologic Engineering Center of the U.S. Army Corps of Engineers, projected to simulate the precipitation-runoff process in a watershed. After the simulation procedures and calibration of the model, the study shows that data obtained from different cartographic scales little influence the final result of the modeling in the three analyzed spatial scales. It was also evidenced that the modeling presented better results in the middle scale with a better adjustment between the observed and calculated hydrographs.

Keywords - hydrologic modeling, spatial scales, watersheds.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS	15
2.2 O DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS	16
2.3 CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS	21
2.4 DEFINIÇÕES E CONCEITOS RELACIONADOS AO MODELAMENTO HIDROLÓGICO	23
2.5 A QUESTÃO DA ESCALA ESPACIAL	24
2.5.1 <i>Definições</i>	24
2.5.2 <i>Escalas e modelos hidrológicos</i>	25
2.5.3 <i>A escala espacial e os modelos distribuídos</i>	30
2.6 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	32
3 METODOLOGIA	36
3.1 MATERIAIS	36
3.1.1 <i>Dados e informações cartográficas</i>	36
3.1.2 <i>Dados e informações hidrometeorológicas</i>	36
3.1.3 <i>Dados e informações temáticas</i>	36
3.1.4 <i>Programas</i>	37
3.2 MÉTODOS	41
3.2.1 <i>Aquisição dos dados</i>	42
3.2.1.1 <i>Obtenção dos dados hidrológicos</i>	42
3.2.1.2 <i>Obtenção das bases cartográficas</i>	43
3.2.1.3 <i>Obtenção dos dados e informações temáticas</i>	44
3.2.2 <i>Análise e tratamento dos dados</i>	45
3.2.3 <i>Definição e delimitação das bacias hidrográficas</i>	45
3.2.3.1 <i>Definição das bacias hidrográficas</i>	45
3.2.3.2 <i>Bacias hidrográficas delimitadas</i>	46
3.2.4 <i>Caracterização física das bacias</i>	56
3.2.5 <i>Modelo hidrológico</i>	57
3.2.5.1 <i>Simulação</i>	57
3.2.5.2 <i>Calibração</i>	59
3.2.6 <i>Análise e apresentação dos resultados</i>	60
4 RESULTADOS	61
4.1 PARÂMETROS	61

4.1.1 <i>Considerações</i>	61
4.2 SIMULAÇÕES - PEQUENA ESCALA – BACIA DO CÓRREGO CAPÃO DA ONÇA	62
4.2.1 <i>Informações hidrometeorológicas</i>	62
4.2.2 <i>Simulações</i>	65
4.2.3 <i>Calibração</i>	66
4.2.4 <i>Considerações</i>	69
4.3 SIMULAÇÃO - MÉDIA ESCALA – BACIA DO RIO AREIAS	70
4.3.1 <i>Informações hidrometeorológicas</i>	70
4.3.2 <i>Simulação</i>	74
4.3.3 <i>Calibração</i>	75
4.3.4 <i>Considerações</i>	78
4.4 SIMULAÇÃO – GRANDE ESCALA – BACIA DO RIO CORRENTE	79
4.4.1 <i>Informações hidrometeorológicas</i>	79
4.4.2 <i>Simulação</i>	83
4.4.3 <i>Calibração</i>	84
4.4.4 <i>Considerações</i>	87
5 CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Bacia hidrográfica como um sistema natural.	15
Figura 2.2 – Distribuição do fluxo da água em vertentes.	19
Figura 2.3 - Mecanismos de geração de escoamento em nível concentrado segundo Beven (1986), <i>apud</i> Mendiondo e Tucci (1997b).	20
Figura 2.4 – Informações hidrológicas geradas a partir de Modelo Digital do Terreno (a) e ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (b, c e d).	22
Figura 2.5 – Etapas de transferência de informações entre escalas (<i>scaling</i>).	26
Figura 2.6 – Escalas do espaço e tempo no ciclo hidrológico.	28
Figura 2.7 - A forma da bacia influencia a forma de sua hidrógrafa.	33
Figura 2.8 – Representação gráfica do relevo de uma bacia.	34
Figura 3.1 – Tela do HEC HMS, versão 3.3, apresentando a representação física da bacia analisada.	38
Figura 3.2 – Fluxograma simplificado do desenvolvimento deste estudo.	42
Figura 3.3 – Localização das bacias hidrográficas analisadas.	47
Figura 3.4 – Bacia em Pequena Escala (Rio Descoberto/Córrego Capão da Onça). Delimitada na escala 1:1.000.000.	48
Figura 3.5 – Bacia em Pequena Escala (Córrego Capão da Onça). Delimitada na escala 1:250.000.	49
Figura 3.6 – Bacia em Pequena Escala (Córrego Capão da Onça). Delimitada na escala 1:100.000.	50
Figura 3.7 – Bacia em Média Escala (Rio Areias). Delimitada na escala 1:1.000.000.	51
Figura 3.8 – Bacia em Média Escala (Rio Areias). Delimitada na escala 1:250.000.	52
Figura 3.9 – Bacia em Média Escala (Rio Areias). Delimitada na escala 1:100.000.	53
Figura 3.10 – Bacia em Grande Escala (Rio Areias). Delimitada na escala 1:1.000.000.	54
Figura 3.11 – Bacia em Grande Escala (Rio Areias). Delimitada na escala 1:250.000.	55
Figura 3.12 – Bacia em Grande Escala (Rio Areias). Delimitada na escala 1:100.000.	56
Figura 3.13 – Textura de solos de acordo com o percentual de argila.	57
Figura 4.1 – Precipitação – valores observados na estação E.T.A Brazlândia.	63
Figura 4.2 – Gráfico de dispersão cota x vazão e R^2 para a estação Capão da Onça.	64
Figura 4.3 – Vazão observada na estação Capão da Onça.	64
Figura 4.4 - Comparação das hidrógrafas obtidas por simulação com a vazão observada nas diferentes escalas espaciais. Bacia em pequena escala.	68
Figura 4.5 - Comparação das hidrógrafas obtidas por calibração com a vazão observada nas diferentes escalas espaciais. Bacia em pequena escala.	68
Figura 4.6 – Polígonos de <i>Thiessen</i> utilizados no cálculo da precipitação. Informações cartográficas na escala 1:1.000.000.	71
Figura 4.7 – Precipitação média na Bacia do Rio Areias. Janeiro de 2005.	72
Figura 4.8 – Precipitação por estação pluviométrica. Bacia do Rio Areias.	72
Figura 4.9– Gráfico de dispersão cota x vazão e R^2 para a estação Fazenda São Bento.	73
Figura 4.10 – Vazões observadas. Estação fluviométrica Fazenda São Bento.	73
Figura 4.11 - Comparação das hidrógrafas obtidas por simulação nas diferentes escalas espaciais com a vazão observada. Bacia em média escala.	77

Figura 4.12 - Comparação das hidrógrafas obtidas posterior a calibração nas diferentes escalas espaciais com a vazão observada. Bacia em média escala.	77
Figura 4.13 – Polígonos de <i>Thiessen</i> e estações pluviométricas utilizadas no cálculo da precipitação média na bacia do Rio Corrente.	80
Figura 4.14 – Precipitação média na Bacia do Rio Corrente.	81
Figura 4.15 – Precipitação por estação fluviométrica – Bacia do Rio Corrente.	81
Figura 4.16 – Gráfico de dispersão cota x vazão e R^2 calculada para a estação Ponte do Rio Corrente.	82
Figura 4.17 – Vazão observada na estação da Ponte do Rio Corrente.	82
Figura 4.18 - Comparação das hidrógrafas obtidas por simulação nas diferentes escalas espaciais com a vazão observada. Bacia em grande escala.	86
Figura 4.19 - Comparação das hidrógrafas obtidas posteriormente à calibração nas diferentes escalas espaciais com a vazão observada. Bacia em grande escala.	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Estações hidrometeorológicas utilizadas.	43
Quadro 3.2 - Escalas dos processos hidrológicos, segundo Becker, 1992.	45
Quadro 3.3 – Áreas de bacias a serem delimitadas.	46
Quadro 3.4 – Áreas de bacias delimitadas de acordo com as escalas de trabalho.	47
Quadro 4.1 – Características fisiográficas das bacias nas diferentes escalas cartográficas.	61
Quadro 4.2 – Precipitação – valores observados na estação E.T.A Brazlândia.	63
Quadro 4.3 – Valores das vazões observadas na Estação Capão da Onça.	65
Quadro 4.4 - Parâmetros utilizados na simulação para pequena escala.	66
Quadro 4.5 – Comparação de resultados observados e simulados.	66
Quadro 4.6 – Resultados da Função Objetivo por escala cartográfica – Pequena Escala.	67
Quadro 4.7 – Parâmetros calibrados por escala cartográfica – Pequena Escala.	67
Quadro 4.8 – Comparação de resultados entre escalas cartográficas – Pequena Escala.	68
Quadro 4.9 – Relação área total e áreas de influência de cada estação pluviométrica. Escala cartográfica de referência 1:1.000.000.	71
Quadro 4.10 – Precipitação média calculada. Bacia do Rio Areias. Janeiro de 2005.	71
Quadro 4.11 – Valores de vazões observadas. Estação Fazenda São Bento.	74
Quadro 4.12 - Parâmetros de simulação para média escala.	75
Quadro 4.13 – Comparação de resultados observados e simulados.	75
Quadro 4.14 – Resultados da Função Objetivo por escala cartográfica – Média Escala.	76
Quadro 4.15 – Parâmetros calibrados por escala cartográfica – Média Escala.	76
Quadro 4.16 – Comparação de resultados entre escalas cartográficas – Média Escala.	77
Quadro 4.17 – Área de influência das estações pluviométricas utilizadas.	79
Quadro 4.18 – Precipitação média na bacia.	80
Quadro 4.19 – Vazões observadas.	83
Quadro 4.20 – Parâmetros de simulação para Bacia do Rio Corrente – Grande Escala.	84
Quadro 4.21 – Comparação de resultados observados e simulados.	84
Quadro 4.22 – Resultados da Função Objetivo por escala cartográfica – Grande Escala.	85
Quadro 4.23 – Parâmetros calibrados por escala cartográfica – Grande Escala.	85
Quadro 4.24 – Comparação de resultados entre escalas cartográficas – Grande Escala.	86

1 INTRODUÇÃO

Com a realização de estudos hidrológicos procura-se obter conhecimento sobre o comportamento hídrico de uma bacia hidrográfica, buscando o entendimento do movimento da água e os impactos associados às mudanças no uso da terra, tanto sob o ponto de vista quantitativo, como qualitativo.

Devido à complexidade dos processos envolvidos, torna-se impossível representar perfeitamente as relações e os fenômenos que ocorrem no interior de uma bacia hidrográfica. Apesar disso, a utilização de modelos hidrológicos representa uma ferramenta extremamente útil na simulação do comportamento da bacia.

O entendimento da escala nas quais os processos atuam ou em que são representados é uma questão importante em estudos hidrológicos. Os processos devem ser analisados de acordo com a dinâmica de sua ocorrência e sobre as características do sistema envolvido. Essas características sofrem influência da escala em que o processo opera, é medido ou testado.

Tal abordagem justifica o objetivo de se conhecer a forma pela qual as variáveis e os parâmetros são representados em diferentes escalas espaciais e como pode ser previsto o comportamento de um sistema hídrico em relação a estas diferenças.

O tema desenvolvido nesta pesquisa refere-se aos efeitos da variação da escala espacial na modelagem hidrológica. Entre os aspectos analisados está a existência ou não de influência e, quando existir, em que proporção esta afeta o resultado final.

Escala significa a amplitude em que os elementos poderão ser representados, ou não representados, na representação de um objeto, fenômeno ou processo. É definida como a dimensão de um processo ou fenômeno sob o ponto de vista de tempo ou de espaço. Especificamente, entende-se como escala espacial a dimensão no espaço de um determinado fenômeno ou processo.

Existem três aspectos importantes relacionados que são considerados quando da modelagem hidrológica. O primeiro aspecto refere-se ao fato de que todo fenômeno natural tem sua escala distintiva (ou amplitude de variação) que caracteriza seu comportamento (por exemplo, a escala espacial). O segundo aspecto é o “efeito escala” que se refere a mudanças nos resultados a partir da mudança na escala em que o fenômeno ou o processo é estudado, a denominada escala de observação (objeto desta

pesquisa). O terceiro é relativo aos procedimentos e consequências da transferência de informações entre escalas, denominado *scaling* (WU e LI, 2006).

Para se alcançar o objetivo proposto, ou seja, a análise da representação de variáveis e parâmetros em diferentes escalas e seus efeitos na modelagem foram utilizadas diferentes escalas espaciais, diferentes métodos de obtenção e diferentes formatos de dados e informações que, em etapa subsequente, foram aplicados ao modelo hidrológico, verificando-se o comportamento do sistema (as bacias hidrográficas).

Na execução dessa pesquisa foram utilizadas ferramentas de sistemas de informações geográficas e algumas de suas extensões ou complementos, produzidas ou não, especificamente para utilização em estudos hidrológicos, cujos resultados serviram, também, como dados de entrada para aplicação do modelo hidrológico.

Mendiondo e Tucci (1997) afirmam que a representação dos processos hidrológicos em diferentes escalas tem esbarrado primeiramente na heterogeneidade espacial dos sistemas hídricos e na incerteza com quais os parâmetros e processos são medidos em diferentes escalas. É essa heterogeneidade e principalmente as incertezas associadas à medição de parâmetros e fenômenos o núcleo central do estudo, na tentativa de se obter uma visão da resposta do sistema hídrico às mudanças de escala, tentando-se quantificar a influência, quando existente.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é analisar o efeito da variação da escala espacial em um modelo chuva – vazão, a partir de simulações de eventos chuvosos, em bacias hidrográficas do Estado de Goiás e do Distrito Federal.

Relacionado a este objetivo principal, busca-se também:

- Analisar o efeito da variação de parâmetros associada à diferenças de escalas cartográficas na modelagem hidrológica,
- Identificar parâmetros sensíveis à mudanças de escalas;
- Analisar os resultados da modelagem a partir de bacias hidrográficas de diferentes tamanhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

Tucci (1998) define um modelo como uma representação de um objeto ou de um sistema, em uma linguagem de fácil acesso e utilização, objetivando entendê-lo e para a obtenção de respostas para diferentes condições iniciais (diferentes entradas). Um exemplo de sistema (natural) é a bacia hidrográfica (Figura 2.1), devendo-se buscar o entendimento de seu comportamento e dos fenômenos e processos envolvidos, visando fundamentalmente o uso racional de seus recursos.

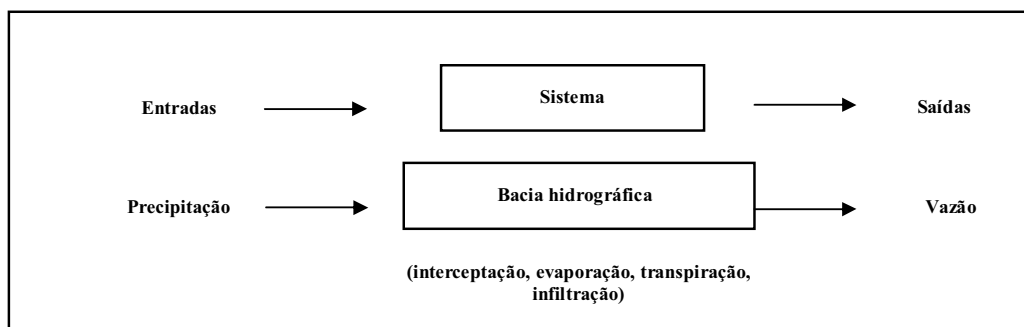


Figura 2.1 – Bacia hidrográfica como um sistema natural.

Por sua vez, um modelo hidrológico é definido no Glossário Internacional de Hidrologia (UNESCO-OMM,1992) como “uma representação matemática simplificada de parte ou da globalidade dos processos do ciclo hidrológico por meio de um conjunto de conceitos hidrológicos expressos em linguagem matemática”.

Análogo a este conceito, no Glossário de Termos Hidrológicos da Agência Nacional de Águas (2002) está definido que um modelo hidrológico é:

Uma representação matemática simplificada de alguns ou de todos os processos do ciclo hidrológico por um conjunto de conceitos hidrológicos expressos em linguagem matemática e interligados em sequências temporais e espaciais correspondentes às observadas na natureza. Os modelos analógicos conceptuais são utilizados para simular o comportamento de uma bacia.

Para Maidment (1993), um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes em alguma parte da superfície do solo ou subsolo, enquanto que para Rennó e Soares (2000), significa uma representação simplificada da natureza, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade.

Destes conceitos extrai-se, então, que se trata da representação de fenômenos inerentes ao ciclo hidrológico com a utilização de ferramentas matemáticas e computacionais, objetivando simular numericamente um ou mais processos que ocorrem em uma determinada bacia hidrográfica.

Os modelos podem ser utilizados para a obtenção de uma resposta específica para um problema específico ou para entendimento dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica (BLÖSCHL; SIVAPALAN, 1995). Para se alcançar tais objetivos, os modelos hidrológicos evoluíram do ponto de vista histórico desde o fim do século XIX, até os dias de hoje, sempre na procura do melhor entendimento possível do comportamento do sistema hídrico.

2.2 O DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Cunha (2004) afirma que nas primeiras décadas do século XIX a Hidrologia se apresentava como uma disciplina meramente descritiva, sem preocupação com aspectos quantitativos. A partir da construção de grandes obras de Engenharia, criou-se a necessidade de se quantificar as variáveis envolvidas e, na década de 40, do século XX, surgiram os conceitos que proporcionaram a elaboração dos modelos hidrológicos, com suas consequentes estimativas, simulações e previsões.

Em um momento inicial o tratamento para os componentes do ciclo hidrológico se deu de forma isolada. Posteriormente, com os avanços computacionais, foi possível integrar os componentes do ciclo, na tentativa de simulação do comportamento da bacia como um todo.

Segundo Todini (2007), a história do modelamento hidrológico vem desde o empírico Método Racional até os recentes modelos fisicamente distribuídos. Para este autor, o método proposto por Mulvaney na metade do século XIX, representa a exposição do conceito de tempo de concentração e seu relacionamento com o

escoamento superficial máximo. É largamente utilizado na determinação da vazão de pequenas bacias hidrográficas. Tal método estima a vazão de pico, mas não o volume e a distribuição espacial das vazões, considerando o escoamento superficial, a intensidade da chuva e a área, ou região, da bacia estudada, associados a um coeficiente de deflúvio relacionado à natureza da superfície de escoamento.

Posteriormente, ainda segundo Todini (2007), foi apresentado por L. K. Sherman em 1932 o conceito de “Hidrograma Unitário”. Esta técnica possibilita a obtenção do hidrograma a partir de dados de precipitação coletados a intervalos constantes. Para Rennó e Soares (2000), o hidrograma unitário de cada bacia representa a capacidade média da bacia em drenar a água da chuva. Afirmam também que tal método “é útil (como ferramenta de transformação de dados de chuva em vazão) por sua simplicidade de conceito sendo usado universalmente em projetos de engenharia, na previsão de cheias e no mapeamento de várzeas”.

O hidrograma unitário parte de três premissas iniciais:

- para chuvas de igual duração, o tempo de duração do escoamento superficial correspondente é igual;
- duas chuvas de mesma duração, mas com volumes de escoamento diferentes, resultam em hidrógrafas cujas ordenadas são proporcionais aos respectivos volumes escoados e;
- considera-se que as precipitações anteriores não influenciam a distribuição no tempo do escoamento superficial de uma dada chuva.

De posse do hidrograma unitário, para uma dada precipitação de intensidade constante, com duração igual ao hidrograma unitário, obtêm-se os valores do escoamento superficial na bacia. Este conceito dominou a Hidrologia por mais de 25 anos, sendo ainda muito utilizado (FEDAC, 1999).

Durante os anos 50 do século passado, hidrólogos começaram a desenvolver os modelos conceituais que procuravam descrever todos os processos envolvidos em determinado fenômeno estudado. Os modelos conceituais fazem uso de equações empíricas que descrevem o sistema hídrico tendo em vista as leis físicas (RENNÓ, 2004).

Com o objetivo de se obter uma melhor interpretação física da resposta da bacia, nos anos 60 houve o desenvolvimento de modelos nos quais os componentes individuais do ciclo hidrológico eram representados por elementos conceituais

interconectados, cada um representando, dentro do modelo, a resposta de um subsistema particular.

Um dos primeiros modelos conceituais desenvolvidos foi o *Streamflow Synthesis And Reservoir Regulation* (SSARR), desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos, em 1958, com o objetivo de simular o processo hidrológico e a regularização da vazão de um determinado rio, utilizando funções a serem ajustadas, possibilitando uma maior autonomia para o usuário.

Outro exemplo é o *Stanford Watershed Model* (SWM) desenvolvido na Universidade de *Stanford*, Estados Unidos, modelo conceitual onde os fenômenos são representados por formulações baseadas em parâmetros empíricos que possuem uma relação qualitativa com as características físicas da bacia, retratando basicamente a continuidade de volume e armazenamento. O SWM foi o primeiro a contar com sistemas computacionais para descrever quantitativamente os processos hidrológicos, que ocorrem em nível de bacia hidrográfica, sendo por isso, considerado o 1º modelo hidrológico completo (XAVIER, 2002).

O SWM foi desenvolvido levando em consideração uma coleção de conceitos hidrológicos quantitativos, representados matematicamente. Considera que se os conceitos estão fisicamente bem estabelecidos e estão matematicamente bem representados, e se cada componente físico da bacia está igualmente bem representado, a estrutura do modelo pode ser única e todos os processos na bacia podem ser simulados. O referido modelo deu origem a vários outros que se diferenciavam pelo maior ou menor detalhamento na parte do ciclo hidrológico que queriam representar e por equações (empíricas) alternativas (TUCCI, 1998).

Como uma nova etapa na evolução dos modelos, Fedac (1999), afirma que no fim dos anos 60, o *Hydrologic Engineering Center of US Army Corps of Enginners* desenvolveu o HEC-1, modelo projetado para simular a resposta do escoamento superficial a partir de uma determinada precipitação, pela representação desta bacia como um sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos.

O modelo concentrado surgiu no final dos anos 70. Tal modelo foi estruturado, baseado na idéia que o processo chuva – vazão é dominado principalmente pela dinâmica de áreas saturadas, partindo do princípio de que toda precipitação infiltra no solo e que o escoamento superficial seria originado pela saturação das camadas superiores do solo (Figuras 2.2 e 2.3). O núcleo central destes modelos seria a

representação da relação entre o volume total de água armazenada no solo e a extensão das áreas saturadas (TODINI, 2007).

O mecanismo proposto por Horton em 1933 e sua modificação por Betson considera a contribuição na produção de escoamento de toda bacia, não considerando as camadas saturadas de solo. De outro lado, Hewlett e Hibbert em 1967 e Weyman (1970) qualificam a produção do escoamento através da passagem da água da chuva através do solo da vertente, minimizando a ocorrência do escoamento superficial. A diferença entre Hewlett e Weyman é que no primeiro a dinâmica de saturação do solo é função da dinâmica do nível freático e no segundo depende da anisotropia das camadas superficiais de solo.

Um tipo intermediário, o mecanismo de Dunne em 1983, é uma composição entre os modelos anteriores. Combina os processos que dominam a geração do escoamento tanto na superfície como no subsolo (MENDIONDO; TUCCI, 1987b).

Fedac (1999), afirma que posteriormente foi lançado um modelo físico distribuído o TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979), baseado na distribuição de um índice topográfico. Originou uma nova relação entre o volume de água armazenado no solo e a extensão das áreas saturadas, com base em parâmetros fisicamente significativos. Tal modelo considera a topografia como participante direto da formação do escoamento superficial.

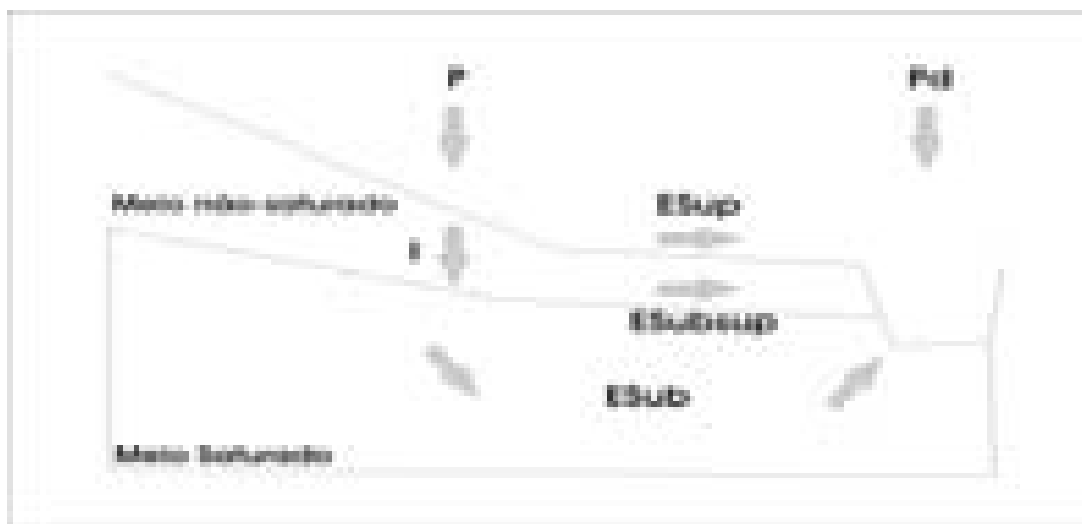


Figura 2.2 – Distribuição do fluxo da água em vertentes. Precipitação (P), Infiltração (I), Escoamento Subterrâneo (ESub), Escoamento Subsuperficial (Esubsup), Escoamento Superficial (ESup) e Precipitação direta sobre o rio (Pd). Adaptado de Mendiondo e Tucci (1997b).

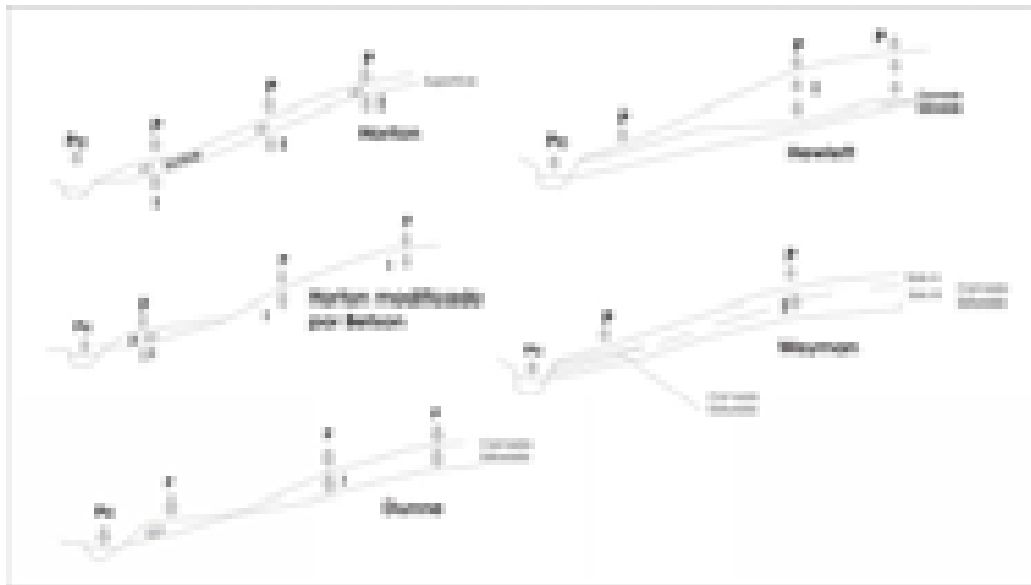


Figura 2.3 – Mecanismos de geração de escoamento em nível concentrado segundo Beven (1986), *apud* Mendiondo e Tucci (1997b). P = precipitação, I = infiltração, Pc = precipitação direta sobre o rio.

Outros modelos fisicamente distribuídos foram desenvolvidos e, com a atual disponibilidade de informações e dados espacialmente distribuídos, tais como, tipos e usos do solo, geologia, relevo, obtidos a partir de radares meteorológicos, sistemas de informações geográficas e outras formas de sensoriamento remoto, existe maior facilidade de produção e utilização destes modelos em que o componente físico é considerado.

Feyen et al. (2000), concordam e afirmam que em modelos fisicamente distribuídos, os vários componentes do ciclo hidrológico são integrados e os processos de transportes são representados por equações diferenciais parciais de conservação de massa, energia e movimento. A natureza distribuída destes modelos implica na necessidade de uma boa disponibilidade de dados e que, a ausência deles, ou a baixa qualidade pode limitar sua aplicação em bacias de maior porte.

As características físicas da bacia hidrológica são variáveis essencialmente espaciais. Em modelos distribuídos, a variabilidade espacial do processo, valores de entrada, limites e condições iniciais são considerados, assim como, a hidrogeologia da bacia com seus processos em profundidade. Entretanto, ressalta-se a indissociável necessidade de grande quantidade de dados necessários para a aplicação deste tipo de modelos.

Com base no exposto anteriormente, dois momentos marcaram o desenvolvimento de modelos hidrológicos. O primeiro foi o da Teoria do Hidrograma Unitário apresentada por Sherman em 1932 e o segundo foi o Modelo *Stanford (WSM)* de 1966, considerado o primeiro modelo hidrológico completo, com a utilização de ferramentas computacionais, que deu origem a uma série de modelos conceituais posteriores (XAVIER, 2002).

O panorama atual aponta para uma integração cada vez maior de informações geradas por novas tecnologias aos modelos hidrológicos, como por exemplo, dados gerados por sensoriamento remoto (imagens de satélites, radares e fotografias aéreas), sistemas de informações geográficas (cartografia e banco de dados associados), sistemas de gerenciamento de dados e sistemas especialistas (CUNHA, 2004), Figura 2.4.

Como exemplo pode-se citar a tendência do uso generalizado de representações digitais do terreno, (Figura 2.4a). No caso dos modelos distribuídos, a utilização destas ferramentas tem buscado melhorar a representatividade espacial e temporal do comportamento de diferentes regiões de uma bacia hidrográfica (figuras 2.4 b, c e d) sujeitas, por exemplo, a diferentes tipos de ações impostas pelo desenvolvimento moderno da sociedade (TUCCI, 1998).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Em Cunha (2004) e Rennó e Soares (2000) são citados vários tipos de modelos matemáticos utilizados nas ciências hidrológicas desenvolvidos principalmente nos últimos trinta anos. Tais autores apresentam ainda, fundamentações básicas:

- modelos estocásticos ou determinísticos: modelos estocásticos são aqueles em que pelo menos uma variável envolvida tem caráter aleatório descrita por procedimentos probabilísticos, os determinísticos são aqueles para o qual um determinado valor de entrada sempre resultará em um mesmo valor de saída, considerando a constância no estado inicial do sistema.

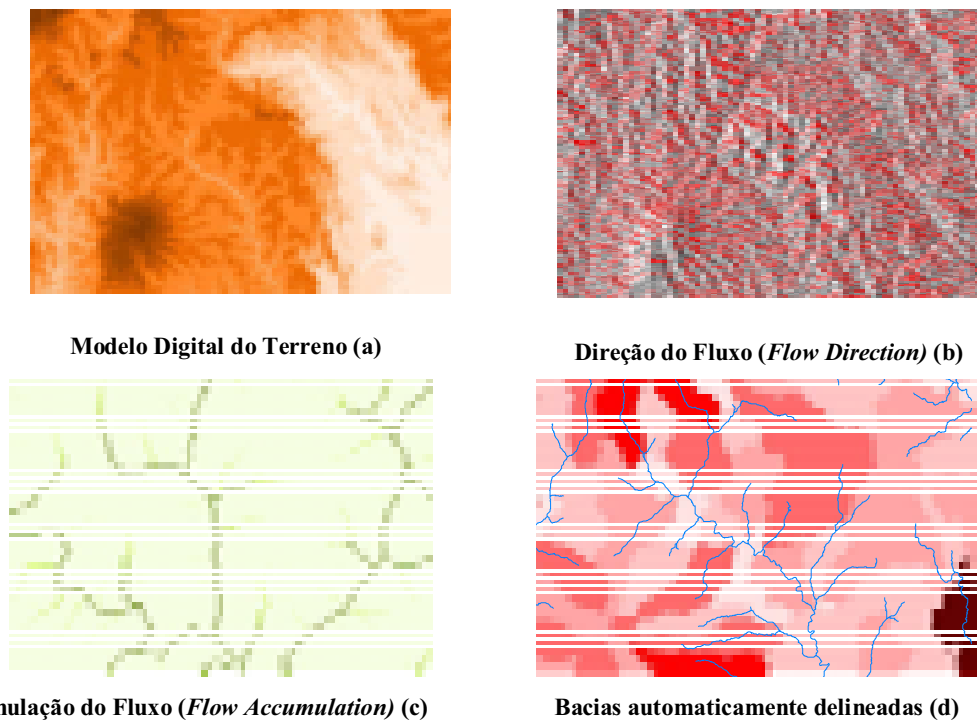


Figura 2.4 – Informações hidrológicas geradas a partir de Modelo Digital do Terreno (a) e resultados obtidos a partir de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (b, c e d).

- Modelos conceituais ou empíricos: os modelos conceituais baseiam-se na representação dos processos físicos que envolvem o fenômeno estudado. Os empíricos são construídos em bases de observações de entradas e sua transformação em saídas, sem explicar em maior profundidade os processos envolvidos nesta conversão;
- modelos concentrados ou distribuídos: nos modelos concentrados considera-se que as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área. Representariam valores médios para toda a bacia. Nos modelos distribuídos, é considerada a variabilidade espacial (geográfica) das características físicas da bacia hidrográfica;
- modelos contínuos ou discretos: os discretos objetivam modelar períodos isolados da série, normalmente buscando representar eventos de cheia ou recessão. Modelos contínuos buscam representar longos períodos da série, muitas vezes contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes;
- modelos estáticos ou dinâmicos: estáticos são modelos em que a entrada produz um resultado oriundo da resolução da equação do modelo em um único

passo e dinâmicos quando utiliza o resultado de uma interação como entrada para uma próxima interação.

2.4 DEFINIÇÕES E CONCEITOS RELACIONADOS AO MODELAMENTO HIDROLÓGICO

Um conjunto de valores representativos do sistema hídrico é utilizado no modelamento hidrológico. Estes valores podem descrever quantitativamente um fenômeno, caracterizar o sistema estudado ou caracterizar determinadas condições deste sistema (bacia hidrográfica):

- variável – valor que descreve quantitativamente um fenômeno, e que varia no tempo e espaço;
- parâmetro – valor que caracteriza o sistema;
- condições de contorno - valores de entrada do sistema. As forças que atuam no sistema hidrológico e causam modificações;
- condições iniciais - descrição da variação de um componente do sistema hidrológico (a partir de equações diferenciais).
- fenômeno - processo físico, que produz alteração de estado no sistema. Para Tucci (1998), precipitação, evaporação e infiltração são exemplos para um sistema hidrológico;
- simulação - processo de utilização do modelo, entendendo-se modelo como uma simples ferramenta para se atingir um objetivo específico.

Como exemplo de variáveis Tucci (1998) cita os valores de vazão que descrevem quantitativamente o escoamento em um rio. Pode-se acrescentar de forma complementar, valores relativos à precipitação, evaporação e infiltração e como exemplo de parâmetros, a rugosidade de uma seção do rio, a área da bacia, a porcentagem de áreas impermeáveis e permeáveis e a declividade.

Variáveis de estado são os termos das equações do modelo que representam o estado do sistema hidrológico em um determinado tempo e local. Os parâmetros seriam valores numéricos das propriedades do sistema no “mundo real”. Eles controlam o

relacionamento das entradas do sistema com as respostas obtidas como saídas (HEC, 2003).

2.5 A QUESTÃO DA ESCALA ESPACIAL

Uma das questões-chave dos estudos hidrológicos tem sido o entendimento da escala nas quais os processos hidrológicos atuam. Para Mendiondo e Tucci (1997a) o ciclo hidrológico deve ser analisado, dentro de seus componentes, de acordo com a dinâmica de sua ocorrência e sobre as características do sistema envolvido. A dinâmica envolve as mudanças das variáveis no tempo e no espaço. Para estes autores o problema básico seria conhecer como variáveis e parâmetros são representados em escalas diferentes e como estabelecer as funções de transferência entre estas escalas.

2.5.1 Definições

Para Bloschl e Sivapalan (1995) escala refere-se às características de tempo e amplitude de um processo, observação ou modelo. Wu e Li (2006) afirmam que escala refere-se à dimensão espacial ou temporal de um fenômeno e denominam a transferência de informações entre diferentes escalas de *scaling*.

Como componentes da escala, Wu e Li (2006) citam:

- *grain*: resolução ou unidade mínima de mapeamento;
- *extend*: área de estudo ou tempo de duração, escala geográfica;
- *coverage*: densidade de amostragem;
- *spacing*: intervalo de amostragem;
- *cartographic scale*: escala de mapas.

Como dimensões de escala:

- tempo;
- espaço;
- nível organizacional.

E como tipos de escalas:

- escala intrínseca: escala na qual o processo opera;
- escala de observação: escala de medição ou amostragem;
- escala experimental: escala dos experimentos;
- escala de análise/modelamento: escala nas quais são realizadas análises ou modelamentos.

2.5.2 Escalas e modelos hidrológicos

Blöschl e Sivapalan (1995) afirmam que processos hidrológicos ocorrem em uma ampla variedade de escalas, desde o fluxo insaturado em um perfil de solo de 1 metro de espessura a inundações em rios com milhões de quilômetros quadrados de área drenada; de rápidas enchentes de alguns minutos de duração ao fluxo em aquíferos ao longo de centenas de anos.

A geração do escoamento superficial associado com a intensidade da chuva que excede a capacidade de infiltração é um fenômeno pontual e pode ser representado em uma escala de pequena amplitude. O escoamento gerado pelo excesso de água causado por saturação do solo necessita certa área mínima para ser representativo, com esta representação em escala mais ampla. O processo de transferência de informações de uma determinada escala para outra maior é definido, por Blöschl e Sivapalan (1995) como *upscaling* e o contrário como *downscaling*.

Upscaling compreende duas etapas. Para uma precipitação em uma bacia hidrográfica com dados obtidos a partir de uma estação pluviométrica (ou um pequeno número de estações) transferem-se os dados de uma escala de dm^2 para uma escala de km^2 . A primeira etapa consiste em distribuir os dados de pequena escala (estação) para a área total da bacia considerada. A segunda etapa compreende em agregar a distribuição espacial desta precipitação em um valor único para a bacia como um todo. O inverso caracteriza o *downscaling*, Figura 2.5 (BLÖSCHL; SIVAPALAN, 1995).

Os mesmos autores, afirmam ainda, que para se analisar a escala de um processo mais detalhadamente é necessário ter bem definido dois conceitos. O primeiro refere-se à escala do processo que é a escala em que o processo natural ocorre e que está além de

nosso controle. De outra forma existe a liberdade de escolha da escala de observação do processo ou fenômeno, que só é limitada pelas técnicas de medidas e condições apropriadas. Idealmente, processos deveriam ser observados na escala em que ocorrem. Entretanto nem sempre é possível. Por vezes, o processo de interesse em grande escala, conta somente com informações em pequena escala (pontuais). Além disto, processos hidrológicos podem ocorrer simultaneamente em diferentes escalas.

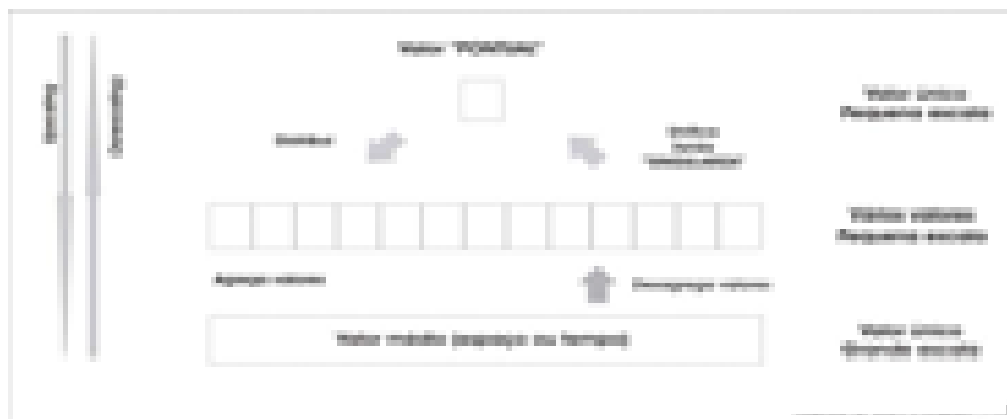


Figura 2.5 – Etapas de transferência de informações entre escalas (*scaling*), adaptado de Blösch e Sivapalan.

Dooge (1982; 1986) classifica escala sob o ponto de vista espacial da seguinte forma:

- escala local – 1 metro
- escala de vertente – 100 metros
- escala de bacia – 10 quilômetros
- escala regional – 1000 quilômetros

Sob o ponto de vista temporal a escala pode variar em nível de evento (1 hora) até escala de longo termo (100 anos).

Para Klemes (1993) a escala correta de modelamento é aquela que combina fatores empíricos e conhecimento teórico disponível para a mais detalhada escala que permita uma síntese matemática.

Gupta e Waymare (1983) afirmam que o essencial seria representar as feições, as interações dinâmicas e o comportamento geral na escala da bacia hidrográfica, sendo a

condutividade hidráulica do solo e a rugosidade do canal de drenagem as características mais importantes na modelagem hidrológica.

Modelos hidrológicos utilizam parâmetros para representar o comportamento da bacia como um todo, com os dados coletados em campo, em geral, em número restrito de locais (SINGH, 1995). A questão central, desta forma, é determinar a escala que melhor representa o fenômeno estudado. Alguns autores chegam a definir a escala em que a resposta hidrológica pode ser tratada como homogênea. Singh (*op. cit*) define a escala como o tamanho de uma célula de um *grid* ou de uma sub-bacia de um tamanho que a resposta hidrológica pode ser definida como homogênea.

Mendiondo e Tucci (1997a p. 59) afirmam que “*os processos hidrológicos apresentam comportamentos distintos de acordo com a escala do sistema*”, afirmam, também, que a representação dos processos hidrológicos em diferentes escalas tem esbarrado primeiramente na heterogeneidade espacial dos sistemas hídricos e na incerteza com quais os parâmetros e processos são medidos em diferentes escalas. O segundo aspecto apontado é a dificuldade de representar os processos caracterizados e analisados na microescala para outras escalas da bacia, destacando também, a falta de relação entre os parâmetros de modelos matemáticos com as diferentes configurações da natureza.

Segundo estes autores o ciclo da água em uma bacia deve ser considerado dentro de sua dinâmica própria inerente aos fenômenos a serem analisados. Esta dinâmica leva em conta mudanças no tempo e no espaço, sendo que este envolve características importantes dentro do sistema, tais como, solo e tipo de uso e cobertura do solo. Mendiondo e Tucci (1997a) apresentam uma representação em forma gráfica de exemplos de escalas espaciais e temporais relacionados à ciência hidrológica (Figura 2.6).

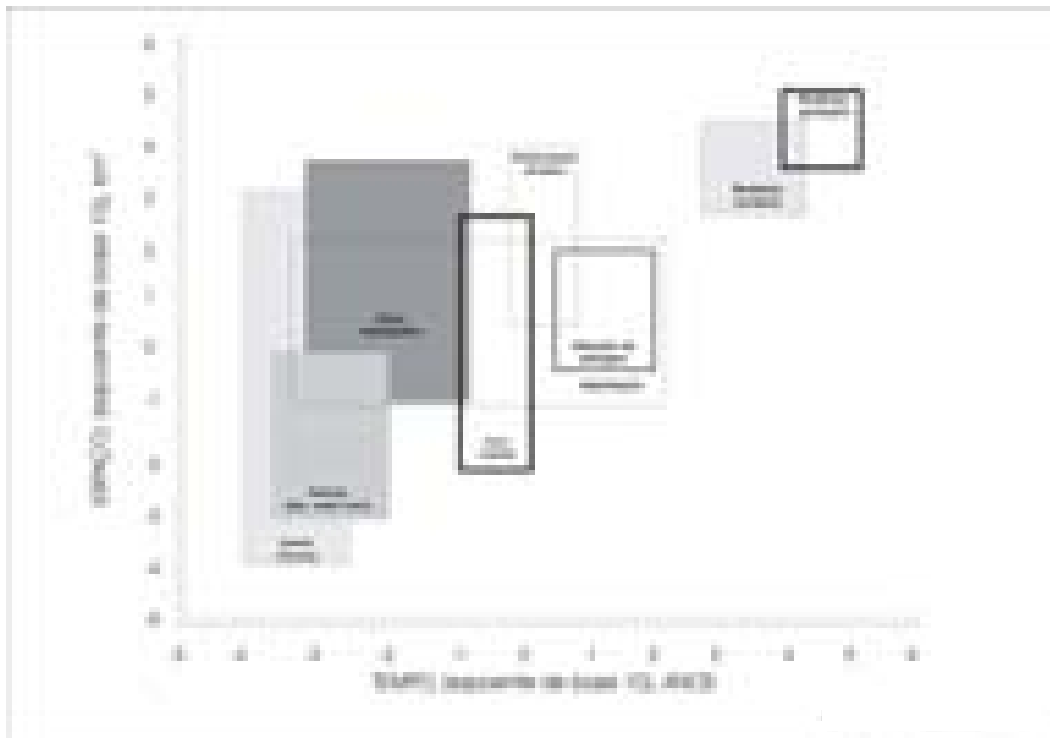


Figura 2.6 – Escalas do espaço e tempo no ciclo hidrológico (adaptado de Mendiondo e Tucci, 1997a).

Para Mendiondo e Tucci (1997b) o ciclo hidrológico é constituído das pequenas e grandes singularidades que ocorrem nos subprocessos que o compõem. Assim, ao agregar meios diferentes, atmosfera, solo, rio, em uma transição de domínios, deve-se obter também a transição de escalas, à medida que estes domínios envolvem diferentes dimensões. Espacialmente, a questão seria como determinar a área representativa apropriada de uma variável hidrológica que identifique a escala do processo natural.

Bergström e Graham (1998) consideram que modeladores hidrológicos possuem diferentes visões sobre a questão da escala dependendo de suas perspectivas e visão da ciência. Como exemplo, a partir de uma perspectiva de um estudo utilizando um lisímetro, uma bacia de 1 km² de área pode ser considerada grande e altamente heterogênea, enquanto para outros estudos uma bacia de vários km² pode ser considerada pequena e homogênea.

Para os mesmos autores, a maioria dos modelos hidrológicos consiste de uma estrutura e de um determinado conjunto de parâmetros, mais ou menos, empíricos que são considerados durante o processo de calibração do modelo. Desta forma, uma mesma

estrutura de modelo pode ser utilizada para uma grande variedade de bacias, diferentemente dos parâmetros. Isto significaria que a estrutura do modelo é geral, não ocorrendo o mesmo com os parâmetros. Quando se altera a escala, uma alteração nos parâmetros pode ser necessária, particularmente se estão relacionados às condições locais, tais como precipitação e fisiografia da região. A questão principal então é se os modelos hidrológicos são gerais, ou flexíveis o suficiente para uma variação do tamanho de bacias. Concluem também em relação à escala espacial que, dependendo do tipo de modelo, a variação de escala tem maior ou menor efeito.

Uma questão relevante é como o comportamento de uma bacia será alterado a partir de mudanças na sua escala de representação. Sabe-se que na prática que em pequenas escalas os padrões existentes de topografia, solo e precipitação são importantes na geração do escoamento superficial, diferenças nestes padrões causarão respostas diferentes. Na medida em que a escala espacial aumenta, a bacia tende a atenuar os padrões locais de geração de escoamento. Para grandes escalas, a geração de escoamento se torna de alguma forma “insensível” às mudanças na intensidade da precipitação e conseqüentemente na resposta da bacia. Em escalas maiores toda a bacia apresentaria respostas semelhantes (BERGSTRÖM; GRAHAM 1998).

Para Fedac (1999) a transferência de escalas (*scaling*) e seus efeitos no modelamento hidrológico são relacionados a heterogeneidades. Estas heterogeneidades afetadas pela escala são pequenas em pequenas escalas e grandes em grandes escalas. Afirma também que, quando a escala de aplicação do modelo aumenta a partir de uma pequena área para uma grande área, a resposta hidrológica torna-se menos sensível para a variabilidade espacial das entradas.

Lahmer e Pfutzner (2000) afirmam que balanços hídricos calculados para bacias de meso e macroescala dependem fortemente da exatidão dos dados de campo e da distribuição espacial das variáveis meteorológicas de entrada. Entretanto, estudos hidrológicos de grande escala por vezes sofrem restrições induzidas pela disponibilidade destes dados. Para estes autores, aplicações de grandes escalas em modelos fisicamente distribuídos são geralmente limitadas pela disponibilidade de dados requeridos pelo modelo. Para modelos conceituais o uso de informações diretamente obtidas de mapas digitais seria preferível.

Morad e Pérez (2001) comentam que modelos hidrológicos distribuídos são criados com o propósito de representar o comportamento espacial dos elementos que melhor se ajustam à gestão integrada de bacias hidrográficas. Os algoritmos utilizados

nestes modelos com frequência se embasam em experimentos em escala de laboratório e pequenas parcelas, onde as características do solo são bem definidas. Quando estes parâmetros se aplicam a grandes bacias ou sub-bacias, a tendência é conservar um valor constante.

Xavier (2002) afirma que a questão da escala em que os processos físicos devem ser representados em um modelo hidrológico constitui-se em um ponto que merece especial atenção na modelagem hidrológica, sobretudo quando se trata modelos distribuídos, por estes representarem a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica.

Segundo Rennó e Soares (2003) os modelos descrevem processos com diferentes níveis de detalhamento. Um modelo pode apresentar maior detalhamento representando pequenas áreas ou ser mais simples simulando comportamentos hidrológicos de grandes áreas.

Wu e Li (2006) afirmam existir três aspectos importantes relacionados à questão da escala. O primeiro aspecto refere-se à escala característica que implica que todo o fenômeno natural tem sua escala distintiva (ou amplitude de variação da escala) que caracteriza seu comportamento (por exemplo, a escala espacial). O segundo aspecto é o efeito escala que se refere às mudanças nos resultados do estudo a partir da mudança na escala em que o estudo do fenômeno ou do processo é estudado. O terceiro é relativo aos procedimentos e consequências de transferência de informações entre escalas (*scaling*). Tanto a escala característica como o efeito escala são intimamente relacionados à questão da transferência entre escalas. As escalas características fornecem as bases conceituais e práticas e, o efeito escala a descrição quantitativa das relações de transferências entre escalas.

A escolha, portanto, de uma determinada escala de observação, análise ou modelamento em termos de seus componentes (resolução, área de estudo, etc) pode influenciar ou não o padrão intrínseco ou a escala do fenômeno (WU e LI, 2006).

2.5.3 A escala espacial e os modelos distribuídos

Dehotin e Braud (2007) consideram os modelos hidrológicos distribuídos como ferramentas valiosas na estimativa dos componentes de um balanço hídrico, no estudo

dos impactos para diferentes usos do solo e dos recursos hídricos e na qualidade da água.

Para uma dada bacia e um dado conjunto de dados, a discretização espacial “ótima” pode ser diferente de acordo com o tipo de problema a ser solucionado ou os objetivos do referido modelamento. É fundamental uma metodologia flexível, especialmente para grandes bacias hidrográficas, para possibilitar o relacionamento ideal entre os dados disponíveis, o processo hidrológico dominante, sua escala de representação e os objetivos do modelo.

Para estes autores, algumas questões devem ser consideradas:

- em relação ao objetivo do modelamento à questão fundamental parte do princípio de que para cada objetivo e para cada bacia, a discretização espacial pode variar.
- a definição do objetivo do estudo leva a definição das variáveis de saída de interesse, e a escala espacial e temporal nas quais elas são requeridas.
- os dados medidos incluem variáveis de entrada (precipitação e clima), variáveis de saída para verificação, tais como, vazão, água no solo, nível de água subterrânea, fluxos superficiais, e ainda, uso do solo, geologia, topografia e relevo, que são utilizados como estimativas de parâmetros do modelo. Relacionado a estas questões deve-se observar a região ou área onde os dados são coletados, a escala espacial em que os dados são integrados e a distância no tempo e no espaço em que os dados são observados.

Ainda segundo Dehotin e Braud (2007) outro dado a ser considerado é que a vazão observada é frequentemente composta também pela água presente no solo antes da precipitação ao contrário do proposto por Horton para o escoamento superficial (Figura 2.3).

Ainda segundo os mesmos autores, a representação de um processo internamente a um modelo, implica na escolha de dois elementos complementares. A resolução e a conceitualização do modelo. De acordo com a resolução do modelo, alguns processos podem ser representados explicitamente ou serem parametrizados.

Para Dehotin e Braud, no relacionamento precipitação-escoamento superficial ocorre o decréscimo do coeficiente do escoamento superficial com o aumento da escala da bacia, dentro de vários contextos hidrológicos e climáticos. De acordo com as características da bacia e de clima, diferentes modelos podem ser originados, com diferentes processos hidrológicos dominantes.

Macroporos, fluxo preferencial, re-infiltração, variabilidade na cobertura do solo, influência da microtopografia podem explicar os efeitos e as diferenças observadas em relação aos processos dominantes em nível de uma bacia hidrográfica nas diferentes escalas.

Beven (1995), afirma que para os processos de produção de escoamento superficial, o uso de determinados parâmetros, utilizados na maioria dos modelos distribuídos, não pode produzir uma acurada representação do processo como um todo, tanto em nível de vertente, de pequenas bacias ou ainda, em escalas menores. Tal fato é explicado pela não-linearidade dos processos envolvidos, junto com as heterogeneidades inerentes aos sistemas naturais. Assim, tanto para um estudo hidrológico de pequena escala, como de grande escala existe a necessidade de uma teoria que possibilite a previsão correta da distribuição da precipitação em escalas menores ou maiores.

Diante do disso, fica evidente a importância do efeito da escala espacial em modelos distribuídos. Ainda de acordo com Beven (1995), a utilização de informações em diferentes escalas é muito difícil. Para ele esta dificuldade deriva do fato de que a produção do escoamento superficial ser fortemente afetada por heterogeneidades na geologia, nos solos e nas características da vegetação, assim como, da variabilidade espacial da precipitação e das características geomorfológicas da bacia. O mesmo autor ressalta também, a influência de processos ocorridos ao longo do desenvolvimento geomorfológico da bacia, como por exemplo, processos de laterização e também como consequência da ação antrópica.

2.6 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

As características fisiográficas são todos os aspectos que representam as dimensões (área, comprimentos e forma), as relações topográficas e geométricas, que influenciam direta ou indiretamente o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. São extraídas de mapas, cartas topográficas, fotografias aéreas, imagens de satélite e modelos digitais do terreno.

Entre os principais parâmetros utilizados na caracterização de uma bacia e que são utilizados em modelos hidrológicos estão:

- área da bacia: definida por uma projeção horizontal do divisor de águas. A área da bacia e o volume precipitado refletem o volume total de água que pode ser gerado. Possibilita a hierarquização e a classificação das bacias em função da área e exerce influência sobre as vazões. Em bacias de maior área, o volume de escoamento estará mais distribuído espacialmente, e o tempo para a passagem deste volume pelo exutório será maior que em uma bacia de menor área. O pico da enchente será menos acentuado.
- forma da bacia: não é utilizada diretamente, mas sim, no cálculo de parâmetros que refletem o comportamento hidrológico. Genericamente a forma da bacia tem influência no tempo de concentração das águas e conseqüentemente sobre a configuração do hidrograma.

O fator de forma fornece uma relação entre o comprimento de uma bacia e sua largura média. Tal fator influencia na velocidade de ocorrência das cheias (ou, indica maior ou menor tendência de cheias).

O comprimento é calculado seguindo-se o canal principal (mais longo) da nascente até a sua foz. A largura média é obtida quando se divide a área pelo comprimento da bacia. Em uma bacia estreita e longa (fator de forma mais baixo), por exemplo, é menor a possibilidade de uma chuva alcance toda sua extensão, diminuindo a tendência de enchentes, Figura 2.7.

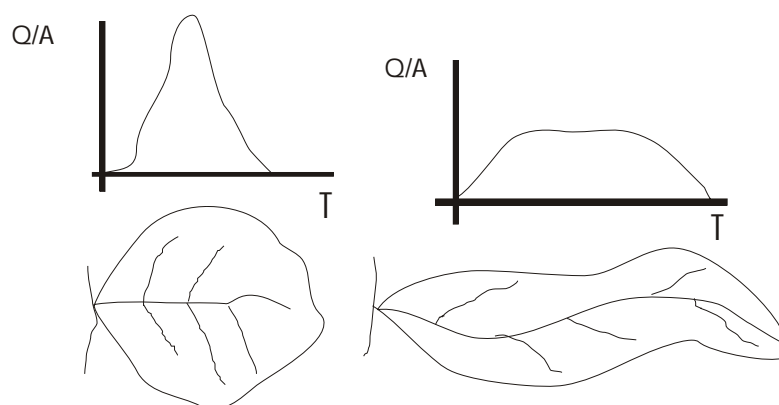


Figura 2.7 - A forma da bacia influencia a forma de sua hidrógrafa. À direita uma bacia de forma mais alongada, com um tempo de concentração comparativamente mais alto que outra bacia com forma mais arredondada (à esquerda).

- comprimento da bacia e rio principal: importante na estimava do tempo que a água leva para percorrer a bacia.

- declividade: tem relação com a velocidade com a qual ocorre o escoamento. Seu cálculo leva em conta a diferença de altitude entre o início e o fim da drenagem dividida pelo comprimento da drenagem. Pode-se considerar a declividade da bacia como um todo ou do curso d'água. A declividade da bacia relaciona-se com a infiltração, o escoamento superficial e umidade do solo. Por exercer influência sobre a velocidade de escoamento, controlando de igual forma, o tempo de escoamento superficial e a concentração da chuva, a inclinação do curso d'água, afeta a forma do hidrograma de enchente.
- curva hipsométrica: relaciona a área de contribuição e a altitude. Uma curva hipsométrica é a representação gráfica do relevo médio de uma bacia, Figura 2.8.

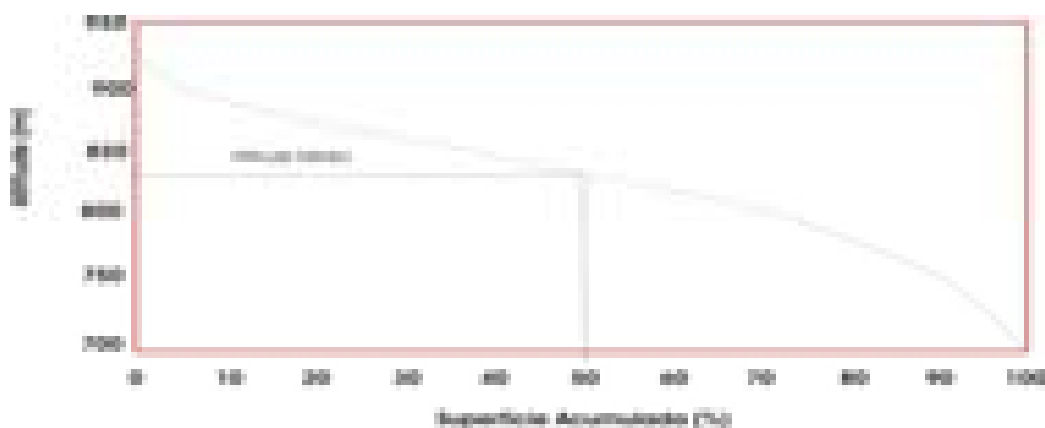


Figura 2.8 – Representação gráfica do relevo de uma bacia.

- padrão de drenagem e densidade: indica as características de escoamento da água precipitada em uma bacia. A densidade de drenagem é a relação entre o comprimento total da drenagem em uma bacia e a área desta bacia hidrográfica. Um valor alto indica uma densidade de drenagem relativamente alta e uma resposta rápida da bacia a uma precipitação.

Além destes, outros aspectos são levados em consideração, quando do estudo de uma bacia hidrográfica. Entre os de maior relevância estão a cobertura vegetal e o tipo, o uso e a ocupação do solo.

- cobertura vegetal: as florestas e as culturas desenvolvidas em uma bacia condicionam a maior ou menor rapidez do escoamento superficial. A sua

influência atua, também, na taxa de evaporação, com uma ação reguladora, sobretudo em climas secos. No caso de grandes cheias com elevadas vazões a sua ação é, no entanto, praticamente nula. Além da influência que exerce na velocidade dos escoamentos e na taxa de evaporação, a cobertura vegetal desempenha papel importante e eficaz na proteção contra processos erosivos e consequente assoreamento de corpos hídricos.

- uso e ocupação do solo: o tipo de ocupação do solo afeta as características do escoamento em uma bacia. Uma área com cobertura vegetal representada por floresta produz menos escoamento superficial que uma área sem cobertura de árvores. Igualmente em áreas urbanas a alternância de áreas permeáveis e impermeáveis e o predomínio de um tipo sobre outro influenciam na taxa e no volume de água disponível para escoamento superficial.

Outros fatores que influenciam o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica são o contexto geológico da área, a conformação geomorfológica, as formas de relevo envolvidas e os solos da região.

Regiões com rochas intensamente fraturadas, com solos permeáveis e em relevo plano possibilitam uma maior infiltração e consequentemente menor escoamento superficial. Solos impermeáveis, relevos inclinados e rochas menos fraturadas geram um maior escoamento superficial. Em bacias impermeáveis ocorrem vazões maiores em menor espaço de tempo. Por outro lado, em bacias predominantemente permeáveis, existe uma maior distribuição da vazão ao longo do tempo.

Pode-se afirmar que as características físicas da região, associadas ao uso, a ocupação e ao tipo de solo controlam o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. As características fisiográficas quando analisadas, proporcionam o conhecimento dos diversos fatores que determinam a natureza da descarga de um rio. É a partir da análise do conjunto dos parâmetros relevantes envolvidos é que se pode fazer comparações entre bacias, sendo possível, assim, entender os fenômenos e os processos envolvidos e se realizar extrapolações.

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Para a execução deste estudo foram utilizadas bases cartográficas, informações temáticas e dados e informações hidrometeorológicas, obtidos de diversas fontes, além de variadas ferramentas computacionais.

3.1.1 Dados e informações cartográficas

Para a obtenção da rede de drenagem, delimitação e cálculo dos dados físicos que caracterizam cada bacia hidrográfica foram utilizadas cartas planialtimétricas em formato digital, de diferentes escalas cartográficas (escalas 1:1.000.000, 1:250.000 e 1:100.000) disponibilizadas, via *internet*, pelo Sistema Estadual de Informações Estatísticas e Geográficas do Estado de Goiás – SIEG.

3.1.2 Dados e informações hidrometeorológicas

As séries históricas referentes aos dados hidrometeorológicos foram obtidas, via *internet*, no Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB) da Agência Nacional de Águas (ANA).

3.1.3 Dados e informações temáticas

Mapas temáticos, em formato digital, foram adquiridos junto ao SIEG, com vistas à obtenção de informações a serem utilizadas na estimativa de parâmetros para utilização

na modelagem hidrológica. Os temas necessários referem-se ao tipo de solo (aspecto textural), tipo de cobertura e uso do solo.

3.1.4 Programas

Entre os programas utilizados, dois em especial serviram como base no desenvolvimento deste estudo: o *ArcView* (versão 3.2) e o HEC-HMS (versão 3.3).

ArcView

É um programa de Sistema de Informações Geográfica (SIG) que possibilita a visualização, o gerenciamento, a criação e a análise de dados geograficamente referenciados. Esta ferramenta permite a delimitação das bacias diretamente sobre as bases cartográficas digitais e o cálculo automático das áreas das bacias, do comprimento dos rios principais e a manipulação e o cruzamento dos diferentes tipos de dados e informações, temáticas, cartográficas e hidrometeorológicas.

HEC-HMS

O modelo hidrológico utilizado foi o *Hydrologic Modeling Systems (HMS)*, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center of the US Army Corps of Engineers (HEC)*, projetado para simular o processo chuva-vazão em uma bacia hidrográfica.

O modelo da bacia é construído separando o ciclo hidrológico em unidades distintas e pela construção dos limites da bacia hidrográfica de interesse. O fluxo de massa ou energia é representado na forma de um modelo matemático determinístico. As condições iniciais, limites e parâmetros do modelo são, portanto, considerados como bem determinados. Os valores dos parâmetros são constantes (invariáveis no tempo) e

cada processo pertencente ao ciclo hidrológico é computado isoladamente, mesmo quando simultâneos.

A partir do HEC HMS (Figura 3.1) foram realizadas a descrição física da bacia, análises de parâmetros meteorológicos, estimativas de parâmetros, simulações e análises de simulações e calibração do modelo.

Os componentes dos modelos matemáticos utilizados internamente ao HEC HMS são utilizados para simular a resposta hidrológica da bacia. Estes componentes são: modelo da bacia, modelos meteorológicos, especificações de controle e dados de entrada. A simulação calcula a resposta a precipitação – escoamento superficial na bacia, quando informados os dados de entrada a partir do modelo meteorológico. As especificações de controle, por sua vez, definem o período de tempo e de etapas para o processo de simulação.

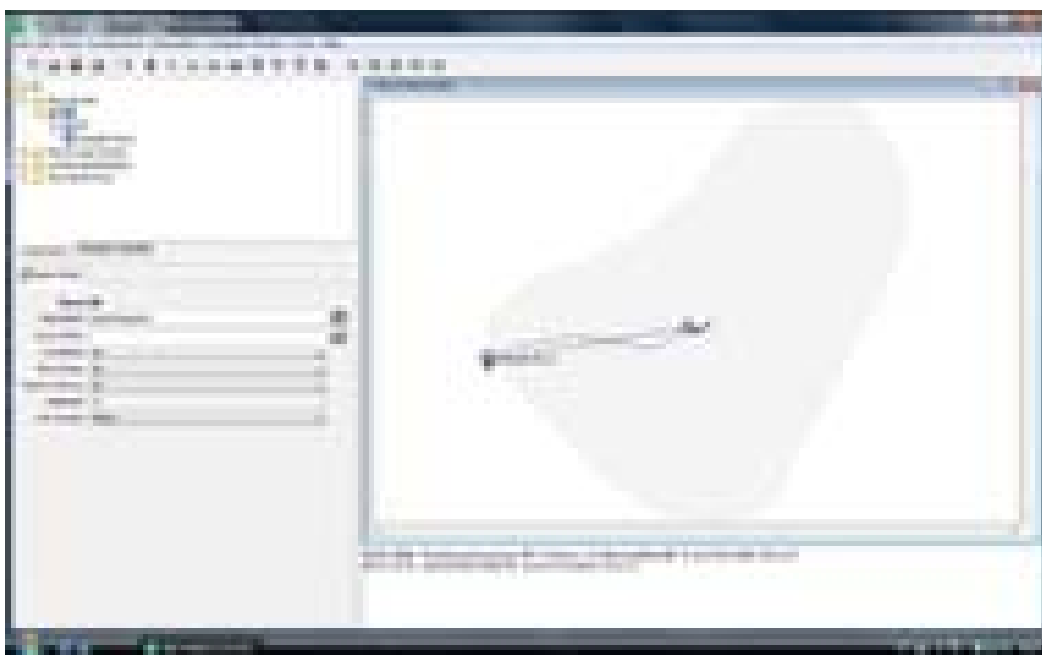


Figura 3.1 – Tela do HEC HMS, versão 3.3, apresentando a representação gráfica da bacia analisada.

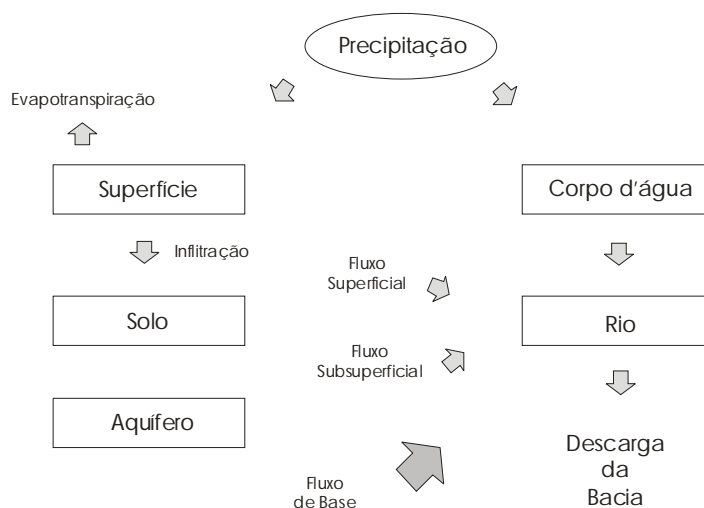
Em uma simples contextualização (Anexo II), o HEC HMS parte da precipitação que pode apresentar três caminhos distintos, interceptação pela vegetação, alcançar a superfície do terreno ou cair diretamente sobre o corpo d'água. Processos de evaporação e transpiração diminuem a quantidade disponível de água para escoamento superficial e infiltração/percolação. A água que chega ao aquífero (por infiltração) se direciona a

drenagem superficial formando o fluxo de base, que por sua vez pode atuar na recarga do aquífero.

O que precipita sobre a superfície do solo, se não for interceptado por depressões no terreno, forma o escoamento superficial, se dirigindo ao rio. Ocorre também, um fluxo subsuperficial que se direciona para a drenagem superficial (rio).

Em estudos hidrológicos uma quantificação da água em cada um dos processos envolvidos é necessária. O HEC HMS realiza esta quantificação, a partir do uso de uma série de modelos matemáticos, separando, um modelo específico para cada processo. Modelos que computam o volume escoamento superficial, o escoamento direto, o fluxo de base e o fluxo no canal.

A representação típica do HEC HMS de uma bacia hidrográfica pode ser caracterizada da seguinte forma (ver, Anexo II):



Como síntese dos modelos utilizados pelo HEC HMS:

Para o volume do escoamento superficial, neste estudo, utilizou-se o *Curve Number* do *Soil Conservation Service*, categorizado como do tipo por evento, concentrado e empírico.

Para o escoamento direto, utilizou-se o método da hidrógrafa unitária do *SCS*, de mesma classificação.

O método do *Curve Number* estima o excesso de precipitação como uma função da precipitação acumulada, cobertura e uso do solo e umidade antecedente utilizando a seguinte equação:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Onde,

P_e : excesso de precipitação no tempo

P : volume precipitado no tempo

I_a : perdas iniciais

S : potencial máximo de retenção

E,

$$I_a = 0.2 S$$

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

$$S = \left| \frac{\frac{1000 - 10 \cdot CN}{CN}}{\frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN}} \right|$$

O valor do CN varia de 0 a 100, onde quanto menor o valor mais permeável o solo.

Para bacias com várias combinações de tipos e coberturas de solos utiliza-se um CN médio:

$$\text{CN médio} = \frac{\sum A_i \text{CN}_i}{\sum A_i}$$

Onde,

A_i : área de drenagem das sub-bacias

i : índice de ponderação

No método da Hidrógrafa Unitário do *SCS expressa a vazão* como a relação entre a vazão de pico para qualquer tempo e o tempo do pico.

$$U_p = C \frac{A}{T_p}$$

Onde,

A; área da bacia

C: constante de conversão

T_p: tempo do pico

Sendo T_p,

$$T_p = \frac{M}{2} + t_{lag}$$

t_{lag}: diferença entre o centro de massa da precipitação e o tempo de pico

Δt: duração do excesso de precipitação

3.2 MÉTODOS

Os materiais, dados, informações e programas foram integrados e utilizados em uma série de etapas (Figura 3.2) que culminaram com as simulações desenvolvidas a partir da utilização do modelo hidrológico. As referidas etapas, descritas a seguir, envolveram a aquisição dos dados, a análise e preparação (tratamento) dos dados, definição e delimitação das bacias hidrográficas a serem estudadas, a caracterização física das bacias, a realização de simulações para observação do comportamento da bacia, a calibração do modelo e, como etapa final, análise e apresentação dos resultados.

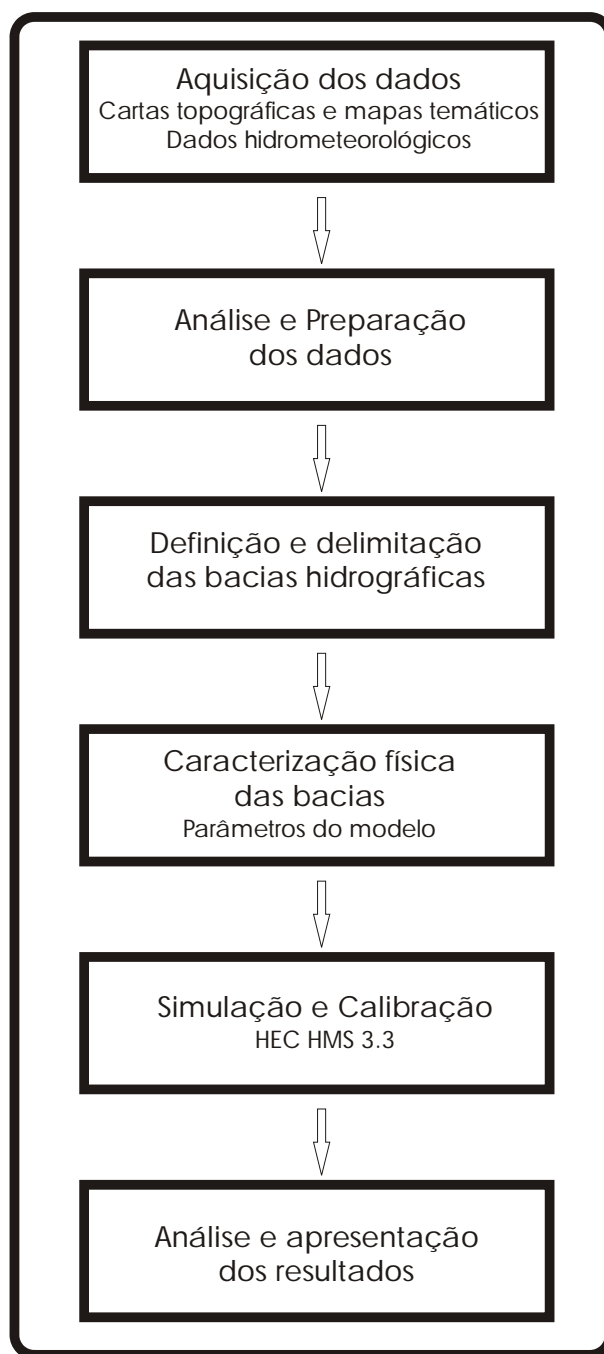


Figura 3.2 – Fluxograma simplificado do desenvolvimento deste estudo.

3.2.1 Aquisição dos dados

3.2.1.1 Obtenção dos dados hidrológicos

Dados e informações hidrológicas referente à pluviometria e fluviometria foram adquiridos, *via internet*, no Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB) da Agência Nacional de Águas (ANA). Foram coletadas e tratadas as informações relativas a séries históricas de estações hidrometeorológicas localizadas nas bacias hidrográficas analisadas, Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Estações hidrometeorológicas utilizadas.

Estações Hidrometeorológicas							
Pluviométricas				Fluviométricas			
Código	Latitude	Longitude	Nome	Código	Latitude	Longitude	Nome
1648001	-16:5:00	-48:30:30	Pte. Anápolis-Brasília	60434000	-15:39:29	-48:9:53	Capão da Onça
1548011	-15:33:11	-48:34:38	Fazenda Marajá	60433000	-16:3:50	-48:21:59	Faz. São Bento
1548003	-15:51:0	-48:57:00	Pirenópolis	60945000	-19:09:30	-51:00:30	Pte. Rio Corrente
1548009	-15:42:43	-48:5:33	Jatobazinho				
1548007	-15:39:33	-48:11:26	E.T.A Brazlândia				
1552002	-17:41:17	-52:52:58	Faz. São Domingos				
1851002	-18:45:53	-51:20:50	Itarumã				
1851005	-18:18:18	-51:57:57	Serranópolis				
1852000	-18:58:00	-51:54:36	Aporé				
1853000	-17:48:41	-53:17:20	Faz. Taquari				
1950011	-19:12:29	-50:39:46	Pte. São Domingos				
1951001	-19:06:22	-51:32:10	Itajá				

O HIDROWEB possibilita a realização de consultas ao banco de dados da Agência a partir de diversos atributos, tais como, código da estação, tipo (pluviométrica ou fluviométrica), nome da estação, bacia hidrográfica, estado e município em que está instalada e instituições operadora e responsável. As séries históricas podem incluir dados de cotas, vazões, chuvas, clima, qualidade da água, resumo de descarga, sedimentos, curva de descarga e perfil transversal. O HIDROWEB está disponível para acesso no endereço: <http://hidroweb.ana.gov.br/>.

3.2.1.2 Obtenção das bases cartográficas

As bases cartográficas, em formato digital, com informações de altimetria, rede de drenagem e pontos cotados, em três escalas diferentes, 1:1.000.000, 1:250.000 e 1:100.000, foram elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com revisão posterior da topologia, alimentação do banco de dados, atualizações e edição das cartas pela Gerência de Geoinformação da Secretaria de Indústria e Comércio do Estado de Goiás. As bases cartográficas nas escalas 1:1.000.000 e 1:250.000 estão disponíveis em: www.sieg.go.gov.br. A base cartográfica na escala 1:100.000, se encontra em fase final de elaboração.

3.2.1.3 Obtenção dos dados e informações temáticas

Para a obtenção dos dados para a utilização no modelo hidrológico, um conjunto de informações temáticas foi necessário. Relacionam-se a perdas que não se integram a vazão gerada. Estas perdas dizem respeito aos processos de infiltração e escoamento superficial e, para sua caracterização, foram obtidas informações referentes ao tipo de solo, ao uso e a cobertura do solo.

Em relação aos tipos de solos das bacias envolvidas, as informações foram coletadas em diferentes fontes. Solos na escala 1:1.000.000 tiveram como fonte o Levantamento de Solos do Projeto RADAMBRASIL, folhas ao milionésimo SD-23, SE-22 e SD-22 (MAMEDE; NASCIMENTO 1981). Na escala 1:250.000, as informações tiveram como fonte o Mapa de Solos do Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, elaborado pela Universidade Federal de Viçosa/RURALMINAS (2000), com modelagem, alimentação do SIG e edição das cartas pela Gerência de Geoinformação da SIC/GO.

Informações relativas aos tipos de solos em escala 1:100.000, não se encontram disponíveis para as bacias definidas. Desta forma, os dados utilizados foram os de maior detalhe possível, no caso 1:250.000.

Informações sobre o Uso e Cobertura do Solo, foram obtidas no estudo Determinação de Áreas Prioritárias para Unidades de Preservação – Consórcio WWF/IMAGEM (2004), na escala 1:250.000, sendo esta a única escala de mapeamento disponível em relação ao tema.

3.2.2 Análise e tratamento dos dados

Os dados obtidos foram analisados e preparados para a utilização nas etapas posteriores. Os procedimentos envolveram a revisão dos dados e o armazenamento na forma de um banco de dados, estruturado para dar suporte ao desenvolvimento das etapas posteriores. Esta etapa foi desenvolvida em ambiente SIG, utilizando o *ArcView*, para a manipulação, edição, análise e cruzamento de informações.

3.2.3 Definição e delimitação das bacias hidrográficas

3.2.3.1 Definição das bacias hidrográficas

Em relação à escala dos processos hidrológicos, Becker (1992) apresenta três escalas básicas, micro, meso e macro escala e suas zonas de transição (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 - Escalas dos processos hidrológicos, segundo BECKER, 1992.

Escala	Dimensão (km²)
Macro	$> 10^4$
Transição α	10^3 e 10^4
Meso	$10 - 10^3$
Transição γ	$10^{-4} - 10$
Micro	$< 10^{-4}$

Na micro escala e sua transição para a meso escala é onde ocorrem os processos de escoamento em vertentes. A meso escala representa a faixa de bacias hidrográficas que são aproveitadas para o abastecimento público e irrigação. Na faixa de transição entre meso e macro escala e na própria macro escala é onde existe maior número de informações hidrológicas, devido à intensa utilização de bacias deste nível para aproveitamento hidrelétrico (MENDIONDO E TUCCI, 1997a).

Baseado nestas escalas hidrológicas optou-se pela escolha e delimitação de três classes de bacias hidrográficas, Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Áreas de bacias a serem delimitadas.

Tipo de Bacia	Área
Bacia Pequena	< 10 km ²
Bacia Média	Entre 10 – 10 ³ km ²
Bacia Grande	>10 ³ km ²

3.2.3.2 Bacias hidrográficas delimitadas

A localização das bacias hidrográficas delimitadas é apresentada na Figura 3.3. A bacia delimitada de pequena escala localiza-se na região noroeste do Distrito Federal, no Rio Descoberto (Córrego Capão da Onça), a partir da estação fluviométrica Capão da Onça (60434000). A bacia delimitada de média escala localiza-se no Estado de Goiás imediatamente a Oeste do Distrito Federal, no Rio Areias, delimitada a partir da estação fluviométrica Fazenda São Bento (60433000). A bacia delimitada de grande escala localiza-se no extremo sudoeste do Estado de Goiás próxima a divisa com os estados do Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, no Rio Corrente, a partir da estação fluviométrica Ponte Rio Corrente (60945000).

Cada bacia hidrográfica foi delimitada três vezes, com a utilização das diferentes bases cartográficas disponíveis, escalas 1:1.000.000, 1:250.000 e 1:100.000, resultando em nove bacias, três em cada escala espacial, figuras 3.4 a 3.12. O Quadro 3.4 apresenta as áreas das bacias delimitadas.

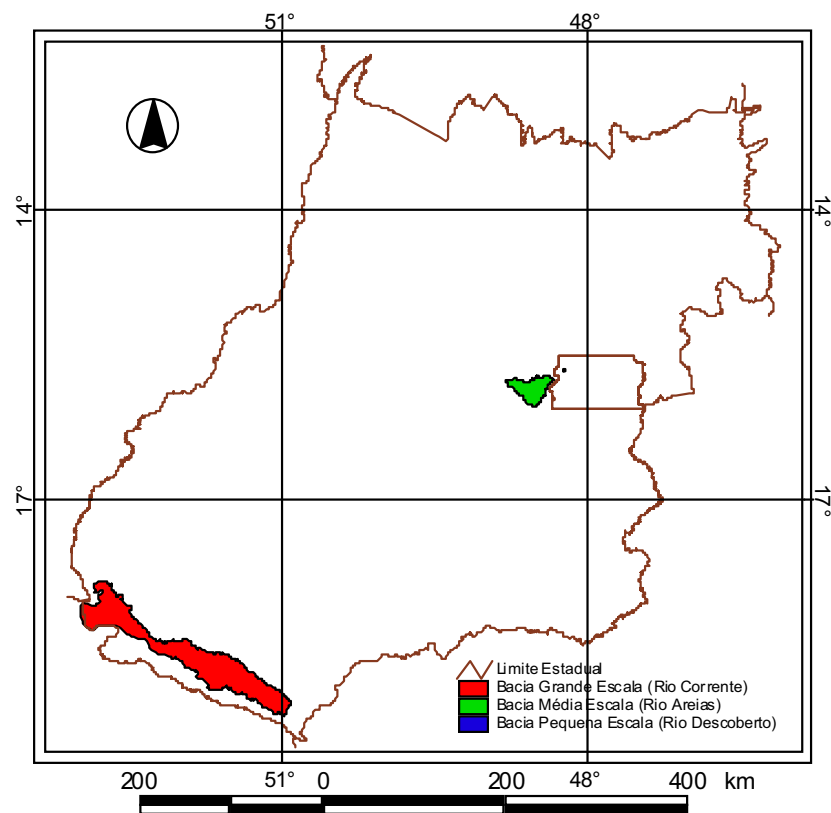


Figura 3.3 – Localização das bacias hidrográficas analisadas.

Quadro 3.4 – Áreas de bacias delimitadas de acordo com as escalas de trabalho.

Bacia	Intervalo	Área (km ²)		
		1:1.000.000	1:250.000	1:100.000
Bacia Pequena	< 10 km ²	7	6	7
Bacia Média	Entre 10 – 10 ³ km ²	989	992	974
Bacia Grande	> 10 ³ km ²	6806	6622	6745

A delimitação foi realizada manualmente sobre as cartas topográficas digitais, utilizando-se como referência as curvas altimétricas e pontos cotados e traçando uma linha divisória que passa pelos pontos de maior cota entre duas bacias vizinhas (divisores de águas). Desta forma, foram traçados os limites das bacias, objetos de estudo, levando em consideração, a rede de drenagem e a topografia, representada pelas curvas de nível e pontos cotados.

A delimitação (digitalização) foi realizada utilizando programa *ArcView*, que permitiu ao mesmo tempo, o traçado, a obtenção das características fisiográficas de cada bacia e estruturação de um banco de dados, em forma de um Sistema de Informação Geográfica, contendo todos os aspectos e atributos a serem utilizados.

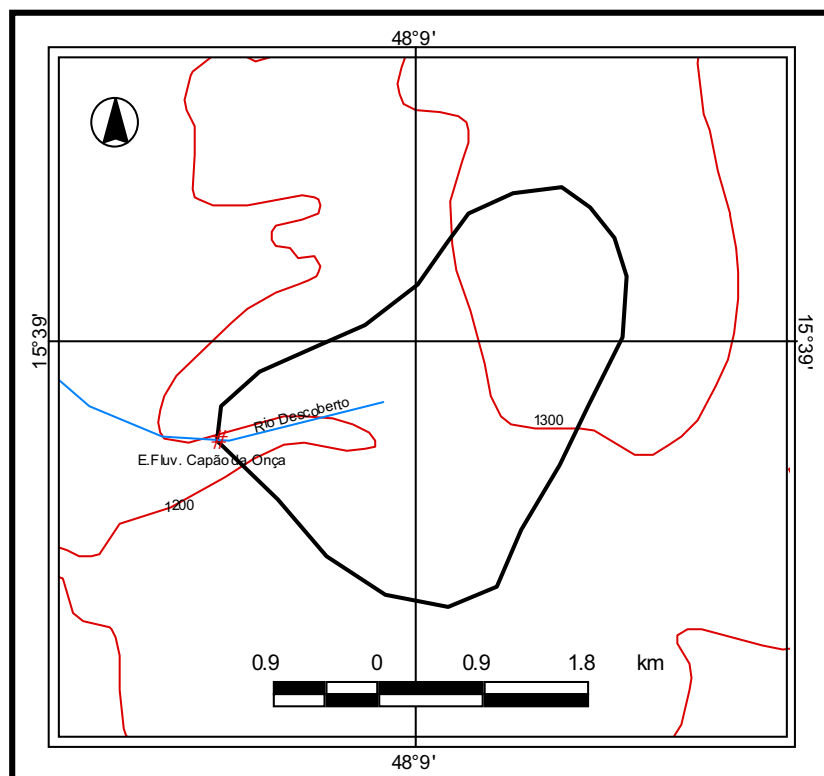


Figura 3.4 – Bacia em Pequena Escala (Rio Descoberto/Córrego Capão da Onça). Delimitada na escala 1:1.000.000.

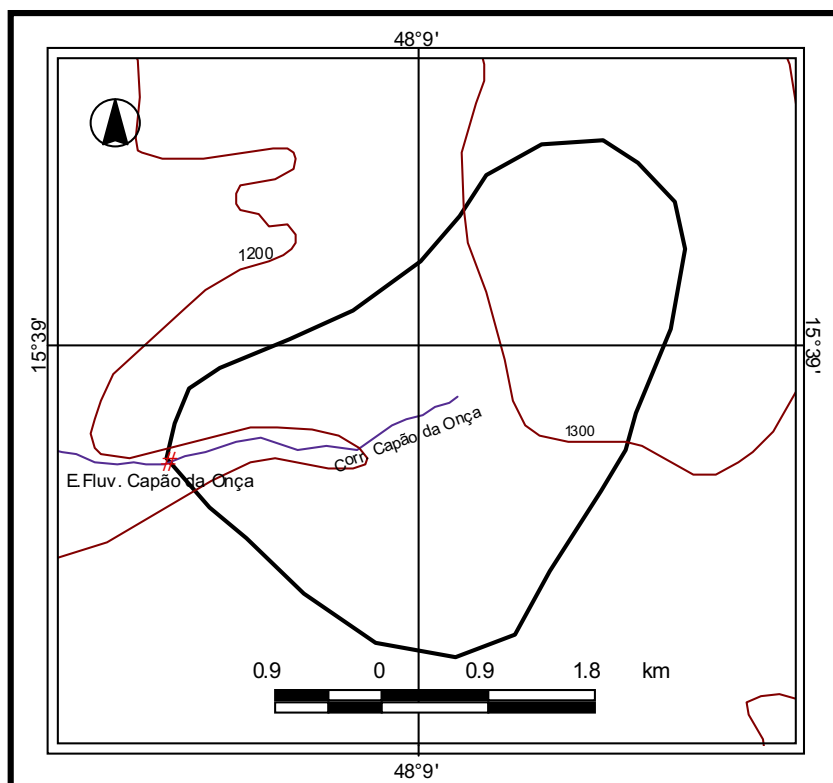


Figura 3.5 – Bacia em Pequena Escala (Córrego Capão da Onça). Delimitada na escala 1:250.000.

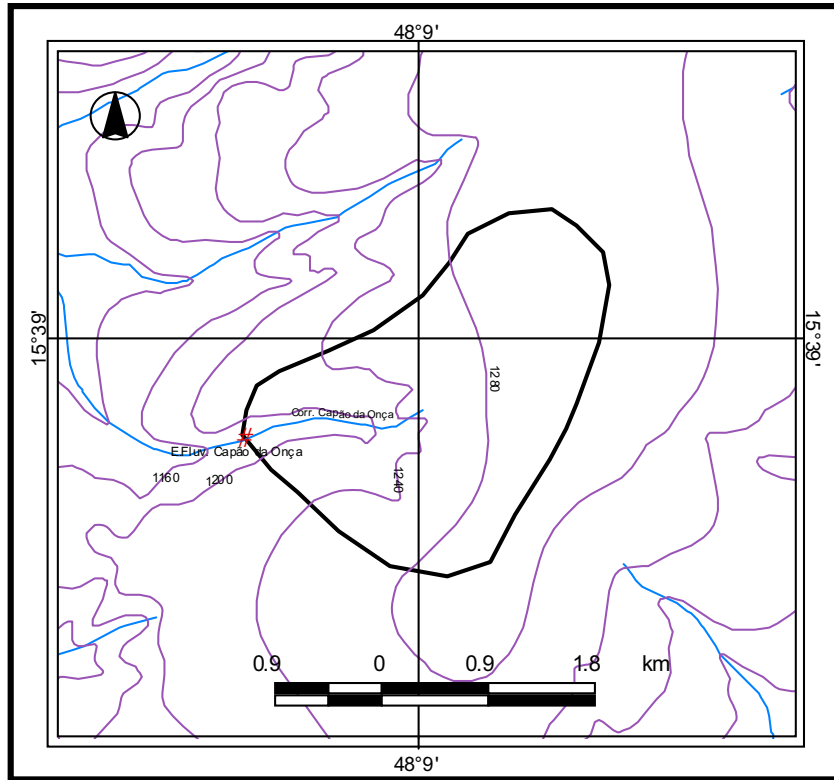


Figura 3.6 – Bacia em Pequena Escala (Córrego Capão da Onça). Delimitada na escala 1:100.000.

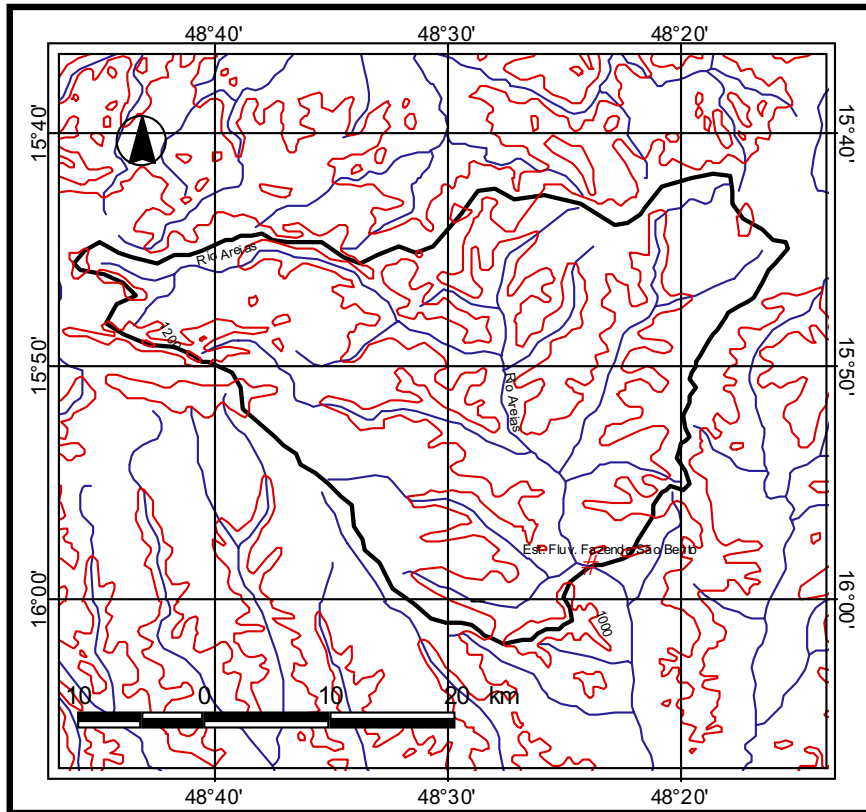


Figura 3.7 – Bacia em Média Escala (Rio Areias). Delimitada na escala 1:1.000.000.

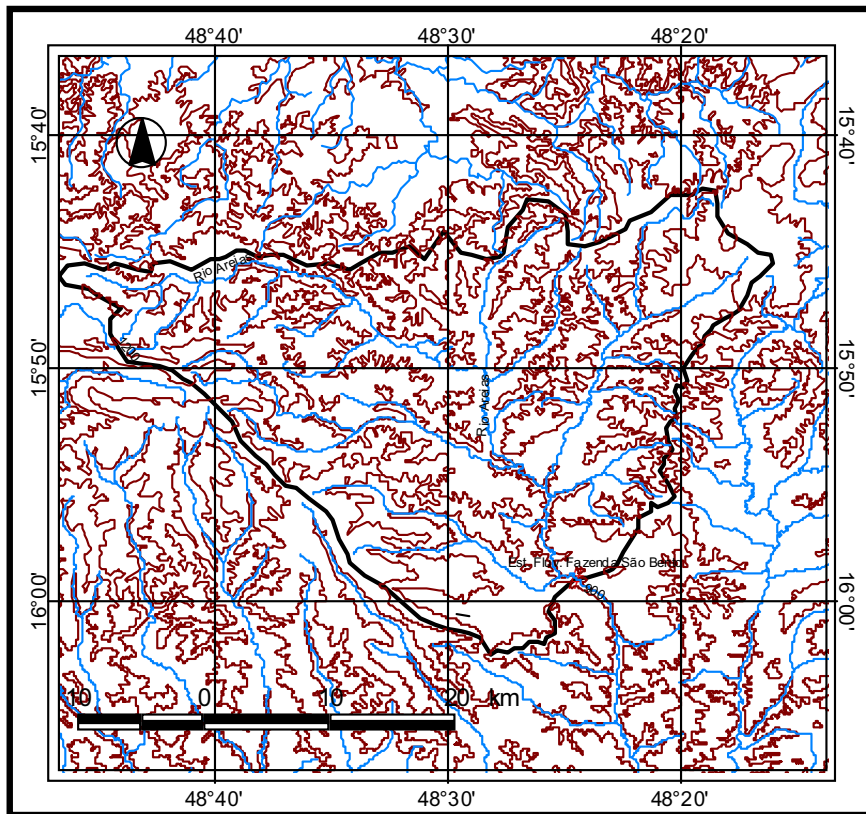


Figura 3.8 – Bacia em Média Escala (Rio Areias). Delimitada na escala 1:250.000.

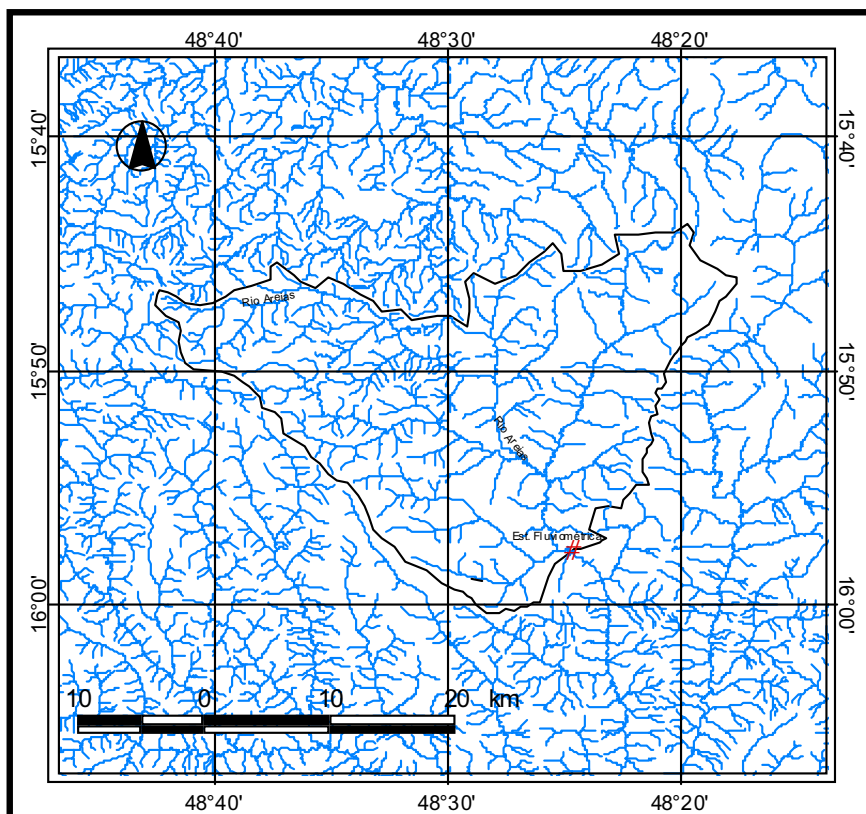


Figura 3.9 – Bacia em Média Escala (Rio Areias). Delimitada na escala 1:100.000.

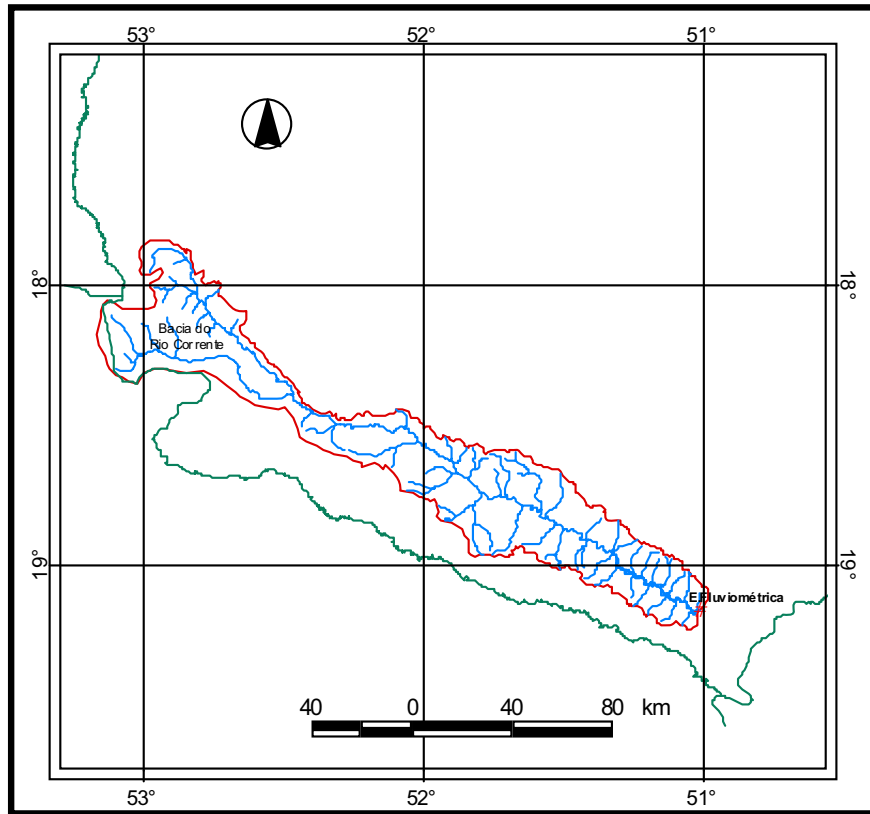


Figura 3.10 – Bacia em Grande Escala (Rio Corrente). Delimitada na escala 1:1.000.000.

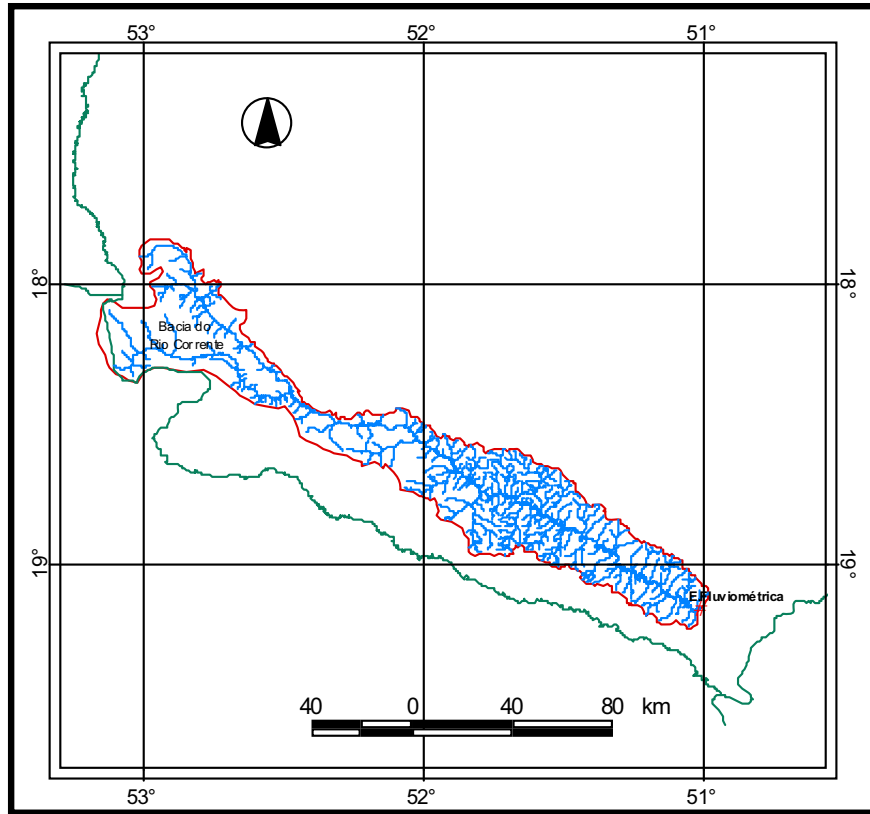


Figura 3.11 – Bacia em Grande Escala (Rio Corrente). Delimitada na escala 1:250.000.

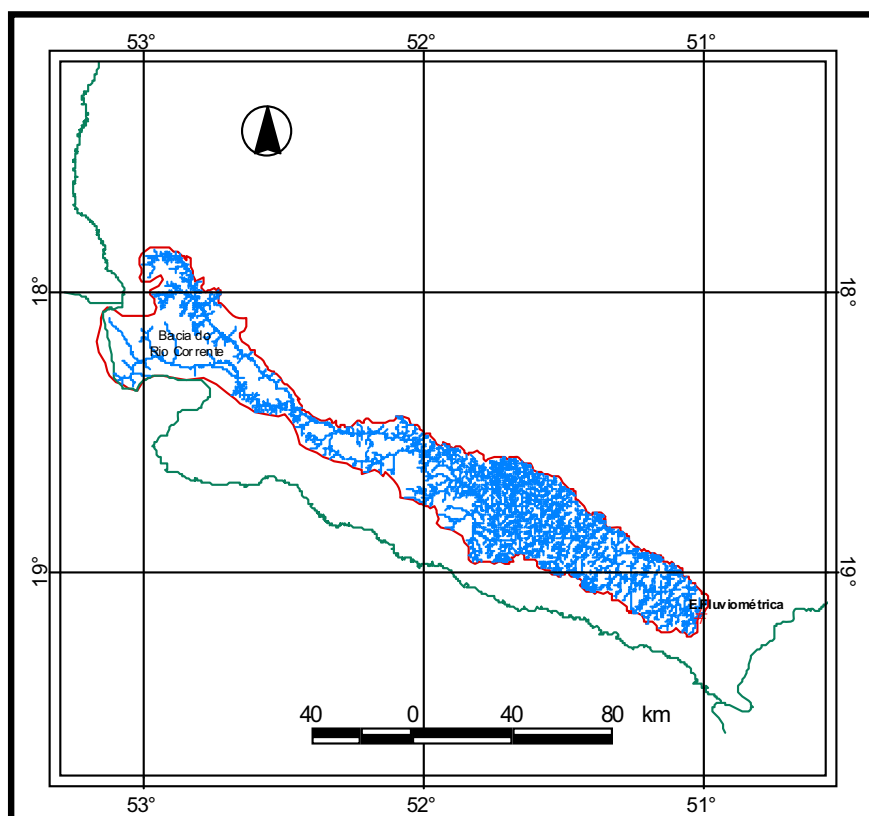


Figura 3.12 – Bacia em Grande Escala (Rio Corrente). Delimitada na escala 1:100.000.

3.2.4 Caracterização física das bacias

As características físicas das bacias hidrográficas foram calculadas para utilização no modelo hidrológico. Foram analisadas a área, comprimento do rio principal e a declividade da bacia.

A área, assim como o comprimento do rio principal, foram definidos em relação a um dado ponto ao longo do canal, no caso, a estação fluviométrica de referência, utilizando-se o *ArcView*, ferramenta que automatiza a obtenção da informação, com a utilização da extensão *Xtools*.

A declividade de uma bacia hidrográfica tem relação importante com vários processos hidrológicos, tais como a infiltração, o escoamento superficial e a umidade do

solo. A declividade média da bacia foi calculada a partir da diferença de cota (distância vertical) em relação à distância horizontal entre os pontos extremos, nascentes e exutório (estação fluviométrica).

A partir de mapas digitais de diversas fontes foram adquiridas as informações relativas aos tipos, ao uso e a cobertura do solo.

Em relação aos tipos de solos, dois aspectos foram importantes, a distribuição espacial dentro da bacia e o tipo textural, visto que texturas arenosas ou argilosas e suas variações afetam a infiltração, o escoamento superficial, subsuperficial, subterrâneo e consequentemente a vazão do rio, Figura 3.13.

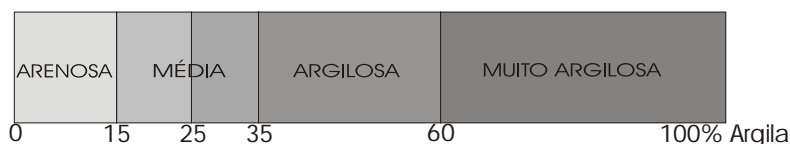


Figura 3.13 – Texturas de solos de acordo com a percentagem em argila (Mamede, 2001).

Da mesma forma as informações do uso e cobertura do solo, desempenham papel fundamental na maior ou menor geração de escoamento superficial, considerando a influência na impermeabilização de áreas da bacia.

3.2.5 Modelo Hidrológico

3.2.5.1 Simulação

Para desenvolver as simulações no HEC-HMS foi necessário executar uma série de etapas:

1ª etapa: criação de um projeto para armazenamento de todos os dados e informações requeridos para a modelagem;

2ª etapa: efetivação da “entrada” dos valores das séries temporais relativas à precipitação e vazão;

3ª etapa: definição das características físicas da bacia, a partir da criação e edição de um modelo de bacia. Este modelo representa as propriedades físicas da bacia hidrográfica.

O desenvolvimento do modelo se dá pela adição e conexão de elementos hidrológicos (sub-bacias, canais, reservatórios, confluências de drenagens, derivação e fontes). Estes elementos utilizam modelos matemáticos para descrever os processos físicos em uma bacia hidrográfica.

O elemento sub-bacia é utilizado na representação física da bacia. É neste elemento em que serão definidos os métodos de perdas, de transformação do escoamento e do fluxo de base, entre outros, que caracterizam o comportamento da bacia.

4ª etapa: definição de um modelo meteorológico para o cálculo da precipitação de "entrada" para cada bacia. Para isso um conjunto de métodos é disponibilizado pelo HEC-HMS. Nesta pesquisa o método utilizado foi o de especificar hietogramas para cada uma das bacias analisadas.

5ª etapa: combinação dos modelos da bacia, meteorológicos e especificações de controle para execução da simulação. As especificações de controle ajustam o tempo de simulação. Informações para as especificações de controle incluem uma data e hora de início, data e hora de término e o tempo utilizado na simulação. Neste estudo os modelos utilizados foram:

- *Curve Number (CN)* do *Soil Conservation Service (SCS)*: estima o excesso de precipitação como uma função da precipitação acumulada, tipo de cobertura e de uso do solo e umidade inicial. O HEC-HMS associa valores de uma abstração inicial (20% do potencial de infiltração máximo), o CN e a percentagem de impermeabilização da bacia;
- *SCS Unit Hydrograph*: este método utiliza o Tempo de Retardo (*Time Lag*), que redistribui no tempo a chuva efetiva, simulando seu deslocamento na bacia, sendo conceitualmente o comprimento de tempo entre o centro de massa da precipitação e o pico de fluxo da hidrógrafa resultante.

$$T_{Lag} = 2.587.L^{0.8} (1000/CN-9)^{0.7} / 1900.i^{0.5} \text{ (Soil Conservation Service, SCS -1975)}$$

Sendo:

L= comprimento do rio

i= declividade da bacia

- Recessão: este método representa o relacionamento entre o fluxo superficial e subterrâneo. Este modelo considera uma determinada condição inicial, a vazão inicial e uma constante de recessão que indica como se comporta o fluxo de base entre eventos, assim como, algumas relações de reajuste deste fluxo.

6ª etapa: execução do modelo (simulações e calibração) e análise dos resultados, modificação dos parâmetros e especificações de controle se necessário.

3.2.5.2 Calibração

Após a execução da simulação, foram realizados os procedimentos de calibração procurando se ajustar os parâmetros iniciais aos resultados obtidos nas simulações, na tentativa de aproximá-los o mais possível. Foram utilizados três métodos de função objetivo: *Peak – Weighted RMS Error*, *Percent Error Peak* e *Time-Weight Error*.

Funções objetivo utilizadas para calibração pelo HEC HMS:

a) *Percent Error Peak*:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{obs} - Q_{sim}|}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}}$$

b) *Peak – Weighted RMS Error/Time Error Peak*

$$P = \left[\frac{\sum_{i=1}^n |Q_{obs} - Q_{sim}|^2}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}^2} \right]^{1/2}$$

Sendo:

Z = função objetivo

NQ = número de ordenadas da hidrógrafa calculada

$Q_0(t)$ = fluxo observado

$Q_s(t)$ = fluxo calculado

$Q_0(\text{peak})$ = pico observado

$Q_0(\text{mean})$ = média do fluxo observado

$Q_s(\text{peak})$ = pico calculado

3.2.6 Análise e apresentação dos resultados

A última etapa consistiu da descrição detalhada das etapas realizadas e a análise e interpretação dos resultados das simulações executadas. As informações e conclusões obtidas durante as atividades executadas foram então sistematizadas, apresentadas e disponibilizadas à consulta.

4 RESULTADOS

4.1 PARÂMETROS

A partir dos dados obtidos nas diferentes escalas cartográficas, 1:1.000.000, 1:250.000 e 1:100.000, foram realizadas uma série de simulações nos três níveis espaciais, em pequena, média e grande escala.

Os resultados dos cálculos para a caracterização físicas das bacias delimitadas, utilizados como dados de entrada na modelagem hidrológica são apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Características fisiográficas das bacias nas diferentes escalas cartográficas.

Escala da bacia	Escala cartográfica	Área (km ²)	Percentagem em relação escala 1:100.000	Comprimento do rio (km)	Percentagem em relação escala 1:100.000	Desnível do rio (m)	Percentagem em relação escala 1:100.000
Pequena	1:1.000.000	7	100%	1,42	83,5%	46	47,9%
	1:250.000	6	85,7%	2,01	118,2%	106	110,4%
	1:100.000	7	-	1,70	-	96	-
Média	1:1.000.000	989	101,5%	54,0	98,7%	250	80,6%
	1:250.000	992	101,8%	54,2	99,0%	250	80,6%
	1:100.000	974	-	54,7	-	310	-
Grande	1:1.000.000	6806	100,9%	269,0	95,0%	400	88,8%
	1:250.000	6620	98,1%	275,0	97,1%	400	88,8%
	1:100.000	6745	-	283,0	-	450	-

4.1.1 Considerações

Em relação aos resultados apresentados observa-se que em termos de bases cartográficas distintas e diferentes metodologias de construção, erros de posicionamento ou de representação de feições podem ser significativos.

Menezes e Cruz (1999) afirmam que o problema de bases múltiplas é sério, uma vez que bases geradas com o mesmo equipamento, programas e documentos de apoio,

por dificuldades e diferenças operacionais, não serão idênticas. Acrescenta-se a isto, que tal constatação é observada tanto dentro de uma mesma escala cartográfica como entre escalas cartográficas distintas.

Neste estudo, na delimitação das bacias nas escalas espaciais definidas a partir das diferentes escalas cartográficas, observou-se variação nos valores obtidos, por mais padronizados ou automatizados fossem os procedimentos adotados, configurando-se certa aleatoriedade nos resultados, sem um padrão de variação de valores claramente definido.

A variação apresenta-se claramente identificada na pequena escala espacial, onde diferenças de valores para as áreas das bacias representam, em relação à escala de maior detalhe 1:100.000, 100 e 85,7% respectivamente, para 1:1.000.000 e 1:250.000.

Em relação ao comprimento do rio principal os valores representam 83,5% para a escala 1:1.000.000 e 118,2% na escala 1:250.000, do valor obtido em 1:100.000.

Para os valores obtidos em relação ao desnível do rio, os valores são de 42,9% para a escala 1:1.000.000 e 110,4% para a escala 1:250.000, quando comparados a escala 1:100.000.

De forma conclusiva, observou-se neste estudo, que quanto menor a escala espacial, maiores são as diferenças de valores nas diferentes escalas cartográficas, ou seja, quanto menor a área de trabalho, maiores as diferenças, fato este comprovado pelas menores variações nos valores, tanto para a média, como na grande escala espacial (Quadro 4.1).

4.2 SIMULAÇÕES - PEQUENA ESCALA – BACIA DO CÓRREGO CAPÃO DA ONÇA

4.2.1 Informações Hidrometeorológicas

As informações hidrológicas necessárias para o modelamento obtidas junto ao HIDROWEB relacionam-se aos valores de precipitação, vazão, cota e resumo da descarga.

Os dados de precipitação correspondem a estação pluviométrica E.T.A. Brazlândia (código 1548007), a mais próxima com dados disponíveis, localizada a aproximadamente 3 km da bacia em questão, e referem-se a um evento chuvoso no período de 4 a 10 de março de 1984. Os dados são apresentados no Quadro 4.2 e Figura 4.1.

Quadro 4.2 – Precipitação – valores observados na estação E.T.A. Brazlândia. Fonte: HIDROWEB.

Dia	4	5	6	7	8	9	10
Precipitação (mm)	0	0,4	0	44,7	0	2	1,2

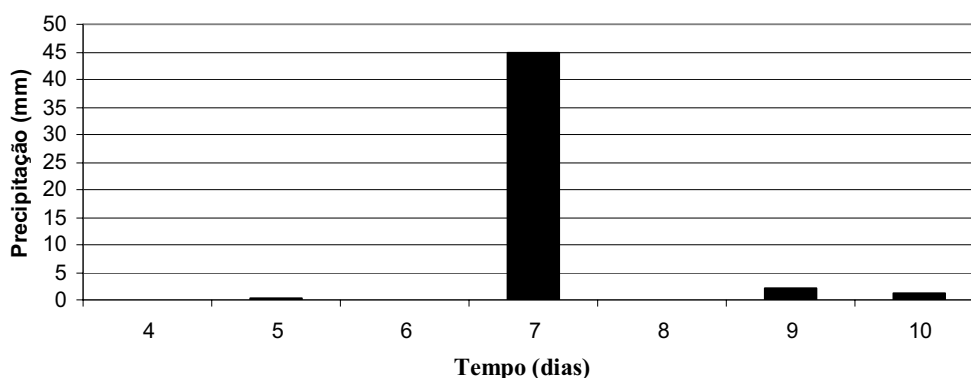


Figura 4.1 – Precipitação – valores observados na estação E.T.A. Brazlândia. Fonte: HIDROWEB.

Os dados de vazão correspondem à estação fluviométrica Capão da Onça (código 60434000) e referem-se ao período de 4 a 13 de março de 1984.

A partir do resumo da descarga na estação, utilizando dados de cota e vazão consistidos, foi construído o gráfico de dispersão (Figura 4.2) e obtida uma linha de tendência e o valor do R^2 . Obtendo-se a curva-chave, subsequentemente foi calculada a vazão a partir das medições de cotas disponíveis, obtendo-se a hidrógrafa correspondente ao ponto de interesse, Figura 4.3 e Quadro 4.3.

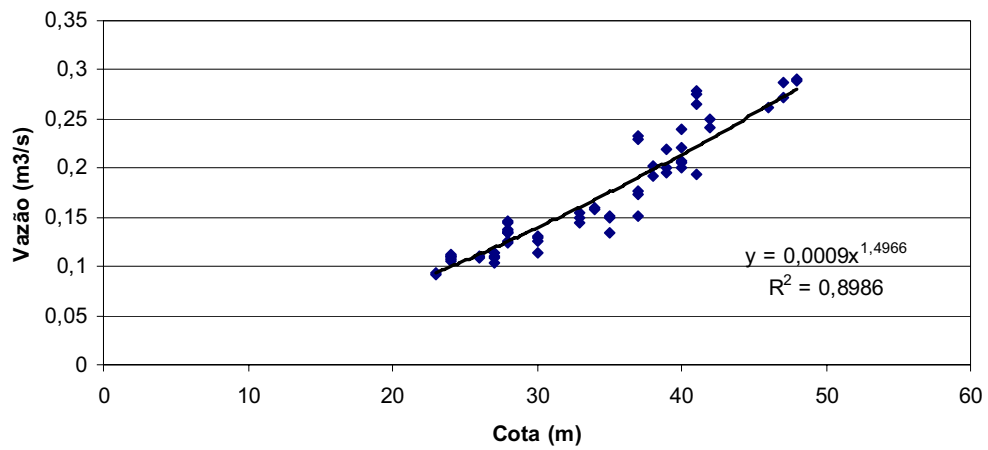


Figura 4.2 – Gráfico de dispersão cota x vazão e R^2 para a estação Capão da Onça.

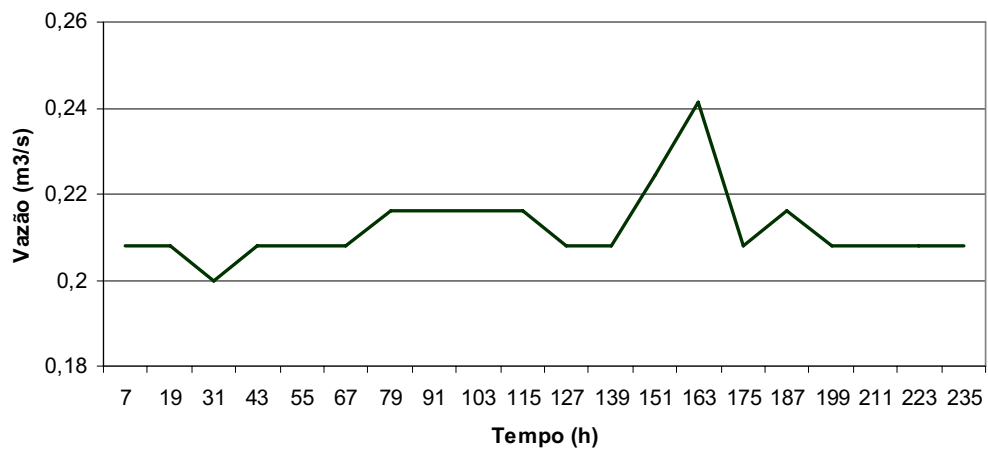


Figura 4.3 – Vazão observada na estação Capão da Onça.

Quadro 4.3 – Valores das vazões observadas na Estação Capão da Onça.

Dia	Tempo (h)	Cota (m)	Vazão m³/s
4	7	38	0,20
4	19	38	0,20
5	31	37	0,19
5	43	38	0,20
6	55	38	0,20
6	67	38	0,20
7	79	39	0,21
7	91	39	0,21
8	103	39	0,21
8	115	39	0,21
9	127	38	0,20
9	139	38	0,20
10	151	40	0,22
10	163	42	0,24
11	175	38	0,20
11	187	39	0,21
12	199	38	0,20
12	211	38	0,20
13	223	38	0,20
13	235	38	0,20

4.2.2 Simulações

A partir dos dados de entrada, foram realizadas as simulações para análise do comportamento da bacia hidrográfica de pequena escala em relação às diferentes escalas cartográficas.

Utilizando as características fisiográficas obtidas na etapa anterior foi construído o modelo que representa as características físicas da bacia, sendo informada a área da bacia, indicado o ponto de saída e definidos o método de perdas, de transformação do escoamento e de fluxo base.

Os elementos hidrológicos utilizam modelos matemáticos para a caracterização dos processos físicos na bacia. Os valores de parâmetros calculados para simulações em pequena escala são apresentados no Quadro 4.4. A comparação entre os valores observados e simulados são apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.4 - Parâmetros utilizados na simulação para pequena escala.

Área (km ²)	CN	Impermeabilidade (%)	Tempo de retardo (min.)	Descarga Inicial (m ³ /s)	Constante de Recessão	Perda inicial (mm)
Escala 1:1.000.000						
7	63*	8	235	0,085	0,5	29,8
Escala 1:250.000						
6	63*	8	396	0,085	0,5	29,8
Escala 1:100.000						
7	63*	8	356	0,085	0,5	29,8

*CN – Pastagens, normais em curva de nível com solos com escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila, pouco profundos e solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior parte de escoamento superficial. AMC I – solos secos. Ponderado por área.

Quadro 4.5 – Comparação de resultados observados e simulados.

Escala	Vazão de pico observada (m ³ /s)	Vazão de pico simulada (m ³ /s)	Volume observado (mm)	Precipitação efetiva (mm)
1:1.000.000	0,24	0,55	23,08	15,45
1:250.000	0,24	0,37	26,93	12,69
1:100.000	0,24	0,45	23,08	13,01

4.2.3 Calibração

A partir das simulações foram realizados procedimentos de calibração com a obtenção da função objetivo, para a análise do grau de variação entre as hidrógrafas observadas e simuladas. Foram utilizados três métodos: *Peak –Weighted RMS Error*, *Percent Error Peak* e *Time-Weight Error*. Estes métodos são utilizados como medida da “qualidade do ajuste” entre as hidrógrafas calculadas e observadas.

Os resultados obtidos a partir dos procedimentos de calibração para esta bacia hidrográfica podem ser visualizados, para cada escala cartográfica, nos quadros 4.6 a 4.8, onde são apresentados o resumo das informações sobre a função objetiva, parâmetros otimizados e o gráfico comparativo das hidrógrafas, observada e calibrada, figuras 4.4 e 4.5.

Quadro 4.6 – Resultados da Função Objetivo por escala cartográfica – Pequena Escala.

Método	Volume (mm)			Vazão de pico (m ³ /s)			
Escala 1:1.000.000							
	Sim.	Obs.	Diferença	Sim.	Obs.	Diferença	Valor F.O
1	12,09	23,08	-10,99	0,41	0,24	0,17	0,1
2	10,10	23,08	-12,98	0,33	0,24	0,09	36,9
3	14,37	23,08	-8,74	0,50	0,24	0,26	0,1
Escala 1:250.000							
1	13,14	26,93	-13,79	0,35	0,24	0,11	0,1
2	9,11	26,93	-17,82	0,24	0,24	0,00	0,1
3	16,05	26,93	-10,88	0,45	0,24	0,21	0,1
Escala 1:100.000							
1	12,07	23,08	-11,01	0,41	0,24	0,17	0,1
2	9,40	23,08	-13,68	0,30	0,24	0,06	23,3
3	14,24	23,08	-8,84	0,51	0,24	0,27	0,1

1- Método: *Peak –Weighted RMS Error* 3- Método: *Time-Weight Error*
 2- Método: *Percent Error Peak* Valor F.O – valor da função objetivo

Quadro 4.7 – Parâmetros calibrados por escala cartográfica – Pequena Escala

Método	CN		Tempo de Retardo (min.)		Perda inicial (mm)	
Escala 1:1.000.000						
	VI	VO	VI	VO	VI	VO
1	63	57	235	357	29,8	30,2
2	63	35	235	357	29,8	32,1
3	63	62	235	273	29,8	29,9
Escala 1:250.000						
1	63	64	396	458	29,8	29,1
2	63	52	396	903	29,8	30,3
3	63	73	396	459	29,8	28,0
Escala 1:100.000						
1	63	57	356	361	29,8	30,2
2	63	35	356	530	29,8	30,9
3	63	64	356	333	29,8	28,6
1- Método: <i>Peak –Weighted RMS Error</i> 2- Método: <i>Percent Error Peak</i> 3- Método: <i>Time-Weight Error</i>				VI – Valor Inicial VO- Valor otimizado		

Quadro 4.8 – Comparação de resultados entre escalas cartográficas – Pequena Escala.

Método	Vazão de Pico (m ³ /s)		Precipitação efetiva (mm)	Volume total observado (mm)
	VOt	VOb		
Escala 1:1.000.000				
1	0,41	0,24	5,32	23,08
2	0,33	0,24	4,96	23,08
3	0,50	0,24	5,65	23,08
Escala 1:250.000				
1	0,35	0,24	5,96	26,93
2	0,24	0,24	5,04	26,93
3	0,45	0,24	7,26	26,93
Escala 1:100.000				
1	0,41	0,24	5,34	23,08
2	0,30	0,24	4,43	23,08
3	0,51	0,24	6,09	23,08
1- Método: <i>Peak-Weighted RMS Error</i> 2- Método: <i>Percent Error Peak</i> 3- Método: <i>Time-Weight Error</i>			VOt – Valor otimizado VOb – Valor observado	

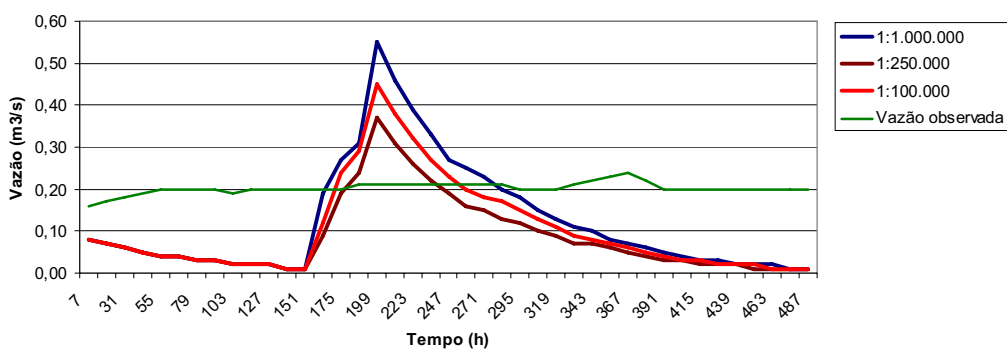


Figura 4.4 - Comparação das hidrógrafas obtidas por simulação com a vazão observada nas diferentes escalas espaciais. Bacia em pequena escala.

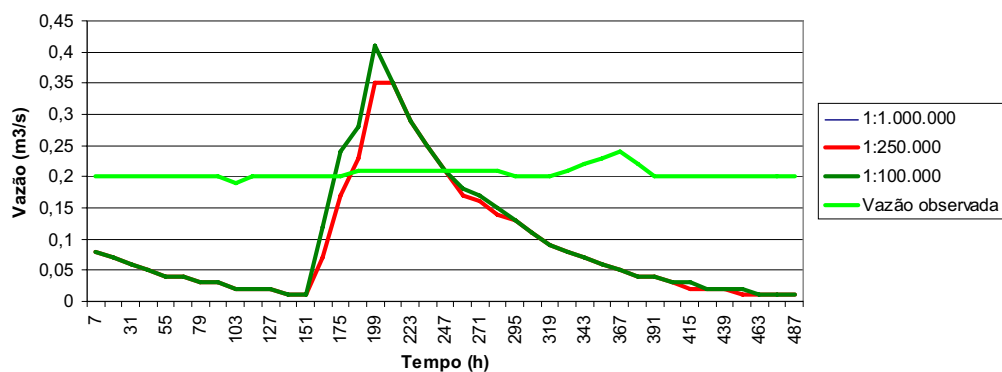


Figura 4.5 - Comparação das hidrógrafas obtidas por calibração com a vazão observada nas diferentes escalas espaciais. Bacia em pequena escala. A hidrógrafa referente à escala 1:1.000.000, coincide com a da escala 1:100.000. Método *Peak-Weighted RMS Error*.

4.2.4 Considerações

Para esta escala espacial, quando comparados os resultados das três escalas cartográficas, para a vazão de pico tem-se que a vazão observada representa 44 a 64% da vazão simulada pelo modelo e que os valores da precipitação efetiva simulada representam 47 a 67 % do volume observado.

Quando considerados os valores dos parâmetros estimados inicialmente, observa-se que entre as diferentes escalas a variação é pequena para o CN e para a perda inicial e considerável para o tempo de retardo.

Para o CN, o valor otimizado varia entre 90 e 101% do valor inicial, na escala 1:1.000.000, entre 55 e 101% na 1:250.000 e 98 e 115% na escala 1:100.000, dependendo do método da função objetivo utilizado.

Em relação ao tempo de retardo comparando os valores dentro da mesma escala cartográfica variam entre 101 e 151% do valor inicial, na escala 1:1.000.000, entre 148 e 228% na 1:250.000 e 93 e 115% na escala 1:100.000.

A perda inicial variou em função do método utilizado, variando entre 97 e 101% do valor inicial, na escala 1:1.000.000, entre 101 e 107% na 1:250.000 e 93 e 100% na escala 1:100.000.

Após os procedimentos de calibração nos três métodos de função objetivo utilizados nota-se que a diferença entre os valores observados e simulados se mantém muito próxima quando analisadas as diferentes escalas cartográficas dentro do mesmo método, apontando para uma pequena influência da escala sobre os resultados da modelagem.

Tal fato, igualmente é observado quando comparados os valores observados e os obtidos posteriormente a simulação e calibração do modelo.

As hidrógrafas obtidas para as três escalas cartográficas são semelhantes, mesmo considerando a diferença para a hidrógrafa observada. Para esta escala espacial os resultados da modelagem não se ajustaram aos valores observados.

Tal diferença nos resultados pode ser explicada pela distância entre a estação pluviométrica e a bacia hidrográfica, pois, caso esta tenha sido uma chuva convectiva, a precipitação observada na estação pode não ter ocorrido sobre a bacia.

A diferença encontrada também pode ser explicada, também, pelo pequeno tempo de concentração em uma bacia deste tamanho, quando comparado ao intervalo de tempo entre cada valor observado de escoamento.

4.3 SIMULAÇÃO - MÉDIA ESCALA – BACIA DO RIO AREIAS

4.3.1 Informações hidrometeorológicas

Para cálculo da precipitação na bacia delimitada foram utilizadas as estações pluviométricas Pirenópolis (1548003), Jatobazinho (1548009), Fazenda Marajá (1548011) e Ponte Anápolis - Brasília (1648001).

No cálculo da precipitação média na bacia foi utilizado o método dos polígonos de *Thiessen*, que calcula a precipitação média a partir da área de influência de cada estação (Figura 4.6). As áreas de influência em relação à área total das bacias, para cada estação pluviométrica são apresentadas no Quadro 4.9.

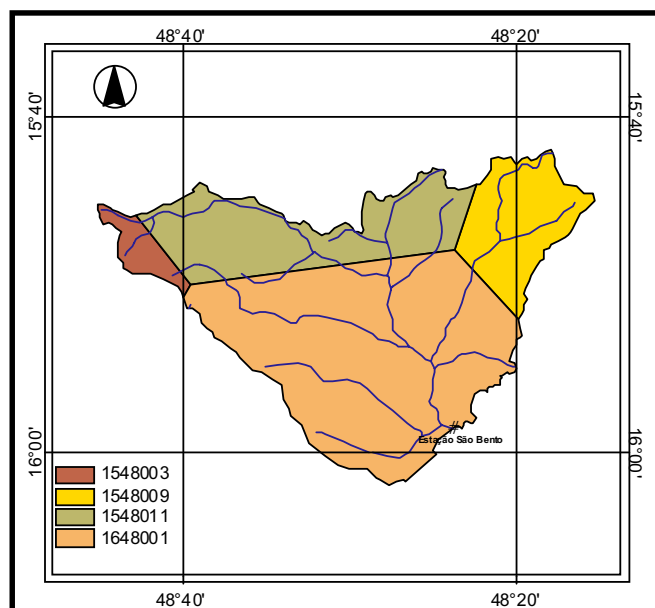


Figura 4.6 – Polígonos de *Thiessen* utilizados no cálculo da precipitação. Informações cartográficas na escala 1:1.000.000.

Quadro 4.9 – Relação área total e áreas de influência de cada estação pluviométrica. Escala cartográfica de referência 1:1.000.000

Estação	Área de Influência (km ²)	Percentual (%)	Área Total (km ²)
1548011	236	23,8	989
1548009	142	14,3	
1648001	559	56,5	
1548003	34	3,4	

O Quadro 4.10 apresenta os valores obtidos no cálculo da precipitação na bacia em questão. A Figura 4.7 apresenta a precipitação média na bacia e a Figura 4.8 a precipitação média em cada estação.

Quadro 4.10 – Precipitação média calculada. Bacia do Rio Areias. Janeiro de 2005.

Estação	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1548003	0,02	0,07	2,79	0,00	0,00	0,90	1,31	0,40	0,96	0,93	0,04
1548009	1,07	0,63	2,66	0,74	0,00	0,00	0,85	0,00	0,79	0,00	0,79
1548011	4,67	0,00	0,00	0,61	2,43	7,22	2,07	1,22	1,90	3,21	6,59
1648001	0,00	0,00	15,09	0,00	0,00	0,17	5,59	0,00	4,47	1,12	0,00
Total (mm)	5,76	0,70	20,54	1,35	2,43	8,28	9,81	1,61	8,11	5,26	7,42

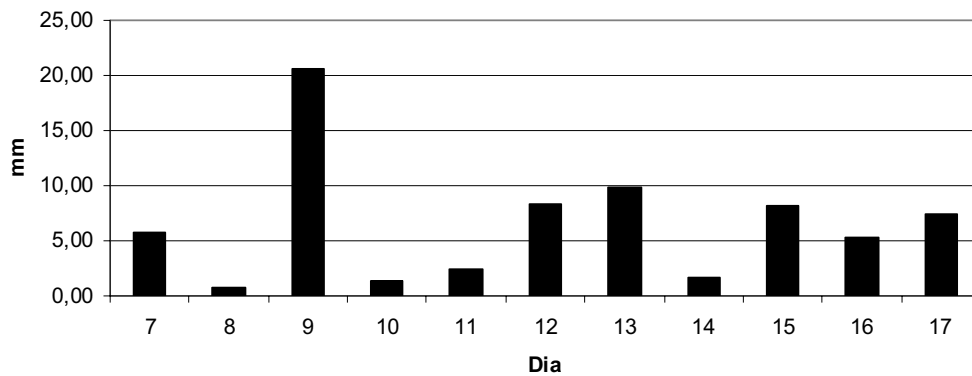


Figura 4.7 – Precipitação média na Bacia do Rio Areias. Janeiro de 2005.

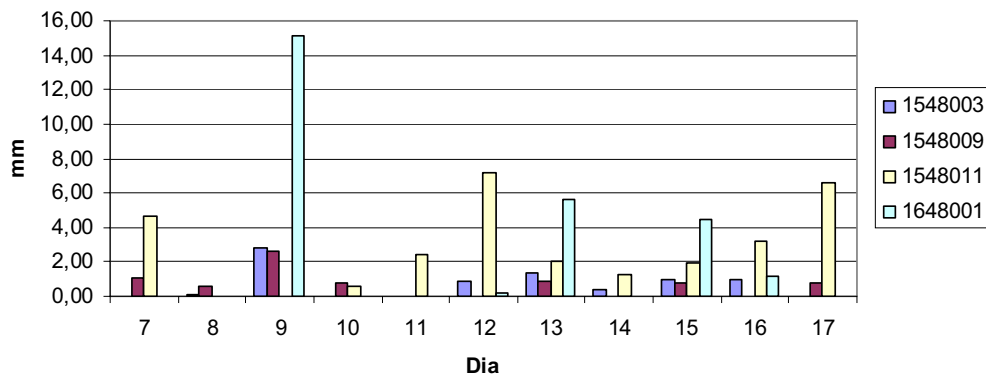


Figura 4.8 – Precipitação por estação pluviométrica. Bacia do Rio Areias.

A partir do resumo da descarga na estação, utilizando dados de cota e vazão consistidos, foi construído o gráfico de dispersão (Figura 4.9) e obtida uma linha de tendência e o valor do R^2 . Obtendo-se a curva-chave, subsequentemente foi calculada a vazão a partir das medições de cotas disponíveis, obtendo-se a hidrógrafa correspondente ao ponto de interesse (Figura 4.10 e Quadro 4.11).

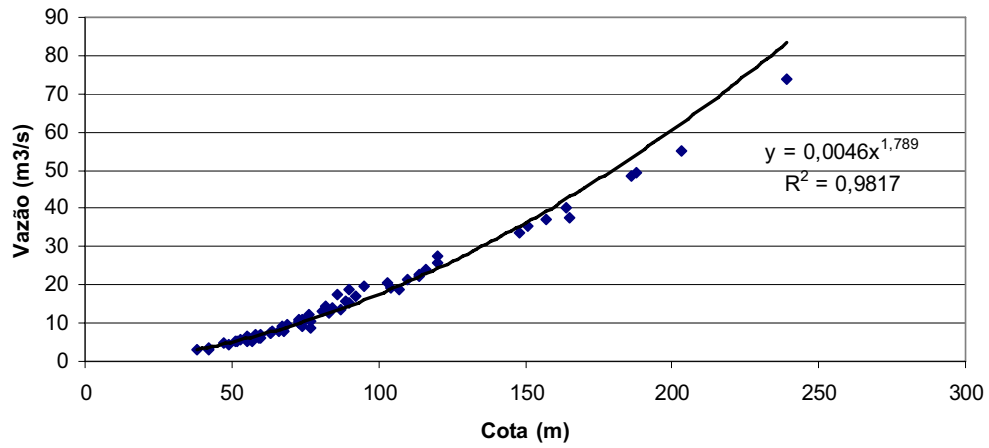


Figura 4.9– Gráfico de dispersão cota x vazão para a estação fluviométrica Fazenda São Bento.

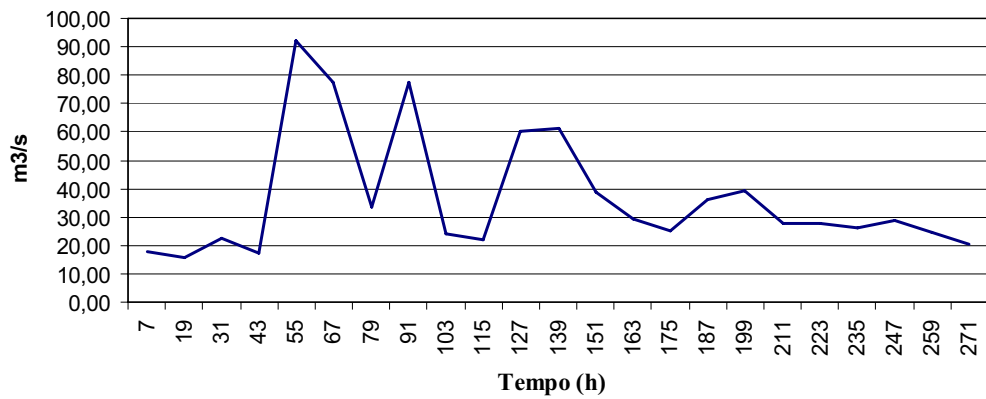


Figura 4.10 – Vazões observadas. Estação fluviométrica Fazenda São Bento.

Quadro 4.11 – Valores de vazões observadas. Estação Fazenda São Bento.

Tempo (h)	Vazão (m³/s)
7	18,04
19	15,88
31	22,35
43	17,41
55	92,26
67	77,25
79	33,42
91	77,25
103	24,12
115	22,01
127	60,16
139	61,24
151	38,57
163	29,39
175	25,21
187	35,96
199	39,46
211	27,84
223	27,84
235	26,32
247	28,61
259	24,85
271	20,64

4.3.2 Simulação

A partir dos dados de entrada, foram realizadas as simulações para análise do comportamento da bacia hidrográfica de média escala em relação às diferentes escalas cartográficas.

Os valores de parâmetros calculados para simulações em pequena escala são apresentados no Quadro 4.12. A comparação entre os valores observados e simulados são apresentados no Quadro 4.13.

Quadro 4.12 - Parâmetros de simulação para média escala.

Área (km ²)	CN	Impermeabilidade (%)	Tempo de retardo (min.)	Descarga Inicial (m ³ /s)	Constante de Recessão	Perda inicial (mm)
Escala 1:1.000.000						
989	60*	3	1820	0,45	0,5	33,8
Escala 1:250.000						
992	56**	3	1720	0,45	0,5	33,8
Escala 1:100.0000						
974	56**	3	1918	0,45	0,5	33,8

* CN – solos textura média e média argilosa com campos normais de baixa transpiração. Ponderado por área. AMC II, situação de solos que correspondem à umidade da capacidade de campo.

** CN - solos de textura média a cascalhenta, média e muito argilosa em florestas esparsas (Cerrado). Ponderado por área. AMC II, situação de solos que correspondem à umidade da capacidade de campo.

Quadro 4.13 – Comparação de resultados observados e simulados.

Escala	Vazão de pico observada (m ³ /s)	Vazão de pico simulada (m ³ /s)	Volume observado (mm)	Precipitação efetiva (mm)
1:1.000.000	92,00	13,10	3,13	34,01
1:250.000	92,00	8,82	2,29	33,90
1:100.000	92,00	8,09	2,15	34,53

4.3.3 Calibração

A partir das simulações foram realizados procedimentos de calibração com a obtenção da função objetivo, para a análise do grau de variação entre as hidrógrafas observadas e simuladas. Para esta escala espacial foram utilizados três métodos: *Peak – Weighted RMS Error*, *Percent Error Peak* e *Time-Weight Error*.

Os resultados obtidos a partir dos procedimentos de calibração para esta bacia hidrográfica podem ser visualizados, para cada escala cartográfica, nos quadros 4.14 a 4.16, onde são apresentados o resumo das informações sobre a função objetivo, parâmetros otimizados e o gráfico comparativo das hidrógrafas, observada e calibrada, figuras 4.11 e 4.12.

Quadro 4.14 – Resultados da Função Objetivo por escala cartográfica – Média Escala.

Método	Volume (mm)			Vazão de Pico (m ³ /s)			
	Sim	Obs	Diferença	Sim	Obs	Diferença	Valor F.O
Escala 1:1.000.000							
1	11,01	34,53	-23,22	44,86	92,00	-47,14	43,3
2	36,17	34,53	1,64	92,84	92,00	0,84	0,9
3	8,31	34,53	-26,22	37,36	92,00	-54,2	14,1
Escala 1:250.000							
1	31,30	33,90	-2,60	65,61	92,00	-26,39	43,3
2	33,63	33,90	-0,27	92,97	92,00	0,27	0,3
3	10,42	33,90	-23,42	32,54	92,00	-54,46	12,9
Escala 1:100.000							
1	37,78	34,53	3,25	72,91	92,00	-19,09	29,9
2	34,73	34,53	0,20	92,00	92,00	0,00	0
3	10,58	34,53	0,20	37,56	92,00	-54,44	12,9

1- Método: *Peak-Weighted RMS Error* 3- Método: *Time-Weight Error*
 2- Método: *Percent Error Peak* Valor F.O – valor da função objetivo

Quadro 4.15 – Parâmetros calibrados por escala cartográfica – Média Escala

Método	CN		Tempo de Retardo (min.)		Perda inicial (mm)	
	VI	VO	VI	VO	VI	VO
Escala 1:1.000.000						
1	60	84	1820	776	34	31
2	60	98	1820	776	34	21
3	60	86	1820	1678	34	31
Escala 1:250.000						
1	56	80	1720	484	40	5,16
2	56	98	1720	683	40	25,00
3	56	78	1720	1079	40	25,00
Escala 1:100.000						
1	56	81	1918	242	40	5,00
2	56	99	1918	819	40	22,00
3	56	79	1918	1203	40	25,00
1- Método: <i>Peak-Weighted RMS Error</i> 2- Método: <i>Percent Error Peak</i> 3- Método: <i>Time-Weight Error</i>					VI – Valor Inicial VO - Valor otimizado	

Quadro 4.16 – Comparação de resultados entre escalas cartográficas – Média Escala.

Método	Vazão de Pico (m ³ /s)		Precipitação efetiva otimizada (mm)	Volume total observado (mm)
	VOt	VOb		
Escala 1:1.000.000				
1	44,86	92,00	13,23	34,53
2	92,84	92,00	37,36	34,53
3	37,76	92,00	14,24	34,53
Escala 1:250.000				
1	65,61	9200	27,43	33,90
2	92,27	92,00	33,70	33,90
3	37,54	92,00	13,58	33,90
Escala 1:100.000				
1	72,91	92,00	28,25	34,53
2	92,00	92,00	36,54	34,53
3	37,56	92,00	14,36	34,53

1- Método: *Peak –Weighted RMS Error*
 2- Método: *Percent Error Peak*
 3- Método: *Time-Weight Error*

VOt – Valor otimizado
 VOb – Valor observado

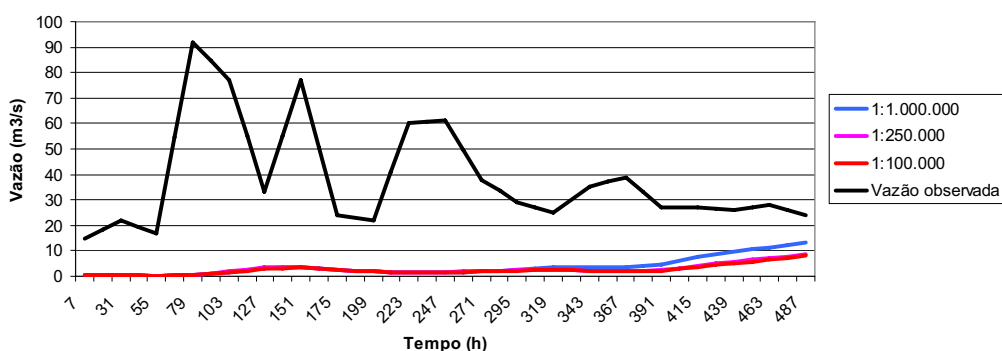


Figura 4.11 - Comparação das hidrógrafas obtidas por simulação nas diferentes escalas espaciais com a vazão observada. Bacia em média escala.

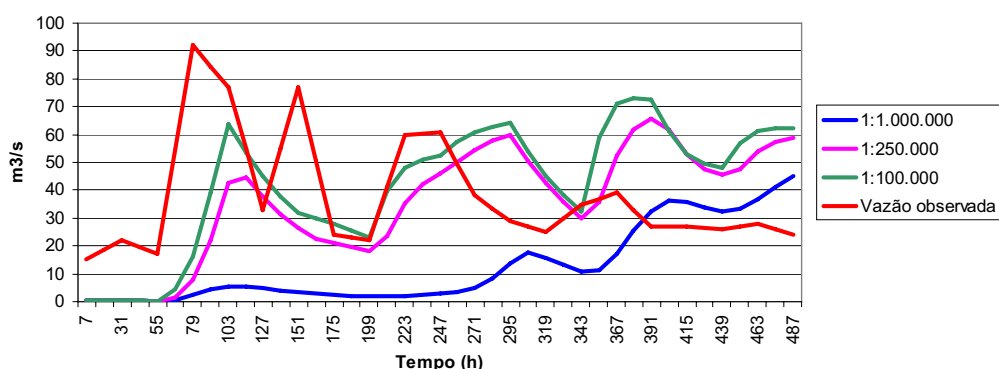


Figura 4.12 - Comparação das hidrógrafas obtidas posterior a calibração nas diferentes escalas espaciais com a vazão observada. Bacia em média escala. Método *Peak –Weighted RMS Error*.

4.3.4 Considerações

Para esta escala espacial, os resultados obtidos por simulação para a vazão de pico nas escalas 1:1.000.000, 1:250.000 e 1:100.000 representam respectivamente 8,79, 9,58 e 14,24 % da observada. Comparando o volume observado, este representa 9,20, 6,75 e 6,22 % da precipitação efetiva nas escalas 1:1.000.000, 1:250.000 e 1:100.000.

Nesta escala espacial, quando considerados os parâmetros estimados inicialmente, observa-se para o CN que a variação entre as três escalas cartográficas, quando existe, é muito pequena. Variações ocorrem entre os diferentes métodos de função objetivo.

Para os outros dois parâmetros, tempo de retardo e perda inicial, os valores variam em maior proporção tanto entre as escalas como entre os métodos. O tempo de retardo otimizado varia entre 12 e 42% (1:1.000.000), 39 e 42% (1:250.000) e 62 e 92% (1:100.000) do valor observado. Por sua vez, a perda inicial otimizada, varia entre 13 e 91%, 55 e 62% e 62 e 91%, respectivamente nas escalas 1:1.000.000, 1:250.000 e 1:100.000.

Após os procedimentos de calibração nos três métodos de função objetivo utilizados nota-se que a diferença entre os valores de pico e de volume observados e simulados se mantém muito próxima quando analisadas as diferentes escalas cartográficas dentro do mesmo método, apontando para uma pequena influência sobre os resultados da modelagem.

Tal fato, igualmente é observado quando comparados os valores observados e os obtidos posteriormente a calibração do modelo.

Para esta escala espacial, o método da função objetivo *Percent Error Peak* apresentou os melhores resultados, com valores iguais a zero, configurando um melhor ajuste entre o observado e os resultados após a calibração.

Os dados disponíveis de precipitação referem-se a valores diários. Se os dados fossem referentes a intervalos de tempo menores o resultado final da modelagem poderia se aproximar ao observado. Nesta escala espacial o tempo de concentração é maior e a variação da vazão menor.

4.4 SIMULAÇÃO – GRANDE ESCALA – BACIA DO RIO CORRENTE

4.4.1 Informações hidrometeorológicas

Para cálculo da precipitação média na bacia foi utilizado o método dos polígonos de *Thiessen*. As estações pluviométricas utilizadas foram: Fazenda São Domingos (1752002), Itarumã (1851002), Serranópolis (1851005), Aporé (1852000), Fazenda Taquari (1853000), Ponte São Domingos (1950011) e Itajá (1951001).

O Quadro 4.17 apresenta as estações utilizadas com suas respectivas áreas de influência em relação ao total da bacia e o Quadro 4.18 apresenta os resultados obtidos para a precipitação média na bacia considerada. As figuras 4.13 a 4.15 apresentam respectivamente os polígonos gerados, os valores calculados por estação pluviométrica e a precipitação média na bacia no período de 20 de janeiro a 5 de fevereiro de 2005.

Quadro 4.17 – Área de influência das estações pluviométricas utilizadas.

Estação	Área de influência (km²)	%	Área Total
1752002	1463,8	21,70	6740 km ²
1851002	1306,3	19,37	
1851005	1422,2	21,09	
1852000	1124,1	16,67	
1853000	559	8,29	
1950011	168,5	2,50	
1951001	700,9	10,39	

Quadro 4.18 – Precipitação média na bacia.

Dia	Precipitação (mm)
20	5,4
21	12,1
22	10,1
23	5,3
24	5,4
25	8,9
26	2,8
27	30,5
28	7
29	10,2
30	5,7
31	14,1
1	1,7
2	7,4
3	8,7
4	2,8
5	0,9

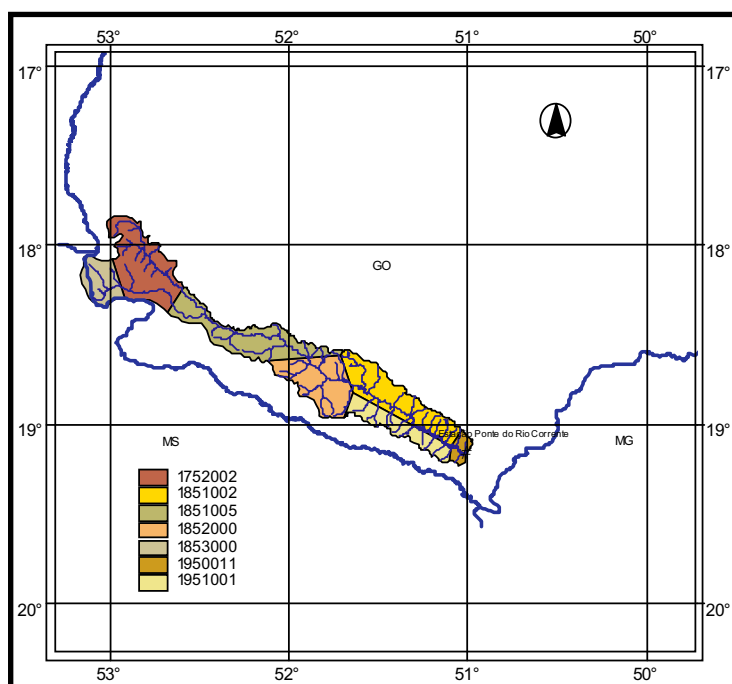
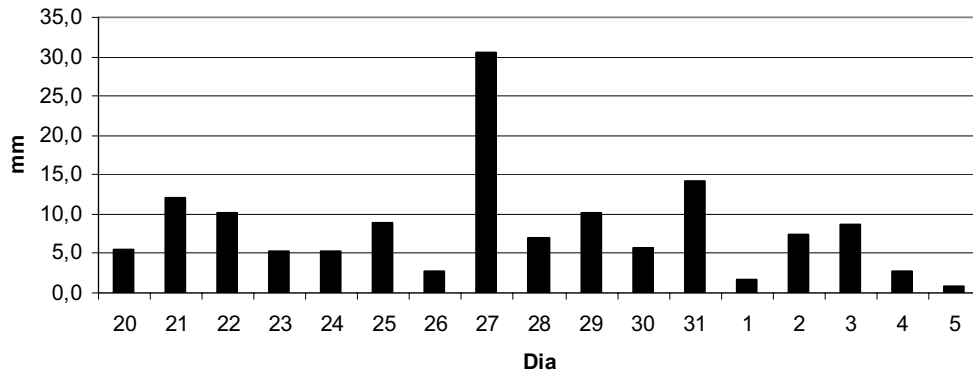


Figura 4.13 – Polígonos de Thiessen e estações pluviométricas utilizadas no cálculo da precipitação média na bacia do rio Corrente.



4.14 – Precipitação média na bacia do rio Corrente.

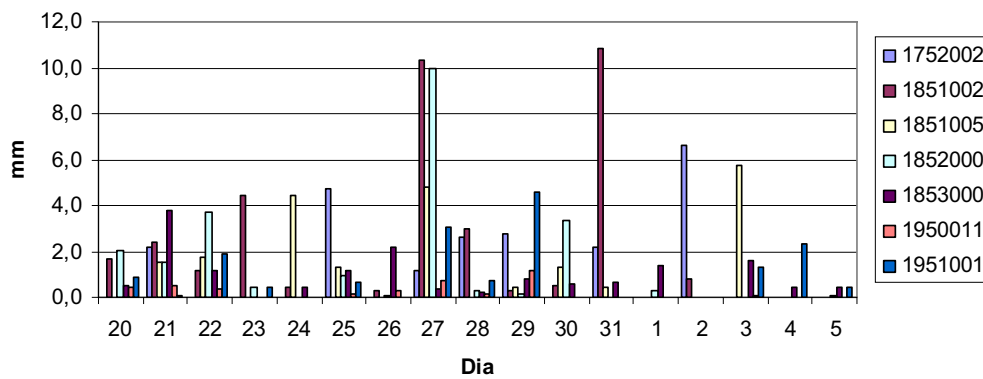


Figura 4.15 – Precipitação por estação fluviométrica – Bacia do Rio Corrente.

A partir do resumo da descarga na estação, utilizando dados de cota e vazão consistidos, foi construído o gráfico de dispersão (Figura 4.16) e obtida uma linha de tendência e o valor do R^2 . Obtendo-se a curva-chave, subsequentemente foi calculada a vazão a partir das medições de cotas disponíveis, obtendo-se a hidrógrafa correspondente ao ponto de interesse (Figura 4.17 e Quadro 4.19).

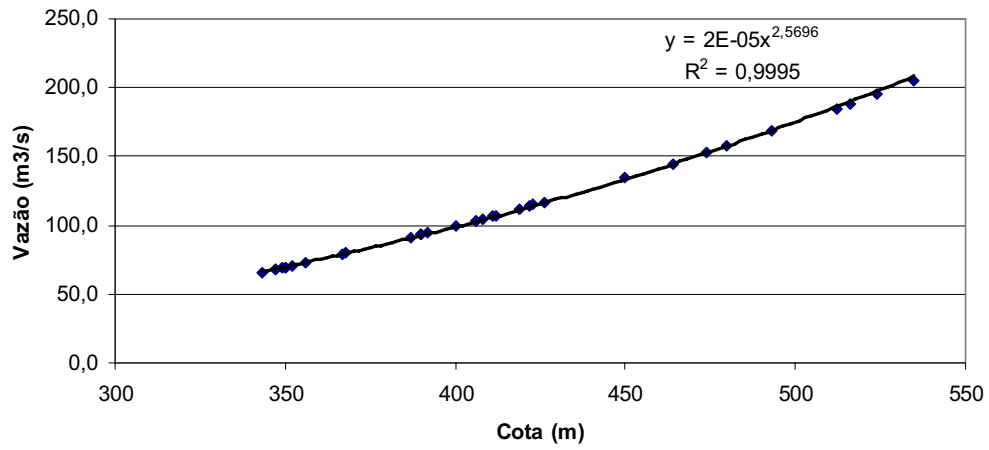


Figura 4.16 – Gráfico de dispersão cota x vazão calculada para a estação Ponte do Rio Corrente.

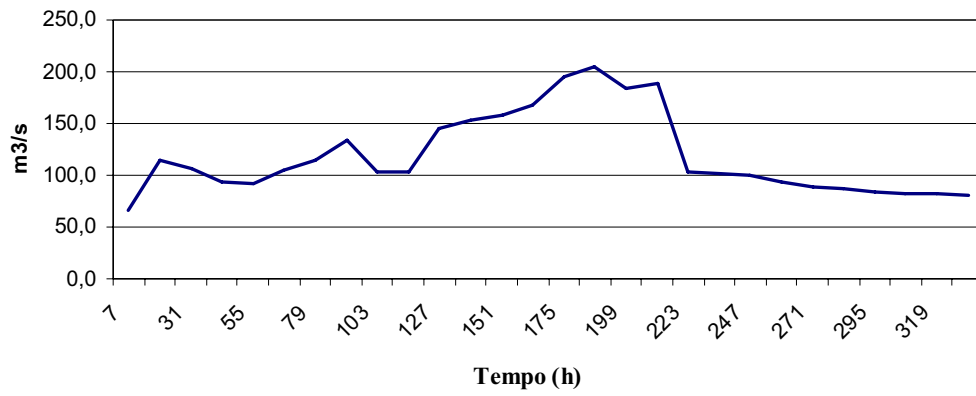


Figura 4.17 – Vazão observada na estação da Ponte do Rio Corrente.

Quadro 4.19 – Vazões observadas.

Dia	Tempo (h)	Cota (m)	Vazão (m ³ /s)
23	7	343	65,7
23	19	422	114,2
24	31	411	106,7
24	43	392	94,3
25	55	387	91,1
25	67	408	104,7
26	79	423	114,8
26	91	450	134,3
27	103	406	103,3
27	115	406	103,3
28	127	464	145,0
28	139	474	152,9
29	151	480	157,7
29	163	493	168,4
30	175	524	195,2
30	187	535	205,2
31	199	512	184,6
31	211	516	188,1
1	223	406	103,3
1	235	404	102,0
2	247	400	99,4
2	259	390	93,0
3	271	383	88,7
3	283	380	86,8
4	295	376	84,4
4	307	373	82,6
5	319	372	82,0
5	331	371	81,4

4.4.2 Simulação

A partir dos dados de entrada, foram realizadas as simulações para análise do comportamento da bacia hidrográfica de grande escala em relação às diferentes escalas cartográficas.

Os valores de parâmetros calculados para simulações em grande escala são apresentados nos quadros 4.20 e 4.21.

Quadro 4.20 – Parâmetros de simulação para Bacia do Rio Corrente – Grande Escala.

Área (km ²)	CN	Impermeabilidade (%)	Tempo de retardo (min.)	Descarga Inicial (m ³ /s)	Constante de Recessão	Perda inicial (mm)
Escala 1:1.000.000						
6806	78	0	5087	48,40	0,5	71,76
Escala 1:250.000						
6620	74	0	3613	48,40	0,5	89,2
Escala 1:100.000						
6740	74	0	3818	48,40	0,5	89,2

* CN – solos de textura média (65-85% areia) e uso do solo ponderado por área, pastagens 40%, agricultura 20% e cerrado 20%. Condições iniciais de umidade AMC III.

** CN – solos de textura média (70%) e muito argilosa (30%). Uso do solo ponderado por área, pastagens 40%, agricultura 20% e cerrado 20%. Condições iniciais de umidade AMC III.

Quadro 4.21 – Comparação de resultados.

Escala	Vazão de pico observada (m ³ /s)	Vazão de pico simulada (m ³ /s)	Volume observado (mm)	Precipitação efetiva simulada (mm)
1:1.000.000	205,0	93,58	3,06	20,11
1:250.000	205,0	48,00	1,18	20,67
1:100.000	205,0	48,00	1,14	20,30

4.4.3 Calibração

A partir das simulações foram realizados procedimentos de calibração com a obtenção da função objetivo, para a análise do grau de variação entre as hidrógrafas observadas e simuladas. Para esta escala espacial foram utilizados três métodos: *Peak – Weighted RMS Error*, *Percent Error Peak* e *Time-Weight Error*.

Os resultados obtidos a partir dos procedimentos de calibração para esta bacia hidrográfica podem ser visualizados, para cada escala cartográfica, nos quadros 4.22 a 4.24, onde são apresentados o resumo das informações sobre a função objetiva, parâmetros otimizados e o gráfico comparativo das hidrógrafas, observada e calibrada, figuras 4.18 e 4.19.

Quadro 4.22 – Resultados da Função Objetivo por escala cartográfica – Grande Escala.

Método	Volume (mm)			Vazão de Pico (m ³ /s)			Valor F.O
	Sim	Obs	Diferença	Sim	Obs	Diferença	
Escala 1:1.000.000							
1	4,86	20,11	-15,24	133,33	205,00	-71,67	121,5
2	6,11	20,11	-14,00	204,65	205,00	-0,35	0,2
3	4,53	20,11	-15,58	123,04	205,00	-81,91	57,01
Escala 1:250.000							
1	2,94	20,67	-17,73	110,43	205,00	-94,57	125,6
2	1,18	20,67	-19,49	48,00	205,00	-157,71	76,6
3	2,67	20,67	-18,00	105,71	205,00	-99,29	62,3
Escala 1:100.000							
1	1,13	20,30	-17,41	113,93	205,00	-91,07	125,7
2	1,14	20,30	-19,17	48,00	205,00	-157,00	76,6
3	2,40	20,30	-17,91	92,46	205,00	-112,54	62,5

1- Método: *Peak-Weighted RMS Error* 3- Método: *Time-Weight Error*
 2- Método: *Percent Error Peak* Valor F.O – valor da função objetivo

Quadro 4.23 – Parâmetros calibrados por escala cartográfica – Grande Escala

Método	CN		Tempo de Retardo (min.)		Perda inicial (mm)	
	VI	VO	VI	VO	VI	VO
Escala 1:1.000.000						
1	78	77	5087	4692	72	66
2	78	99	5087	7477	72	70
3	78	75	5087	4692	72	66
Escala 1:250.000						
1	74	92	3613	3415	89	85
2	74	74	3613	3613	89	89
3	74	94	3613	3500	89	87
Escala 1:100.000						
1	74	93	3818	3313	89	86
2	74	74	3818	3818	89	89
3	74	94	3818	3313	89	88
1- Método: <i>Peak-Weighted RMS Error</i> 2- Método: <i>Percent Error Peak</i> 3- Método: <i>Time-Weight Error</i>					VI – Valor Inicial VO- Valor otimizado	

Quadro 4.24 – Comparação de resultados entre escalas cartográficas – Grande Escala.

Método	Vazão de Pico (m ³ /s)		Precipitação efetiva (mm)	Volume total observado (mm)
	VOt	VOb		
Escala 1:1.000.000				
1	133,33	205,00	10,02	20,11
2	204,65	205,00	25,98	20,11
3	123,09	205,00	9,24	20,11
Escala 1:250.000				
1	110,43	205,00	5,53	20,67
2	48,00	205,00	1,01	20,67
3	105,71	205,00	5,39	20,67
Escala 1:100.000				
1	113,93	205,00	5,43	20,30
2	48,00	205,00	1,01	20,30
3	92,46	205,00	4,39	20,30
1- Método: <i>Peak – Weighted RMS Error</i>		VOt – Valor otimizado		
2- Método: <i>Percent Error Peak</i>		VOb – Valor observado		
3- Método: <i>Time-Weight Error</i>				

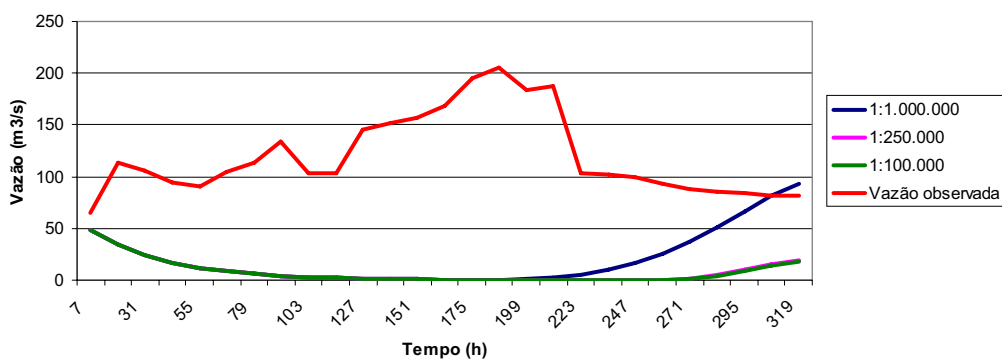


Figura 4.18 - Comparação das hidrógrafas obtidas por simulação nas diferentes escalas espaciais com a vazão observada. Bacia em grande escala. As curvas 1:100.000 e 1:250.000 coincidem.

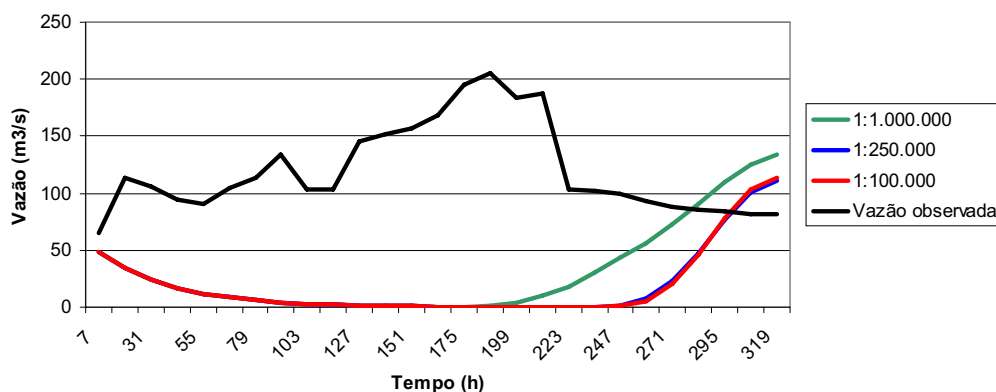


Figura 4.19 - Comparação das hidrógrafas obtidas posteriormente à calibração nas diferentes escalas espaciais com a vazão observada. Bacia em grande escala.

4.4.4 Considerações

Comparando os resultados para esta escala espacial, os valores da vazão de pico simulada variam entre 23 e 45% da vazão observada enquanto o volume observado entre 5,7 e 15% da precipitação efetiva obtida por simulação.

Comparando-se os valores inicialmente estimados e os obtidos na modelagem observa-se que para o CN os valores posteriores a calibração representam em média 115 % do CN estimado inicialmente a partir das bases cartográficas e temáticas.

O tempo de retardo otimizado representou em média 90% do valor inicialmente estimado na escala 1:1.000.000, 115% na escala 1:250.000 e 91% na escala 1:100.000.

A perda inicial estimada inicialmente em 72 mm na escala 1:1.000.000 e 89 nas escalas 1:250.000 e 1:100.00, em relação a perda inicial calculada representou, em média, 94% na escala 1:1.000.000, 99% na 1:250.000 e 95% na escala 1:100.000.

O método de calibração do *Percent Error Peak* apresenta melhores resultados quando comparado aos outros dois, apresentando valor próximo a zero nas três escalas cartográficas. Em relação às hidrógrafas obtidas, a escala 1:1.000.000, apresentou resultados diferentes quando comparados as escalas 1:250.000 e 1:100.000.

A modelagem hidrológica para grandes bacias utilizando o HEC HMS, na configuração proposta, a partir dos parâmetros calculados não apresentou bons resultados. Não foi obtido um bom ajuste entre as hidrógrafas observadas e simuladas. Tal fato pode ser explicado pela grande variação de algumas características físicas em

uma bacia desta escala espacial. Determinação do tipo de solo e uso e cobertura são de difícil mensuração nesta escala. Os valores estimados mesmo dentro de uma escala de observação de bom detalhe podem representar apenas uma média da situação real em uma bacia grande. Esta dificuldade, por exemplo, pode influenciar o cálculo da infiltração e consequentemente resultados do escoamento superficial. Calibrando-se o modelo, na tentativa de uma aproximação ao observado, obteve-se uma resposta mais aproximada. Nesta situação, recomenda-se a subdivisão do modelo em diferentes sub-bacias e canais.

Conceito importante em relação a esta escala espacial é o do hidrograma unitário que, conforme exposto anteriormente, representa a capacidade média da bacia em drenar a água da chuva. O hidrograma unitário é o hidrograma resultante de um escoamento superficial de volume unitário.

Para isto três princípios devem ser observados, sendo a primeira que para chuvas de iguais durações, as durações dos escoamentos superficiais correspondentes são iguais, a segunda é que para duas chuvas de mesma duração, mas com volumes escoados diferentes, resultam em hidrógrafas cujas ordenadas são proporcionais aos correspondentes volumes escoados. Por fim, considera-se que as precipitações anteriores não influenciam a distribuição no tempo do escoamento superficial de um evento chuvoso específico.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados encontrados pode-se chegar a um conjunto de considerações em relação aos resultados obtidos nesta pesquisa.

Os processos de delimitação e caracterização física das bacias hidrográficas nas três escalas espaciais definidas, pequena, média e grande escala, resultaram em valores variáveis com diferenças, mesmo quando adotados procedimentos automáticos. Tais diferenças podem ser resultados da maior ou menor exatidão na elaboração das bases cartográficas digitais ou na maior ou menor disponibilidade de dados.

Quando considerados os valores relativos às características fisiográficas das bacias hidrográficas observou-se variação em todos os parâmetros calculados. Em relação às áreas das bacias, esta variação foi de 1, 18 e 186 km², nas escalas 1:1.000.000, 1:250.000 e 1:100.000, respectivamente. Para o comprimento do rio principal, foram calculadas diferenças de 0,59, 0,70 e 14 km e para a diferença de nível 60, 60 e 50 metros, em 1:1.000.000, 1:250.000 e 1:100.000.

As diferenças, entretanto, não influenciaram os resultados das simulações obtidas pela modelagem hidrológica, quando consideradas as diferentes escalas cartográficas utilizadas. Com isto verifica-se que a definição da escala de trabalho para aquisição dos dados de entrada do modelo hidrológico, considerado neste trabalho, pouco interfere no seu resultado final. O uso de modelos mais refinados é ainda difícil, pois estes requerem dados de chuva e vazão disponíveis apenas em poucos locais, que na maior parte dos casos são centros de estudo de universidades. Tal dificuldade é ainda maior quando se trabalha com bacias de pequeno porte.

Verificou-se ainda que em relação às variações de resultados da modelagem hidrológica em função das diferenças nos valores dos parâmetros obtidos nas três escalas cartográficas não houve alteração nos valores obtidos nas simulações e posteriores aos procedimentos de calibração, quando comparadas as três escalas cartográficas. Fato este confirma a não influência da escala cartográfica nos resultados.

Em nenhuma das três escalas espaciais o modelo utilizado apresentou bom ajuste entre as hidrógrafas observadas, simuladas e otimizadas. A modelagem apresentou melhores resultados em média escala. Em pequena escala o modelo não conseguiu se ajustar aos valores observados, devido ao pequeno tempo de concentração na bacia quando comparados ao intervalo de tempo entre observações ou devido à distribuição

espacial da precipitação. Para grande escala, devido à heterogeneidade das características físicas em uma bacia hidrográfica nesta escala espacial e a dificuldade de representar os processos de modo concentrado.

Comparando-se os valores estimados inicialmente com os obtidos posteriormente a calibração do modelo, observou-se que em cada escala espacial um dos parâmetros variou em maior proporção que os outros dois analisados. Na bacia de pequena escala a maior diferença entre o estimado e o valor final foi em relação ao tempo de retardo, na bacia de média escala, foi o tempo de retardo e, na grande escala o CN. Em relação ao valor inicialmente estimado para o Tempo de Retardo, em pequena escala, o obtido posteriormente a calibração do modelo representou 114%. O tempo de retardo, em média escala, o valor inicial representou 46% do valor obtido pós-calibração e para as perdas iniciais, em grande escala, os valores do CN simulados representaram em média 13% do estimado inicialmente.

O primeiro caso deve-se principalmente ao problema de medição no local, que não conseguiu medir a vazão no rio devido ao grande intervalo entre as leituras. Para a bacia de médio porte, a fórmula do *Soil Conservation Service* (SCS) para o tempo de retardo não foi adequada uma vez que a mesma foi desenvolvida inicialmente para pequenas bacias, assim, deve-se ter cuidado ao se estimar tempo de retardo com base nesta equação.

Em relação à disponibilidade de dados e informações, existe um considerável banco de dados de informações hidrometeorológicas, principalmente o Hidroweb da Agência Nacional de Águas, o de mais fácil acesso e de algumas outras instituições, de acesso pouco mais restrito. Séries históricas nem sempre apresentam dados consistidos ou representam um longo período de tempo e por vezes apresentam falhas nos registros.

No Estado de Goiás, observa-se a falta de informações temáticas, em escala cartográfica adequada, sobre os tipos de solos existentes, sobre a cobertura vegetal e os tipos de uso e cobertura do solo. Dados disponíveis, ou estão defasados no tempo ou em escalas de pouco detalhe.

Para trabalhos futuros, sugere-se o teste empregando a mesma metodologia com a utilização de procedimentos de delimitação automática de bacias e rede de drenagens utilizando modelos digitais do terreno com diferentes resoluções espaciais, como por exemplo, os disponibilizados pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). A utilização da metodologia empregada com outro modelo hidrológico pode ser também, útil na confirmação dos resultados obtidos por este estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Glossário de Termos Hidrológicos**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos/TecnologiaCapacitacao/docs/Glossario/Instalar/GH T.EXE>>. Acesso em: 10 set. 2007.

BECKER, A. Criteria for hidrologically sound structuring of large land surface process model. In: KUANE, J.P (Ed.). **Advances in Theoretical hydrology**. [S.l.]: Elsevier, 1992. p. 97-111.

BERGSTRÖM, S.; GRAHAM, L.P. On the scale problems in Hydrological modeling. **Hydrology and Earth Systems Sciences**, v.4, p.777-829, 2007.

BEVEN, K.; KIRKBY, M. J. N. Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments, *J. Hydrol.*, 69, 119-143, 1984.

BEVEN, K. Linking parameters across scales: sub grid parameterizations and scale dependent hydrological models. **Hydrological Processes**, v.9, p.507-525, 1995.

BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. Scale issues in hydrological modeling - A review. **Hydrological Processes**, v.9, n. 3/4, p. 251-290, 1995.

CHOW, V. T. **Handbook of applied hydrology**. New York: McGraw Hill, 1959.

CUNHA, L. K da. **Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidrológica em tempo real**. 2004. 259p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DEHOTIN, J.; BRAUND, I. Which spatial discretization for wich distribuided hydrological model. **Hydrology and Earth Systems Science Discussions**. v.4, p. 777-829, 2007.

DOOGE, J. Parameterization of hydrological processes. In: EAGLESON, P.S. (Ed.). **Land surface processes in atmospheric general circulation models**. London: Cambridge United Press, 1982. p. 243-288.

DOOGE, J. Looking for hydrological laws. **Water Resources Research**, Washington, v. 22, n.5, p.1234 -1256, 1986.

FEDAC, R. **Effect of Spatial Scale on Hydrologic Modeling in a Headwater Catchment**. 1999. 179 f. Dissertação (Master of Science of Civil Engineering). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1999.

FERRAZ, F. F. de B.; MILDE, L. C. E.; MORTATTI, J. Modelos Hidrológicos Acoplados a Sistemas de Informações Geográficas: Um Estudo de Caso. **Revista de Ciência & Tecnologia**. n.14. p. 45-56, 1999.

FEYEN, L. et al. Application of a distribuided physically-based hydrological model to a medium size catchment. **Hydrology and Earth Systems Sciences**, v. 4, n.1, p.46-63, 2000.

GUPTA, V. K.; WAYMIRE, E. On the formulation of an analytical approach to hydrologic response and similarity at the basin scale. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.65, p. 95-123, 1983.

KLEMES, V. Conceptualization and Scale in Hydrology. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.65, p.1-23, 1983.

LAHMER, W.; PFÜTZNER, B. Scaling problems in large-scale hydrological modeling. In: VERHOEST, N.E.C.; VAN HERPE, Y.J.P.; DE TROCH, F.P. (Ed.). Monitoring and Modeling Catchment Water Quantity and Quality. **Conference proceedings**. Laboratory of Hydrology and Water Management, Ghent University, Ghent, Belgium, p. 95-99, 2000.

MAIDMENT, D. R. **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. 1v.

MAMEDE, L.; NASCIMENTO, M. A. L. S. Pedologia. In: BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL, Folhas SD 22, SE 22 e SD 23. Rio de Janeiro, 1981.

MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas Hidrológicas I. Conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. ABRH, v.2, n.1, p. 59-122, 1997a.

MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas Hidrológicas II. Diversidade de Processos na Bacia Vertente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. ABRH, v.2, n.1, p. 59-122, 1997b.

MENEZES, P. M. L.; CRUZ, C. B. M. Considerações sobre Bases Cartográficas Digitais. (1999). Disponível em: http://www.geocart.igeo.ufrj.br/pdf/trabalhos/Base_Cart_Digitais.pdf. Acesso em: 15 Jul 2009.

MORAD, M.; PÉREZ, A .T. Sistemas de Información Geográfica y Modelizaciones Hidrológicas: Una Aproximación a las Ventajas y Dificultades de su Aplicación. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles**, v.31, p. 23 – 46, 2001.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. Relatório Técnico Parcial – 2000. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf> Acesso em: 10 set. 2007.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação** – 2003. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/cap2_modelos_hidrologicos.pdf />. Acesso em: 04 set. 2007.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos SP, 2004.

SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. 1130 p.

TODINI, E. Hydrological Catchment modeling: past, present, and future. **Hydrological Earth System Science**, v.11, n.1, p. 468-482, 2007

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade, UFRGS, ABRH, 1998. 669 p.

UNESCO-OMM (1992). **Glossário Hidrológico Internacional**. Disponível em: <<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/aglu.htm>>. Acesso em: 05 set. 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA/RURALMINAS. Plano Diretor da Bacia Hidrográfica da Bacia do Rio Paranaíba. **Mapa de Solos**. 1:250.000. Viçosa, MG, 2000.

WOOD, E. F.; SIVAPALAN, M.; BEVEN, K. Scale effects in infiltration and runoff production. Conjunctive water use (Proceedings of the Budapest Symposium, July, 1986). IAHS. Publ. 156, 1986.

WU, J; LI, H. **Scaling and uncertainty analysis in ecology**: Methods and Applications. Netherlands: Springer, 2006. p. 1-13.

WWF-IMAGEM. **Definição de Áreas Prioritárias para Conservação do Estado de Goiás**. Goiânia, 2004 , 62p. il.

XAVIER, L. N. R. **Análise da incerteza causada pela representação da precipitação no modelo Topmodel**. 2002. 124p. Dissertação (Mestrado) - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro [Rio de Janeiro], 2002

ANEXOS

ANEXO I

Cálculos dos valores iniciais

Área

Os valores das áreas das bacias foram calculadas automaticamente no *ArcView* 3.2 utilizando a ferramenta *X-Tools*, programa desenvolvido para estender a capacidade do software original no Sistema de Projeção UTM.

CN

Calculado a partir das diferentes texturas dos solos existentes nas bacias, o tipo de uso e cobertura do solo, e a percentagem em área de cada tipo. Considerou-se também a umidade antecedente.

Impermeabilidade

Os valores das áreas impermeabilizadas das bacias foram calculadas automaticamente no *ArcView* 3.2 utilizando a ferramenta *X-Tools*, programa desenvolvido para estender a capacidade do software original no Sistema de Projeção UTM. Considerou-se neste trabalho como áreas impermeabilizadas, os perímetros urbanos existentes nas bacias.

Tempo de Retardo

$$T_{Lag} = 2.587.L^{0,8} (1000/CN-9)^{0,7} / 1900.i^{0,5}$$

L= comprimento do rio

i = declividade

Bacia Pequena

Escala 1:1.000.000

CN = 69

L = 1,42 km

i = 3,23 %

$$T_{Lag} = (2,587 \times (1420^{0,8})) \times (((1000 / 63) - 9)^{0,7}) / 1900 \times (3,23^{0,5}) = \mathbf{235 \text{ min.}}$$

Escala 1:250.000

CN = 63

L = 2,01 km

i = 5,27 %

$$T_{Lag} = (2,587 \times (2010^{0,8})) \times (((1000/63)-9)^{0,7})/1900 \times (5,27^{0,5}) = \mathbf{396 \text{ min.}}$$

Escala 1:100.000

CN = 63

L = 1,70 km

i = 5,64 %

$$T_{Lag} = (2,587 \times (1700^{0,8})) \times (((1000/63)-9)^{0,7})/1900 \times (5,64^{0,5}) = \mathbf{356 \text{ min.}}$$

Bacia Média

Escala 1:1.000.000

CN = 60

L = 54,0 km

i = 0,63 %

$$T_{Lag} = (2,857 \times (54000^{0,8})) \times (((1000/60)-9)^{0,7}) / 1900 \times (0,63^{0,5}) = \mathbf{1820 \text{ min.}}$$

Escala 1:250.000

CN = 56

L = 54,2 km

i = 0,46 %

$$T_{Lag} = (2,857 \times (54200^{0,8})) \times (((1000/56)-9)^{0,7}) / 1900 \times (0,46^{0,5}) = \mathbf{1720 \text{ min.}}$$

Escala 1:100.000

CN = 56

L = 54,7 km

i = 0,56 %

$$T_{Lag} = (2,857 \times (54700^{0,8})) \times (((1000/56)-9)^{0,7}) / 1900 \times (0,56^{0,5}) = \mathbf{1918 \text{ min.}}$$

Bacia Grande

Escala 1:1.000.000

CN = 78

L = 269 km

i = 0,15 %

$$T_{Lag} = (2,857 \times (269000^{0,8})) \times (((1000/78)-9)^{0,7}) / 1900 \times (0,15)^{0,5} = \mathbf{5087 \text{ min.}}$$

Escala 1:250.000

CN = 74

L = 275 km

i = 0,15 %

$$T_{Lag} = (2,857 \times (275000^{0,8})) \times (((1000/74)-9)^{0,7}) / 1900 \times (0,15)^{0,5} = \mathbf{3613 \text{ min.}}$$

Escala 1:100.000

CN = 74

L = 283 km

i = 0,16 %

$$T_{Lag} = (2,857 \times (283000^{0,8})) \times (((1000/42)-9)^{0,7}) / 1900 \times (0,15)^{0,5} = \mathbf{3818 \text{ min.}}$$

Descarga Inicial

Bacia Pequena

Estação Fluviométrica E.T.A

Vazão mínima para a estação no período dezembro de 1982 a junho de 1987

$$Q = 0,085 \text{ m}^3/\text{s}$$

Bacia Média

Vazão mínima para a estação no período setembro de 1995 a maio de 2006

$$Q = 0,457 \text{ m}^3/\text{s}$$

Bacia Grande

Vazão mínima para a estação no período abril de 2000 a março de 2007

$$Q = 48,40 \text{ m}^3/\text{s}$$

Perda Inicial

Bacia Pequena

1:1.000.000

$$S_o = (25400 - (254 \times 63)) / 63 = 149 \text{ mm}$$

$$L_o = 0,2 \times S_o = 29,8 \text{ mm}$$

1.250.000

$$S_o = (25400 - (254 \times 63)) / 63 = 149 \text{ mm}$$

$$L_o = 0,2 \times S_o = 29,8 \text{ mm}$$

1:100.000

$$S_o = (25400 - (254 \times 63)) / 63 = 149 \text{ mm}$$

$$L_o = 0,2 \times S_o = 29,8 \text{ mm}$$

Bacia Média

1.1.000.000

$$S_o = (25400 - (254 \times 63)) / 60 = 169$$

$$L_o = 0,2 \times S_o = 33,8 \text{ mm}$$

1:250.000

$$S_o = (25400 - (254 \times 56)) / 56 = 199$$

$$L_o = 0,2 \times S_o = 39,9 \text{ mm}$$

1:100.000

$$S_o = (25400 - (254 \times 56)) / 60 = 199$$

$$L_o = 0,2 \times S_o = 39,9 \text{ mm}$$

Bacia Grande

1:1.000.000

$$S_o = (25400 - (254 \times 78)) / 78 = 71,6 \text{ mm}$$

$$L_o = 0,2 \times S_o = 14,3 \text{ mm}$$

1:250.000

$$S_o = (25400 - (254 \times 74)) / 74 = 89,2 \text{ mm}$$

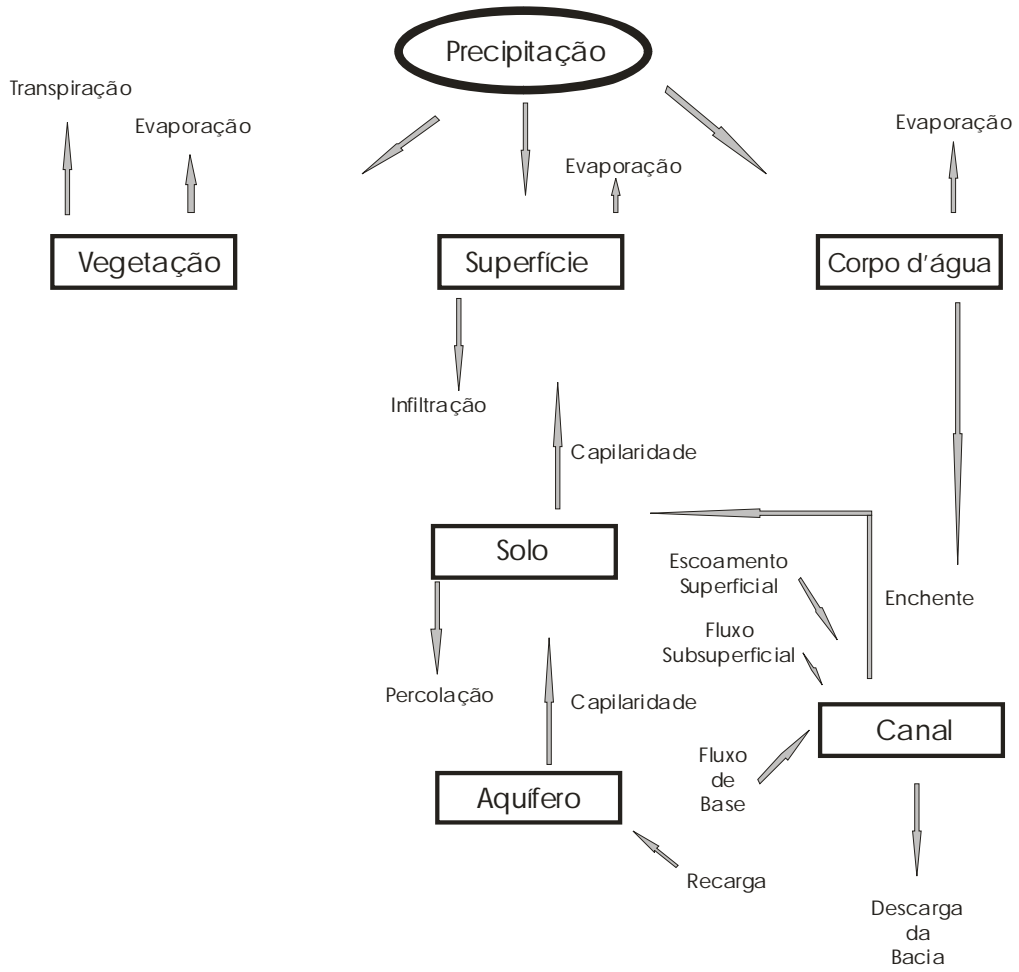
$$L_o = 0,2 \times S_o = 17,8 \text{ mm}$$

1:100.000

$$S_o = (25400 - (254 \times 74)) / 74 = 89,2 \text{ mm}$$

$$L_o = 0,2 \times S_o = 17,8 \text{ mm}$$

ANEXO II



Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga
Orientador